

GENERADORES DE INDUCCIÓN EN LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Manuel BURGOS PAYÁN^(*)
Ángel Gaspar GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
Manuel Antonio VALLEJO SAURA
Universidad de Sevilla

Se describe una sencilla práctica de laboratorio en la que se hace que una máquina de inducción funcione como generador, primero conectada a la red y luego de forma autónoma, alimentando localmente a una carga. En ella se utilizan una máquina de inducción y otra de corriente continua, indicándose los esquemas de los ensayos y su desarrollo. Los resultados experimentales obtenidos en ambos casos se comparan y complementan con los obtenidos por simulación numérica. La práctica no requiere ningún equipo especial, es simple de realizar y fácilmente comprensible.

A simple experiment for the induction generator is presented. An induction machine initially operates connected to the grid, and then in an autonomous manner, feeding a local load. Two machines, D.C. and induction, are used in the experiment. The diagram of the experiment and its procedure are given. Experimental results, in both cases, are compared and complemented with those obtained by numerical simulation. No special equipment is required for this simply realized and easily understood experiment.

INTRODUCCIÓN

La robustez, fiabilidad y economía de los motores asíncronos de jaula de ardilla, junto a las escasas necesidades de mantenimiento que requieren, los han llevado a ser los motores más empleados en el campo industrial, como es bien conocido. A pesar de su masiva utilización como motores, las máquinas asíncronas, o máquinas de inducción (MI), son reversibles y también

son capaces de funcionar como generadores, tanto conectados a la red como de forma aislada, alimentando cargas locales.

Para que una MI conectada a la red funcione como generador basta con accionar el rotor, con ayuda de un motor primario, hasta hacerlo girar a una velocidad algo superior a la de sincronismo [3,4]. Al estar el devanado estático permanentemente conectado a la red, los valores de frecuencia y tensión de la

^(*) Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Avda. Reina Mercedes, s/n. 41012 SEVILLA

potencia eléctrica producida son los de la propia red. Por tanto, son constantes con independencia de la velocidad de giro, lo que hace que los generadores de inducción no precisen regulador de velocidad para su motor primario.

Para que una MI pueda funcionar como generador de forma autónoma y alimentar cargas locales, además de accionar el rotor con ayuda de un motor primario, hay que conectar a sus bornas una batería de condensadores de capacidad suficiente. A pesar de las ventajas que ofrecen las MI, el funcionamiento autónomo de los GI presenta algunas dificultades. Quizá la más notable sea su incapacidad para mantener constantes la frecuencia y la tensión en bornas cuando varía la velocidad de giro o alimenta a una carga variable, pero el desarrollo de los compensadores estáticos de energía reactiva (static-var) [6] o el uso de condensadores en serie [1] permiten dar una respuesta adecuada a este problema.

La posibilidad de que una MI conectada a la red funcione como generador no es ninguna novedad. Incluso el funcionamiento autoexcitado es conocido desde hace tiempo. Ya en los años veinte se había observado que algunos motores de inducción, que tenían conectados a sus bornas baterías de condensadores para compensación del factor de potencia, seguían teniendo tensión en sus bornas durante unos instantes, aún después de que fueran desconectados de la red. Pero es probable que la tradicionalmente escasa aplicación del generador de inducción sea la causa de que no se haya escrito mucho sobre este tema hasta los últimos años, en que el progresivo encarecimiento de la energía y la creciente preocupación general por la conserva-

ción del medio ambiente están sirviendo de estímulo para la utilización de fuentes de energía renovable, como en el caso de las minicentrales hidráulicas y eólicas. La rentabilidad de estas instalaciones es condicionada por la elección del equipo generador, lo que ha hecho despertar interés por los generadores de inducción que, por sus características técnico-económicas, se presentan como buenos candidatos para este tipo de aplicaciones.

El hecho de que la utilización de generadores de inducción haya sido muy bien escasa hasta estos últimos años presenta también su reflejo en el ámbito de la docencia, dándose el caso de que este tema no suele tratarse con demasiada extensión en los textos de máquinas eléctricas. En algunos casos no se trata en absoluto. De igual forma se da el caso de que el funcionamiento de la MI como generador es un punto que casi nunca aparece incluido en las prácticas de laboratorio, llegándose a lo sumo a realizar una simulación del mismo [2,10]. Todo ello se ve agravado por el hecho de que este modo de funcionamiento de la MI suele presentar una cierta dificultad de comprensión para los estudiantes [9,10].

En lo que sigue se propone una práctica de laboratorio con la que paliar, al menos parcialmente, esta laguna. En esta práctica se ofrece como trabajo voluntario a los alumnos de la asignatura de Cálculo y Construcción de Máquinas Eléctricas (quinto curso de especialidad eléctrica, Ingeniero Industrial). En su primera parte se hace que una MI, que inicialmente arranca y funciona como motor, pase a funcionar como generador utilizándose un esquema similar al de los actuales sistemas de conversión

minihidráulicos y eólicos. En ella pueden observarse las peculiaridades de los funcionamientos motor y generador, así cómo que la transición de uno a otro modo de funcionamiento puede producirse de una forma continua y sin interrupciones.

En una segunda parte de la práctica se hace que la MI funcione como un generador autónomo, separado de la red (funcionamiento en isla), alimentando localmente a una carga trifásica equilibrada. Aquí se pueden observar las características de funcionamiento de este tipo de generador, y cómo se modifican al variar la capacidad de la batería de condensadores, la carga o la velocidad de giro.

