



del 21 al 25 de noviembre de 2016
**18 CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA

52
ANIVERSARIO
cujae

LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN COMO VARIADOR DE FRECUENCIA EN LOS LABORATORIOS DE DOCENCIA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

J. Jiménez-González¹, I. López-García¹, E. Campero-Littlewood¹, H. A. Canseco-García¹, J. C. Olivares-Galván¹ y F. J. González-Montañez¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo #180, Col. Reynosa Tamaulipas, México, Ciudad de México.

¹e-mail: joseph31.ja@gmail.com

RESUMEN

La máquina de inducción funcionando como generador ha alcanzado, en los últimos años, una popularidad importante debido a su uso en sistemas de generación eólicos. Sin embargo, en los cursos tradicionales de ingeniería, el estudio de la máquina de inducción se centra primordialmente en su funcionamiento como motor. Resulta importante que los estudiantes de Ingeniería Eléctrica se familiaricen con los principios de operación de la máquina de inducción funcionando como generador y puedan así comprender mejor los conceptos enfocados al estudio de la generación eólica. En este trabajo se presenta el resultado de las pruebas, llevadas a cabo en la Unidad Azcapotzalco de la Universidad Autónoma Metropolitana, donde se comprueba el funcionamiento de una máquina de inducción con rotor devanado como variador de frecuencia, que puede utilizarse como un control de voltaje en generadores o un control de velocidad en motores. También se presenta una manera amigable de entender el flujo de potencia activa y reactiva en los sistemas de generación eólicos.

PALABRAS CLAVES: Generador de inducción, generador asíncrono, generador de inducción doblemente alimentado, energía eólica, sistemas de generación eólicos.

ABSTRACT

The operation of the induction machine as a generator has reached, in recent years, a significant popularity due to its use in wind energy conversion systems. However, in engineering traditional courses, the study of the induction machine is focused primarily on its operation as a motor. It is very important that the students of electrical engineering get more familiarized with the operation of the induction machine as a generator and can have a better understanding of the principles related to wind energy generation systems. This work presents the results of the laboratory test, performed at Universidad Autónoma Metropolitana, where the operation of a wound rotor induction machine as a frequency changer is tested and proved that it can be used as voltage control in generators or speed control in motors. The article also includes a friendly way to understand the active and reactive power flow in wind energy conversion systems.

KEY WORDS: Induction generator, asynchronous generator, doubly-fed induction generator, wind energy, wind energy conversion systems.

1. INTRODUCCIÓN

Desde su creación, el motor de inducción ha sido la máquina eléctrica rotatoria más empleada a nivel industrial y en aplicaciones domésticas. Su uso como motor es tan popular que en países desarrollados es responsable del 70% del consumo de energía eléctrica[1]. En años recientes ha habido una tendencia a operar a la máquina de

SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE GENERACIÓN DISTRIBUIDA



Palacio de la Convenciones, La Habana, Cuba
Del 21 al 25 de noviembre de 2016



del 21 al 25 de noviembre de 2016
**18 CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA

52
ANIVERSARIO
cujae

inducción como generador en sistemas de generación eólicos (SGE). Para poder analizar estos sistemas es necesario comprender el funcionamiento de la máquina de inducción como generador, sin embargo, los cursos tradicionales de máquinas eléctricas no lo incluyen como parte de sus objetivos o lo hacen de manera muy superficial[2].

El control de SGE es una prioridad en el desarrollo de energías alternativas debido a que la fuente principal de potencia es de naturaleza aleatoria, impactando directamente la potencia que se puede generar y la velocidad a la que puede girar la flecha y el impacto que esto tiene en la frecuencia del voltaje generado. La manera de superar este problema es utilizando una máquina de inducción de rotor devanado (MIRD) o doblemente alimentada (MIDA), acompañada de un control de electrónica de potencia, de manera que se pueda despachar potencia desde el estator y desde el rotor de la máquina con los valores de voltaje y frecuencia que impone la red eléctrica[3, 4].

Este trabajo presenta un análisis de una MIDA operando a diferentes velocidades acompañado de pruebas de laboratorio en las que se puede ver la variación de la frecuencia en función de la velocidad mecánica aplicada.

2. GENERADOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO

Un generador de inducción de rotor devanado, a diferencia del popular motor tipo jaula de ardilla (MIJA), tiene un rotor devanado similar al del estator. Las terminales de los devanados del rotor están conectadas a anillos deslizantes en la flecha del rotor. En su uso como motor, los anillos deslizantes pueden conectarse en serie con resistencias de arranque utilizando escobillas, para tener un control sobre el par y la corriente. Para su operación como generador, el rotor devanado permite la generación de un campo magnético que excita al estator y logra la presencia de voltaje en las fases del estator. Para poder comprender el funcionamiento de la máquina como generador se debe partir del fenómeno de deslizamiento.

Deslizamiento en una máquina de inducción

El funcionamiento de una máquina de inducción trifásica como motor parte de la alimentación de voltajes trifásicos balanceados en los devanados del estator, que están distribuidos y separados espacialmente 120° entre sí. Esto genera un campo magnético rotatorio que gira a una velocidad que se denomina velocidad síncrona ω_s (radianes por segundo), la cual depende del número de polos de la máquina y de la frecuencia de los voltajes aplicados. Al producirse un flujo magnético en la máquina se genera una fuerza magnetomotriz fmm . En un MIJA, este campo induce corrientes en el devanado tipo jaula de ardilla del rotor, que a su vez genera una fmm . La interacción de las fmm de estator y rotor genera un par electromagnético y hace que el rotor gire en la misma dirección que el campo magnético aunque siempre a una velocidad menor que la fmm del estator [2, 5], esto significa que hay un movimiento relativo entre el devanado del rotor y la fmm que permite mantener la inducción del campo magnético en el rotor. La diferencia entre la velocidad de giro del campo magnético (velocidad síncrona) y la velocidad del rotor es conocida como *deslizamiento*, el cual se suele definir como una fracción de la velocidad síncrona y se denota con la letra s .

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1)$$

donde ω_r es la velocidad del rotor. En un motor de inducción, el deslizamiento varía entre 0 y 1. Cuando el deslizamiento es igual a 0, la velocidad mecánica y la síncrona son iguales; bajo estas condiciones no puede haber inducción en los devanados del rotor, debido a que estos *verían* un campo magnético estacionario. En condiciones de vacío, el deslizamiento de un motor se aproxima a cero. El deslizamiento es 1 cuando la velocidad mecánica es igual a cero, que es la condición de arranque de un motor[2].

SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE GENERACIÓN DISTRIBUIDA



Palacio de la Convenciones, La Habana, Cuba
Del 21 al 25 de noviembre de 2016



del 21 al 25 de noviembre de 2016
18 CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA

52
ANIVERSARIO
cujae

Principio de funcionamiento de un generador de inducción

Si se alimenta al estator de una máquina de inducción con voltajes trifásicos y se hace girar al rotor a la velocidad síncrona con una fuente mecánica externa o primomotor, la máquina no consume potencia activa de la red que alimenta al estator y al no haber movimiento relativo entre la f_{mm} del estator y el rotor no se induce un campo en el rotor y tampoco circula corriente por sus devanados. Si se incrementa la velocidad del primomotor por encima de la velocidad síncrona, se tendrán corrientes en el rotor cuya frecuencia irá aumentando conforme crece la velocidad del primomotor. Bajo estas condiciones se dice que la máquina está operando como generador, en condiciones *supersíncronas*, y con un deslizamiento negativo, como se puede ver en (1) con $\omega > \omega_s$. La frecuencia de los voltajes o corrientes inducidos en el rotor f_r están dados por:

$$f_r = s f_s \quad (2)$$

donde f_s es la frecuencia de los voltajes aplicados en el estator.