En línea con la cada vez más abundante bibliografía sobre la utilización de ordenadores en el campo de la docencia de la ingeniería eléctrica [2,5,10], y como complemento al trabajo experimental realizado en el laboratorio (no como sustituto del mismo), se sugiere la utilización del modelo de circuito equivalente de la MI [3,4,8] para estudiar numéricamente su funcionamiento, tanto conectada a la red (motor y generador) como autoexcitada. El programa de simulación permitirá, entre otras cosas, contrastar las previsiones teóricas del modelo con los resultados reales de los ensayos, así como la «observación» de ciertas magnitudes difíciles de medir o inaccesibles, como la corriente rotórica en el caso de una MI de jaula de ardilla. La realización del programa de simulación numérica añade una componente de entusiasmo e interés por la labor a realizar, ya que introduce un nuevo elemento de trabajo real en la tarea. Además, la sinergia que produce la integración de los ensayos de laboratorio y la simulación mediante ordenador

refuerza la comprensión del funcionamiento físico de la máquina.

II. ENSAYOS DE LABORATORIO

Como ya se ha indicado, el trabajo a desarrollar en el laboratorio tiene dos partes. En la primera, se hace que la MI funcione conectada a la red. Inicialmente arranca y funciona como motor, absorbiendo potencia (activa) de la red. Luego pasa a funcionar como generador, cediendo potencia (activa) a la misma red. En la segunda parte de la práctica se hace que la MI autoexcite, conectando a sus bornas un batería de condensadores, y que funcione tanto en vacío como alimentando cargas locales.

El esquema para los ensayos de laboratorio, tanto para el funcionamiento de la MI conectada a la red (motor y generador) como para el funcionamiento autónomo alimentando cargas locales, se muestra en la figura 1. Aunque no es indispensable, se recomienda la utilización de un osciloscopio para poder ver en su pantalla cómo son las formas de onda de tensión e intensidad durante el funcionamiento autoexcitado de la MI, por ejemplo, o cómo varían estas ondas, con la MI conectada a la red, al ir aumentando la velocidad y pasar del funcionamiento motor al generador. Con ello, las peculiaridades que caracterizan uno y otro modo de funcionamiento pueden detectarse visualmente, con lo que la práctica se enriquece y gana en interés. De igual forma, podría utilizarse cualquier tipo de máquina asíncrona, pero es preferible la utilización de una de rotor bobinado, ya que con este tipo de máquina se tendrá acceso a la corriente rotórica.

Debe subrayarse que, en el laboratorio, los alumnos deben conectar los aparatos de medida, seleccionando previamente los rangos de medida apropiados a partir de los datos consignados en la placa de características de la máquina a ensayar y de los valores típicos de las magnitudes a medir. También deben ocuparse de realizar las conexiones entre la alimentación, los equipos de mando y protección y la propia máquina, de forma segura. De este modo se intenta mantener a los alumnos en contacto con la ingeniería eléctrica de potencia de la vida real y se refuerza la idea de responsabilidad sobre los ensayos que realizan y de que éstos se desarrollan en todo momento bajo su control.

III. PROGRAMA DE SIMULACIÓN

El programa, codificado en lenguaje C [7], permite analizar el funcionamiento de la MI (cuyos datos se introducen por teclado), tanto conectada a la red como autoexcitada. En el primer caso, se representan gráficamente los valores de la resistencia y reactancia equivalente, la FEM, las intensidades estatórica y rotórica, las potencias activa, reactiva y aparente, y el par motor, todos ellos en función de la velocidad (en el rango que se escoja). En este modo de funcionamiento puede elegirse entre: conectado a una red de potencia infinita, conectado a la red a través de una impedancia, compensado con una batería de condensadores en serie o compensado con una batería en paralelo. Si se escoge el modo de funcionamiento autoexcitado, se obtiene el valor de la capacidad mínima que permite dicho funcionamiento, así como la representación gráfica de la FEM genera-

da y su pulsación en función de velocidad.

IV. GENERADOR DE INDUCCIÓN CONECTADO A LA RED

Como ya se ha indicado, la figura muestra el esquema de la práctica. Al cerrar el contactor K1 se produce el arranque en directo de la MI, que empieza a funcionar como motor, absorbiendo potencia activa y reactiva de la red de C.A. Una vez estabilizada la velocidad, se cierra el contactor K2, con lo que se alimenta la excitación de la máquina de C.C. (MCC), que empieza a funcionar como generador. Esta circunstancia puede detectarse mediante el voltímetro V_i que empezará a indicar valores no nulos de tensión inducida.

Actuando sobre el reostato de campo R_e se ajusta la corriente de excitación a su valor nominal. Cerrando el contactor K₂ se conecta el reostato de carga R_c, ajustándose su valor hasta que el motor de inducción absorba la corriente nominal.