Para que una MIRD pueda comportarse como generador basta con alimentar los devanados del estator. El rotor no girará mientras los devanados no se encuentren cortocircuitados, como en el caso del MIJA, o conectados a resistencias externas. Cuando el rotor no está girando se tiene $s = 1$, y la frecuencia de los voltajes medidos en el rotor es igual a la frecuencia de los voltajes del estator. Si se hace girar el rotor de la MIRD con un primomotor, existirá una diferencia de velocidades y por lo tanto un deslizamiento; la frecuencia f_r comenzará a disminuir hasta llegar a cero cuando $s = 0$ ($\omega_s = \omega_r$). Se puede comprobar entonces, que para que exista inducción en los devanados del rotor, la velocidad del rotor debe ser distinta a la velocidad síncrona cuando el giro de la f_{mm} del estator y la rotación del rotor son en el mismo sentido. Si se incrementa la velocidad del primomotor por encima de la velocidad síncrona, una vez más se podrán medir voltajes en el rotor de la máquina y en este caso el deslizamiento será negativo. Es importante resaltar el hecho de que a diferencia de una máquina de inducción jaula de ardilla, la MIRD es *siempre* generador, ya que se tienen voltajes disponibles en las terminales del rotor cuya frecuencia depende de la velocidad mecánica que se le aplique al rotor y de esta manera se puede describir al generador de inducción de rotor devanado (GIRD) como un *variador de frecuencia*.

Influencia del sentido de giro

Para obtener deslizamientos superiores a 1, el rotor debe “girar al contrario”, es decir, el campo magnético rotatorio y el rotor del GIRD deben girar en direcciones opuestas. Al hacer esto, la velocidad relativa entre el campo y el rotor va aumentando, de tal suerte que la expresión del deslizamiento se puede reescribir como

$$s = \frac{\omega_s - (-\omega_r)}{\omega_s} = \frac{\omega_s + \omega_r}{\omega_s} \quad (3)$$

De esta manera, podemos tener en los anillos deslizantes voltajes con frecuencias siempre mayores a la frecuencia de la fuente de alimentación.

Bajo estas condiciones, la fuente de voltaje se encarga de determinar la velocidad síncrona y de proporcionar la potencia reactiva necesaria para generar el campo magnético del entrehierro [2, 5]. En un SGE, el estator está conectado directamente a la red eléctrica y la potencia extraída del viento es la encargada de hacer girar la turbina que a su vez está acoplada al rotor del GIRD. Es claro que, en condiciones reales, la turbina puede girar a velocidades mayores, menores o iguales a la velocidad síncrona, y por tanto generar voltajes de frecuencias

SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE GENERACIÓN DISTRIBUIDA



Palacio de la Convenciones, La Habana, Cuba
Del 21 al 25 de noviembre de 2016



mayores, menores o iguales a la de la red eléctrica; por esta razón es importante recurrir a la electrónica de potencia para regular la magnitud y la frecuencia de los voltajes que se entregan a la red.

Generador de inducción con alimentación en el rotor

Una característica de las máquinas de inducción de rotor devanado es su versatilidad ya que pueden funcionar como motor o como generador y en este trabajo se propone su uso como variador de frecuencia. Entonces se plantea la opción de alimentar el rotor del GIRD con voltajes trifásicos para que se genere un campo y que el estator sea el inducido. En los párrafos anteriores se describe el comportamiento convencional de un GIRD y se define el deslizamiento como la velocidad relativa entre el rotor y el campo. Sin embargo, en este trabajo se utiliza el GIRD de manera distinta. La definición del deslizamiento se modifica y ahora se refiere a la velocidad relativa entre estator y el campo magnético rotatorio generado en el rotor, el cual inducirá un voltaje en el estator. Sin embargo, no existirá un campo generado por el estator mientras sus terminales se encuentren abiertas. Si el voltaje aplicado a las terminales del rotor tiene una frecuencia fija, entonces las corrientes que circulen en el rotor determinarán la velocidad síncrona del campo rotatorio, a la que denominaremos ω_{sr} , donde el subíndice sr indica que se trata de la velocidad síncrona de la fmm generada por el rotor, vista desde el rotor. Debido a que el campo de referencia está girando y está superpuesto en un elemento móvil, la expresión para el deslizamiento en este caso es