Este puede considerarse que es el punto de comienzo, en lo que se refiere a observación de las características de funcionamiento de la MI. A partir de ese instante se debe ir tomando periódicamente los valores de las lecturas correspondientes a todos los aparatos indicados en el esquema de la figura 1. Un osciloscopio permitiría visualizar en su pantalla cómo son y los cambios que se producen en las formas de onda de las tensiones y corrientes estatóricas; fundamentalmente las variaciones de la amplitud y el desfase de las corrientes con la velocidad. Si se dispone de una máquina de rotor bobinado podrían visualizarse también la forma de onda de la corriente

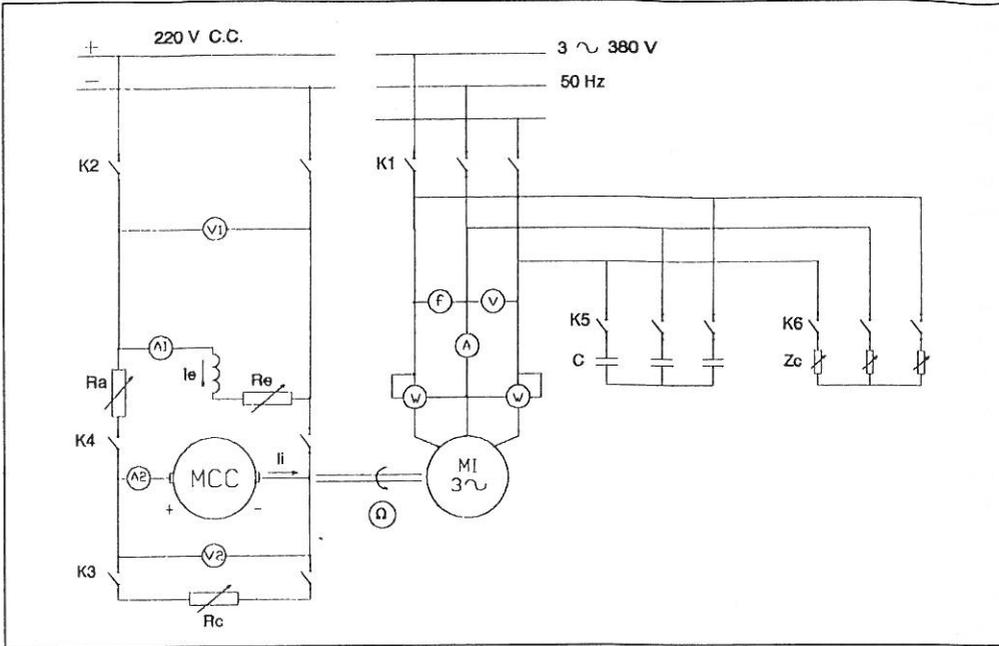


Figura 1. Esquema de la práctica

rotórica y los cambios que se producen, especialmente las variaciones en su amplitud y frecuencia.

Partiendo del punto indicado, en que la MI funciona a régimen nominal como motor arrastrando a la de continua (que funciona como generador), se va aumentando progresivamente el valor de la resistencia del reostato de carga R_c hasta llegar a su valor máximo, tras lo cual se desconecta (abriendo K3). De esta forma se llega al punto de funcionamiento en vacío del motor de inducción. Durante este proceso, el tacómetro (Ω) indicará que la velocidad ha ido aumentando hasta llegar al punto de funcionamiento en vacío, en el que la velocidad de giro será prácticamente la de sincronismo.

A continuación se actúa sobre el reostato de campo R_e hasta conseguir que la tensión generada por la MCC (V2)

coincida con la de la red de continua (V1). En ese momento se cierra el contactor K4, con lo que se conecta el inducido de la MCC a la red de alimentación en continua, aunque sin tomar corriente (lectura nula del amperímetro A2).

A partir de este momento, conforme se va aumentando el valor de la resistencia del reostato de campo R_e , se reduce la corriente de excitación, por lo que la velocidad del grupo aumenta, como podrá comprobarse por las lecturas del tacómetro (Ω), llegándose a superar la velocidad de sincronismo. También deberá observarse que la corriente de inducido (A2) ha cambiado de sentido y que la potencia (activa) absorbida de la red por la MI se hace negativa, invirtiéndose el flujo de potencia, que ahora sale de la MI (funcionamiento generador) y se dirige a la red. Por el

contrario, el sentido del flujo de potencia reactiva no se altera. La MI sigue absorbiendo potencia reactiva de la red aunque funcione como generador.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACIÓN

En la Tabla I se muestran algunos resultados (medidas realizadas y cálculo). La primera columna muestra la velocidad del grupo (Ω). Las cuatro siguientes la corriente (I_1), su desfase ($-\arg\{I_1\}$), la potencia activa (P_1) y la reactiva (Q_1) absorbidas de la red de C.A. por la MI. Aquí se ha considerado la potencia absorbida en el modo motor como positiva. Por último, las columnas sexta a octava muestran la corriente de inducido (I_i), la corriente de excitación (I_c) y la potencia de inducido (P_i) de la MCC.

La cuarta columna de la Tabla I muestra cómo al ir aumentando la velocidad se produce un cambio de signo en la potencia

activa absorbida. Esto refleja un cambio en el modo de funcionamiento de MI, que pasa de motor a generador partir de una determinada velocidad. Por su parte, la columna quinta permite comprobar que cualquiera que sea el modo de funcionamiento de la MI siempre absorbe potencia reactiva, ya que esta columna sólo presenta valores positivos.

En las figuras 2 a 4 se muestran algunas curvas características de funcionamiento de la MI, obtenidas por vía computacional. Las figuras 2 y 3 muestran la corriente estatórica y su desfase y las componentes de la potencia absorbida por la MI de la red de C.A., respectivamente, en función de la velocidad. En ambas se han superpuesto los puntos experimentales, pudiéndose comprobar que ambos resultados coinciden bastante bien. La figura 4 representa el diagrama circular de corrientes de la MI, que resume su comportamiento de una manera gráfica.

Tabla I. Algunos resultados experimentales y de cálculo.

Ω (rd/s)	MÁQUINA DE INDUCCIÓN				M. DE CORRIENTE CONTINUA		
	I_1 (A)	$-\arg\{I_1\}$ (rd)	P_1 (W)	Q_1 (VAr)	I_i (A)	I_c (A)	P_i (W)
114,2	1,20	0,960	452	645,3	-1,19	0,29	-213,0
143,0	1,06	1,262	212	664,0	-0,21	0,28	-39,9
159,5	1,04	1,501	48	684,8	0,43	0,17	95,9
164,6	1,07	1,571	0	701,0	0,83	0,16	183,2
183,3	1,20	1,804	-176	766,5	2,50	0,12	524,1
184,8	1,22	1,837	-212	776,5	3,00	0,11	657,0

La figura 5 muestra las formas de onda de las corrientes y tensiones por fase en los devanados del estátor para los dos casos en que se intercambia 212 W con la red de C.A.: funcionando como motor, con una corriente de inducido de 1,06 A, y como generador, con una corriente de 1,22 A. Interesa hacer notar que esta última figura, que aquí se presenta como resultado de simulación, podría verse realmente en el laboratorio en la pantalla de un osciloscopio.

El diagrama circular de corrientes de la figura 4 permite ilustrar algunos de los rasgos típicos del funcionamiento de la MI. Un primer ejemplo lo podría constituir el hecho de que los puntos de funcionamiento posible, reflejados por el propio círculo, están situados en el primer y cuarto cuadrantes. Por lo tanto, la componente activa de la corriente absorbida por la MI y, en consecuencia, la potencia activa, pueden ser positivas o negativas. Es decir, la MI puede absorber o ceder potencia

activa a la red y, por tanto, actuar como motor o generador. Los valores positivos (motor) y negativos (generador) de la cuarta columna de la Tabla I aportan la confirmación experimental. Por el contrario, la componente reactiva de la corriente y la potencia reactiva, son siempre positivas lo que puede comprobarse en la quinta columna de la misma tabla.

La comparación de las columnas cuarta y octava permite seguir el flujo de potencia entre ambas máquinas. Los dos primeros valores manifiestan que la MI funciona como motor (zona superior del diagrama circular) y que la MCC lo hace como generador. Los dos últimos valores reflejan la inversión del flujo de potencia. La cuarta fila de la tabla corresponde a la frontera entre el funcionamiento motor y generador de la MI. El motor de C.C. aporta mecánicamente todas las pérdidas, mientras que la red suministra una corriente que es puramente reactiva. La tercera fila corresponde a un punto com-

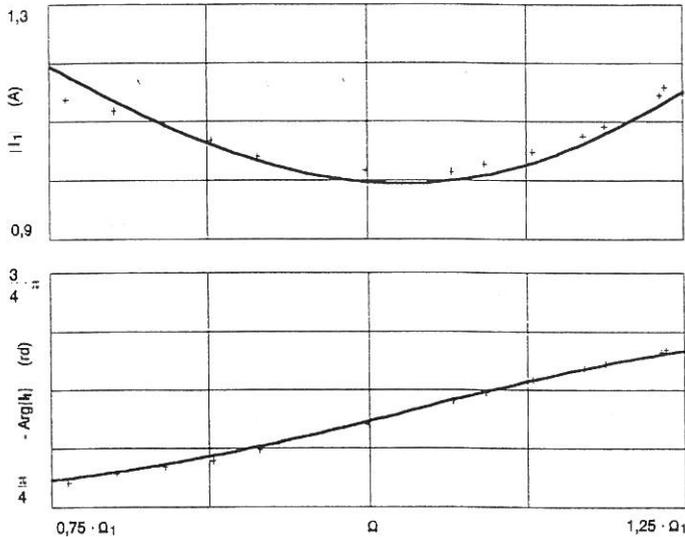


Figura 2: Corriente estática y su desfase

prendido entre el de funcionamiento en vacío y el de la frontera de paso a generador, zona ésta en la que se produce el mínimo valor del módulo de la corriente absorbida.

Un segundo ejemplo podría ser el que conforme aumenta la velocidad de la MI, el desfase de la corriente estática va aumentando continuamente, alcanzándose la frontera entre el funcionamiento motor y el generador cuando la corriente se sitúa en cuadratura respecto la tensión siendo (puramente reactiva). El módulo de la corriente al principio va disminuyendo, alcanzando un mínimo algo antes de situarse en cuadratura, a partir del cual va creciendo conforme se interna en la región generador. Las columnas segunda y tercera de la Tabla I, o la figura 2 reflejan éste comportamiento.

Otro ejemplo lo podría constituir el hecho de que para un determinado valor absoluto de la componente activa de la corriente estática (equivalente a poten-

cia activa), el funcionamiento motor produce con una corriente estática menor que el correspondiente al generador. Las filas segunda y última de la Tabla I lo confirman.