$$s_{er} = \frac{\omega_{sr} + \omega_r}{\omega_{sr}} \quad (4)$$

donde el subíndice er indica que es un deslizamiento entre el estator y el campo del rotor. La diferencia más importante entre (1) y (4) es que el campo que genera la velocidad síncrona está girando sobre el rotor, por lo que el campo del rotor visto desde el estator tiene una velocidad de $\omega_{sr} + \omega_r$, de manera que si ambos campos giran en la misma dirección siempre se tendrá un $s_{er} > 1$, contrario a lo que se indica en (1). Para lograr deslizamientos menores entre -1 y 1, el campo magnético generado por el rotor debe girar en sentido contrario al sentido de giro del rotor. De esta manera, la frecuencia de los voltajes inducidos en el estator debido al campo giratorio en el rotor está dada por

$$f_s = s_{er} f_r \quad (5)$$

3. ARREGLO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS

En esta sección se describen las pruebas realizadas que muestran algunos ejemplos de cómo se pueden generar voltajes de distintas frecuencias con equipo fundamental de los laboratorios de Ingeniería Eléctrica. El material utilizado se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Material necesario para realizar las pruebas

Cantidad	Material
1	Máquina de CD
1	Máquina de inducción de rotor devanado
1	Máquina de inducción jaula de ardilla
1	Tacómetro
1	Fuente de CD variable
1	Fuente de CA variable
30	Cables de conexión



3	Vóltmetro
7	Ampérmetro
1	Osciloscopio

Las pruebas se realizaron utilizando una máquina de CD con conexión *shunt* como primomotor. Esta se acopló mecánicamente al rotor de un GIRD. La velocidad del sistema se midió con un tacómetro en la flecha de cualquiera de las dos máquinas. Se midieron las corrientes de línea en todos los devanados, así como la corriente del devanado de campo de la máquina de CD. Se midió el voltaje generado en las terminales del rotor del GIRD y se compararon las ondas de voltaje del estator y rotor con un osciloscopio. El diagrama de conexiones se muestra en la Figura 1.

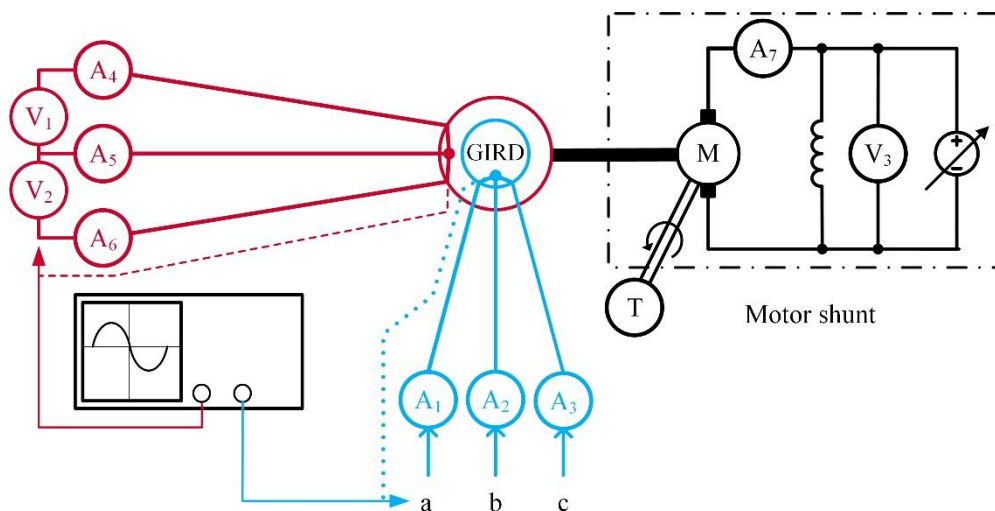


Figura 1. Diagrama de conexiones para las pruebas.