Un cuarto ejemplo podría ser el que para un determinado valor de la corriente estática o de la potencia aparente, el valor absoluto de la corriente activa o de potencia activa es mayor en el caso motor que en el generador. Las filas primera y quinta de la Tabla I aportan la confirmación experimental correspondiente.

La evolución de las componentes activa y reactiva de la potencia absorbida por la MI, que se muestra en la figura 3, puede explicarse, al menos cualitativamente, con ayuda del modelo de circuito simplificado de la figura 6, válido sólo en la región de funcionamiento en que el deslizamiento es pequeño, y en el que sólo permanecen la resistencia rotórica efectiva (R_2/s) en paralelo con la reactancia de magnetización (X_μ), despreciándose

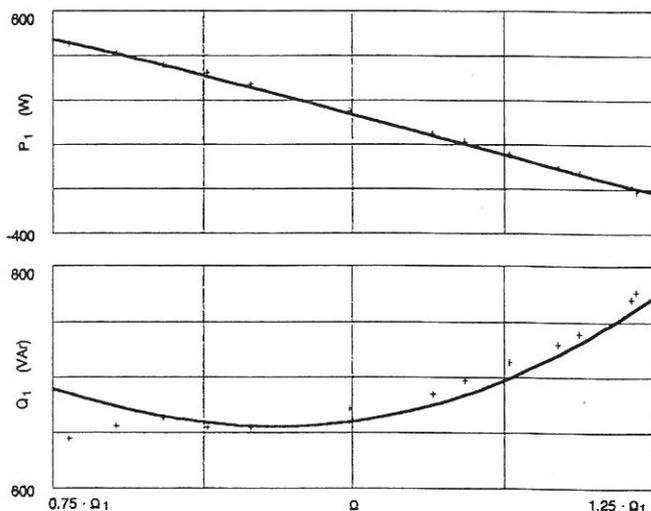


Figura 3: Componentes activa y reactiva de la potencia absorbida de la red.

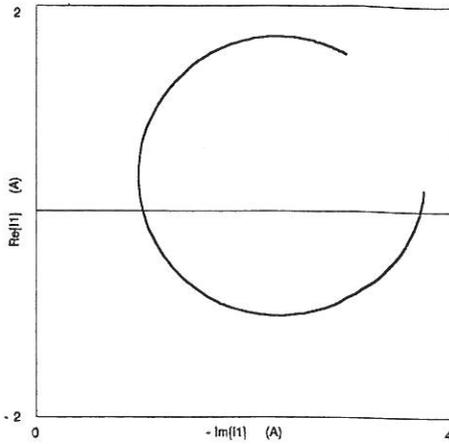


Figura 4: Diagrama circular de corriente.

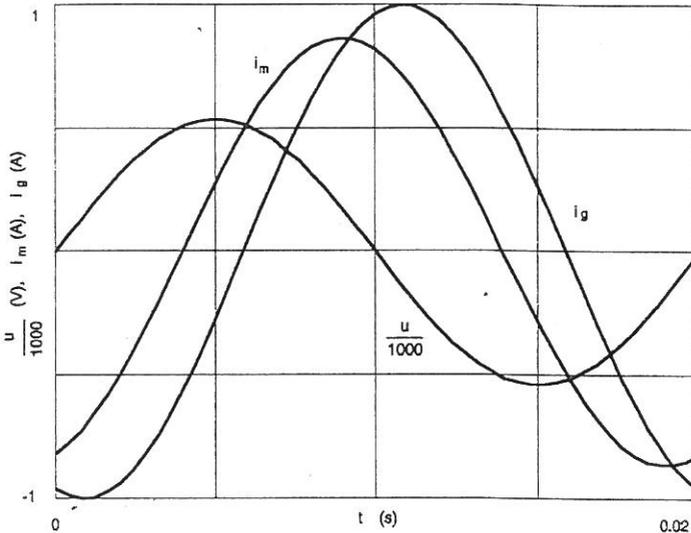


Figura 5: Formas de onda de tensión y corriente estáticas (motor y generador).

resto de los elementos. De esta forma, las componentes activa y reactiva de la corriente estática y de la potencia absorbida pueden escribirse como:

$$Re\{U_1\} = \frac{U_1}{R_2} s = \frac{U_1}{R_2} \left(1 - \frac{\Omega}{\Omega_1}\right) \quad Im\{U_1\} = -\frac{U_1}{X_\mu}$$

$$P_1 = 3 \frac{U_1^2}{R_2} s = 3 \frac{U_1^2}{R_2} \left(1 - \frac{\Omega}{\Omega_1}\right) \quad Q_1 = 3 \frac{U_1^2}{X_\mu}$$

Estas ecuaciones muestran que las componentes activas de la corriente estática y de la potencia decrecen de forma lineal (aproximadamente) con la velocidad, como aparece en la parte superior de la figura 3. También indican que, aproximadamente, cuando la velocidad del rotor supera a la de sincronismo, se invierte el signo de la potencia, pasan-

do la MI a funcionar como generador. Igualmente muestran cómo el consumo de potencia reactiva es aproximadamente constante e independiente de la velocidad, como puede verse en la parte inferior de la citada figura 3.

El paso del funcionamiento motor al generador también puede seguirse observando la corriente rotórica, si se dispone de una máquina de rotor bobinado, o bien simularse en el caso de usar una de jaula de ardilla.

IV. GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTOEXCITADO

Para que una MI pueda funcionar de forma autónoma como generador hay que accionar el rotor con ayuda de un motor primario y, además, conectar a sus bornas una batería de condensadores de suficiente capacidad. El proceso de autoexcitación de una MI es análogo al que tiene lugar en los generadores de C.C. y, al igual que ellos, se debe al magnetismo remanente. El rotor actúa al principio como un imán permanente (inducción remanente) que, al girar, induce un sistema trifásico de tensiones en el arrollamiento estatórico. La débil FEM

inducida, aplicada a la batería de condensadores, da lugar a la circulación de una pequeña corriente magnetizante que refuerza el valor de la FEM (flujo entrándose en un proceso de realimentación positiva, en el que la corriente hace crecer la FEM y ésta hace crecer a la corriente. Si sólo se considera la inductancia de magnetización (se desprecian todas las demás impedancias del circuito equivalente), este proceso termina en el punto en que se corta la curva de vacío ($E(I_{\mu})$) y la recta representativa de la tensión en bornas del condensador, donde ambas tensiones se igualan. La saturación que muestra la curva de vacío es la que permite que haya un punto de corte y, en consecuencia, un punto de funcionamiento estable del GIA en régimen permanente.

Como puede comprobarse, el proceso de autoexcitación del GI es básicamente el mismo que tiene lugar en los generadores de C.C., aunque a diferencia de estos últimos, no depende del sentido de giro. La pendiente del tramo recto de la característica de vacío define lo que podría denominarse «reactancia crítica de excitación» [1]. Si el condensador es pequeño y su reactancia es superior

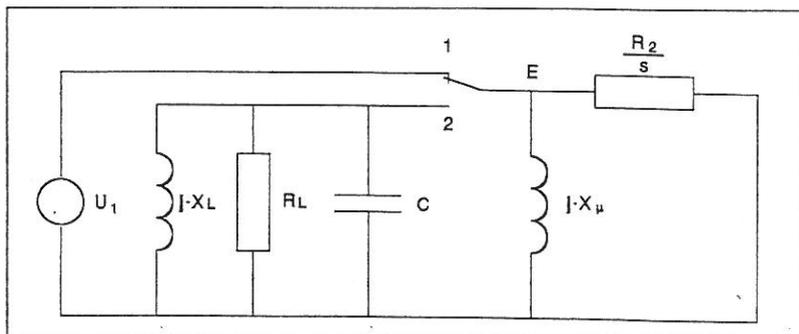


Figura 6: Circuito equivalentes simplificado.

este valor crítico, el punto de corte se produce muy cerca del origen, y la autoexcitación fracasa. Por el contrario, cuando la reactancia del condensador es inferior a la crítica, el punto de corte se produce en la zona de saturación, dando lugar a la autoexcitación de la máquina.

El arranque del motor de C.C. se produce al cerrar los contactores K2 y K4 (figura 1).

Actuando sobre el reostato de arranque (R_a) y, eventualmente sobre el reostato de campo (R_f), se ajusta la velocidad a un valor próximo al nominal (o a cualquier otro valor deseado).

El voltímetro V indicará la presencia de una pequeña tensión inducida (algunos voltios). Un osciloscopio permitiría visualizar en su pantalla la forma de onda de esta tensión y comprobar que su frecuencia corresponde al valor de sincronismo. Por tanto, la MI funciona en esta primera fase como un generador síncrono muy débilmente excitado, en el que el rotor actúa como un imán permanente que, al girar, induce un sistema trifásico de tensiones en el arrollamiento estático.

Al cerrar el contactor K5 se conecta la batería de condensadores a las bornas de la MI, iniciándose el proceso de autoexcitación. Si la batería de condensadores tiene capacidad suficiente, la MI llega a autoexcitarse, lo que se pondrá de manifiesto por las lecturas del voltímetro y el frecuencímetro. El primero indicará un valor próximo (relativamente) a la tensión nominal de la máquina, mientras el segundo indicará una frecuencia próxima al valor de sincronismo. Un osciloscopio permitiría ver las formas de onda de las tensiones y corrientes

estatóricas (no completamente senoidales) generadas.

La autoexcitación de la máquina en vacío puede considerarse que es el punto de comienzo, en lo que se refiere a observación de las características de funcionamiento autoexcitado de la MI. A partir de ese instante se debe ir tomando periódicamente los valores de las lecturas correspondientes a todos los aparatos indicados en el esquema de la figura 1. Funcionando el GIA en vacío puede comprobarse que, conforme se hace subir la velocidad de la MCC, van creciendo los valores de la tensión generada y de su frecuencia.

Otro ensayo fácil de hacer consiste en conectar una carga. Se parte de la misma situación inicial, con la máquina autoexcitada girando a la velocidad deseada. Ahora se cierra el contactor K6, con lo que se conecta una carga trifásica equilibrada Z_c . La conexión de esta carga hace que caigan los valores de la tensión y la frecuencia (deberán reajustarse los reostatos del MCC si desea mantenerse la velocidad). Ahora podrá comprobarse que conforme se hace crecer la velocidad de giro van creciendo los valores de tensión y frecuencia.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACIÓN

La Tabla II muestra los resultados de algunas de las medidas realizadas cuando se conecta a las bornas de la MI una batería trifásica de condensadores de 2,5 kVAr (55,1 μ F) (velocidad del grupo (Ω), tensión generada (U_1), su frecuencia (f) y la corriente (I_1)), y se la hace funcionar en vacío (izquierda) y con carga resistiva (derecha).

Tabla II. Algunos resultados experimentales.

Ω (rd/s)	G. DE INDUCCIÓN A. $Q_c = 2,5 \text{ kVAr}$ Vacío			Ω (rd/s)	G. DE INDUCCIÓN A. $Q_c = 2,5 \text{ kVAr}$ $R = 260 \Omega$		
	U_{10} (V)	f_0 (Hz)	I_{10} (A)		U_1 (V)	f (Hz)	I_1 (A)
83,6	170	24,4	0,81	84,9	51	24,4	0,26
93,9	225	28,2	1,20	85,0	73	24,4	0,37
104,0	275	31,6	1,59	85,9	101	25,3	0,52
110,2	302	33,3	1,85	92,1	157	26,7	0,85
120,0	345	36,2	2,29	106,4	230	30,9	1,42
132,2	395	39,1	2,83	118,8	280	34,2	1,88

En la figura 7, obtenida por simulación numérica, puede verse que tanto la tensión generada en vacío como su frecuencia crecen de forma aproximadamente lineal con la velocidad. Para una determinada velocidad, la tensión generada crece con la capacidad (potencia) de la batería de condensadores.

La figura 8 muestra la característica exterior del GIA con carga resistiva, para dos baterías de condensadores. Como puede verse, al principio, conforme se va reduciendo la resistencia de carga, cae la tensión y aumenta la intensidad hasta llegar a un máximo, a partir del cual posteriores reducciones en el valor de

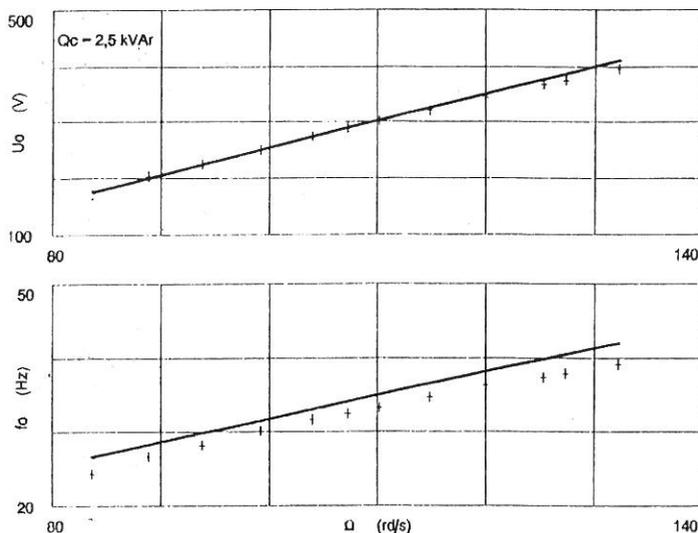


Figura 7: Tensión y frecuencia en vacío.

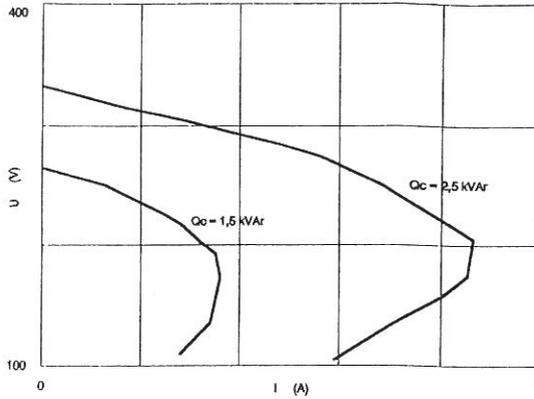


Figura 8: Característica exterior de un GIA.

resistencia de carga producen decrementos tanto de los valores de tensión como de corriente.

La evolución de la tensión generada su frecuencia (figura 7) pueden explicarse con ayuda del circuito equivalente simplificado de la figura 6, que da cuenta del funcionamiento autoexcitado del generador con el conmutador en la posición 2. La admitancia asociada al nudo E es:

$$Y = \left(\frac{1}{R_L} + \frac{s}{R_2} \right) + j \cdot \left(\omega \cdot C - \frac{1}{X_\mu} - \frac{1}{\omega \cdot L_L} \right)$$

La ecuación correspondiente a este nudo es:

$$Y \cdot E = 0$$

Si llega a producirse la autoexcitación, se producirá una cierta tensión en bornas ($E \neq 0$). En consecuencia, la única solución que satisface la ecuación anterior es que sea nula la admitancia asociada al nudo. Con una batería de condensadores y una carga dadas, para cada velocidad, el valor de esta admitancia sólo depende de la pulsación de las tensiones generadas (o de la frecuencia) a través del

deslizamiento y de la inductancia de magnetización. Dado que la admitancia es un complejo, su expresión puede desdoblarse, dando lugar a un sistema de dos ecuaciones:

$$G(\omega) = \text{Re} \{ Y \} = \frac{1}{R_L} + \frac{s}{R_2} = 0$$

$$B(\omega, X_\mu) = \text{Im} \{ Y \} = \omega \cdot C - \frac{1}{X_\mu} - \frac{1}{\omega \cdot L_L} = 0$$

La primera de ellas sólo depende del deslizamiento (que, a su vez depende de la pulsación), lo que facilita una solución analítica del sistema, que resulta ser:

$$\omega = p \cdot \Omega \cdot \frac{R_L}{R_L + R_2}$$

$$X_\mu = \frac{\omega \cdot L_L}{\omega^2 \cdot C \cdot L_L - 1}$$

Como puede verse, la pulsación (o la frecuencia) de la tensión generada es proporcional a la velocidad de giro, tanto en vacío como en carga, lo que explica su representación en la figura 7. La constante de proporcionalidad depende de la parte resistiva de la carga, R_L , pero no de

la capacidad de la batería de condensadores.

Para obtener la tensión en bornas se aproxima la característica vacío de la máquina mediante la expresión:

$$\frac{E}{F} = \frac{a \cdot I_{\mu}}{b + I_{\mu}}$$

$$E = a \cdot F - b \cdot X_{\mu}$$

siendo $F = f/f_N$, y a y b , dos constantes. Con ello puede escribirse:

El valor de la tensión generada, para una velocidad y carga dadas, depende de la capacidad de la batería de condensadores (a través de X_{μ}), de forma que cuanto mayor es la capacidad mayor es la tensión generada. También puede verse que la tensión crece conforme aumenta la velocidad.

Para el caso de funcionamiento en vacío las expresiones quedan reducidas a:

$$\omega_0 = p \cdot \Omega$$

$$E_0 = \frac{p \cdot \Omega}{\omega_{1N}} \cdot a - \frac{b}{\omega_1 \cdot C} = k_{\Omega} \cdot \Omega - \frac{k_C}{F \cdot C}$$

en la que las constantes k_{Ω} y k_C son fácilmente identificables. Como puede verse, estas expresiones explican bastante bien el crecimiento lineal con la velocidad de la frecuencia y de la tensión generada en vacío mostrado en la figura 7. También explica el crecimiento de la tensión inducida con la capacidad de la batería de condensadores.

V. CONCLUSIONES

Se ha descrito una práctica de laboratorio sencilla de realizar y fácil de com-

prender en la que una MI arranca como motor y pasa a funcionar como generador de forma continua y sin interrupción. Posteriormente se autoexcita con una batería de condensadores y funciona en forma aislada, tanto en vacío como con carga. En ambos casos, los resultados experimentales obtenidos coinciden bastante bien con las predicciones teóricas. Los resultados de simulación numérica tanto cualitativa como cuantitativamente La práctica no requiere ni máquinas ni aparatos especiales, pero se enriquece una forma significativa con la utilización de un osciloscopio en los ensayos, ya que permite observar las formas de onda de tensión e intensidad, tanto en el estático como en el rotor (máquina de rotor bobinado). De esta forma pueden detectarse visualmente las características del funcionamiento de las MI. El programa de simulación numérica que desarrollan los alumnos que la realizan permite ilustrar el funcionamiento de la máquina en condiciones difíciles de observar en el laboratorio, así como estudiar rápidamente una gran cantidad de casos diferentes. La representación gráfica de los resultados permite dar más sentido a las ecuaciones, ofreciendo una visión global de las características de funcionamiento de la máquina. El programa de simulación, además, añade un componente de entusiasmo e interés por el trabajo a realizar, ya que introduce otro elemento de «trabajo práctico-real» en el aula, sobre todo cuando el trabajo computacional se coordina con el de laboratorio.

REFERENCIAS

- E. BIM, J. SZAJNER, Y. BURIAN, «Voltage Compensation of an Inductive Generator with Long-Shunt Connector

- Ieee Transactions on Energy Conversion*, Vol. 4, No. 3, September 1989, pp. 526-530.
- M. BURGOS, M. CASAL y C. IZQUIERDO, «Mejora de una Práctica sobre Máquinas de Inducción Utilizando un Ordenador», *Revista de enseñanza Universitaria*, No. 5, 1994, pp. 57-67.
- S. CHAPMAN, *Electric Machinery Fundamentals*, McGRAW-HILL, New York, 1985.
- M. CORTES, *Curso Moderno de Máquinas Eléctricas Rotativas (Tomo III)*, Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1974.
- M.L. HEIMER, «Outlook for the Use of Computer Simulations in Electrical Engineering Education», *Engineering Education 2000, 1990 Frontiers in Education Conference Proceedings*, Viena, July 2-4, 1990, pp. 516-518.
- N.H. MALIK, S.E. HAKE, «Steady State Analysis of an Isolated Self-Excited Induction Generator» *Ieee Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-1, No. 3, September 1986, pp. 134-140.
- A. MATA, *Turbo C/C++, Iniciación y Programación Avanzada*, Paraninfo, Madrid, 1992.
- L. OUAZENE y G. McPHERSON, «Analysis of The Isolated Induction Generator», *Ieee Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 8, August 1983, pp. 2793-2798.
- M.A. SLONIM y A. RUBIN, «An Educational Laboratory Experiment for the Asynchronous Generator», *International Conference on Electrical Machines*, Cambridge (Massachusetts), August 13-15, 1990, pp. 287-291.
- H.A. SMOLLECK, «Modeling and Analysis of the Induction Machine: A Computational-Experimental Approach», *Ieee Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 2, May 1990, pp. 482-485.