En las cuatro pruebas que se realizaron los devanados del rotor del GIRD se alimentaron con un voltaje rms de 60 V por fase a 60 Hz y se hizo girar el rotor con la máquina de CD a distintas velocidades. En la primera prueba, se hizo girar al rotor de la máquina de inducción a velocidades *subsíncronas* en sentido contrario al sentido de giro del campo presente en el rotor; en la segunda prueba se utilizaron velocidades *supersíncronas*; en la tercera prueba se invirtió el sentido de giro del campo del GIRD de tal manera que girara en el mismo sentido que el rotor, alcanzándose deslizamientos mayores a 1; en la última prueba se conectó un MIJA a las terminales del estator del GIRD y se varió su velocidad a través de la velocidad del motor de CD.

Prueba 1: Campo en sentido contrario al rotor, velocidades subsíncronas

La máquina de inducción es de 4 polos, por lo que su velocidad síncrona es de 1800 rpm. La dirección de giro del campo para la secuencia de fases utilizada pudo detectarse cortocircuitando los devanados del rotor para que la máquina funcionara como motor.

Se alimentó el rotor del GIRD a su voltaje nominal de 104/60 V a 60 Hz y el rotor se mantuvo bloqueado. Con los voltímetros 1 y 2 se midió el voltaje inducido en el estator, cuyo valor rms resultó de aproximadamente 120



Vpor fase, este valor es el esperado porque los devanados del estator y el rotor tienen una relación 2:1; con el osciloscopio se midió la frecuencia del voltaje inducido en el estator, la cual resultó ser de 60 Hz debido a que el rotor no estaba girando. Esto concuerda con (4).

Se alimentó la máquina de CD incrementando gradualmente su voltaje. Debido al par aproximadamente constante que proporciona la conexión utilizada, la menor velocidad que se pudo lograr del sistema de máquinas acopladas fue de 1150 rpm. Al hacer girar la máquina de CD en el sentido de giro contrario al del campo del GIRD, la frecuencia y magnitud de los voltajes empezaron a disminuir. Esto se puede interpretar como una turbina acoplada al GIRD que comienza a girar a una velocidad pequeña. Se incrementó la velocidad de la máquina de CD en intervalos de aproximadamente 100 rpm y se registraron los valores de voltaje inducido en el estator, y sus respectivas frecuencias los cuales están reportados en la Tabla 2, donde también se muestra el deslizamiento s_{er} calculado para cada velocidad medida. En la Tabla 2 puede observarse como tiende a cero el voltaje inducido cuando la velocidad de giro del rotor se acerca a la velocidad síncrona. El voltaje inducido es proporcional a la tasa de cambio del flujo magnético, al girar el rotor a distintas velocidades se inducen distintos niveles de voltaje. Esta es una de las razones por las que se requiere una etapa de electrónica de potencia en los SGE reales, para mantener un voltaje en terminales siempre constante.

Tabla 2. Resultados de la prueba 1.

Velocidad n_r [rpm]	Frecuencia de voltajes en estator f_s [Hz]	Voltaje inducido en el estator V_s [V]	Deslizamiento s_{er}
0	60.0	115.0	1.00
1150	21.1	40.0	0.36
1203	19.9	37.4	0.33
1300	16.4	30.0	0.28
1400	12.8	24.0	0.22
1504	9.7	18.5	0.16
1610	5.0	14.1	0.11
1717	2.5	9.2	0.05
1800	0.0	7.1	0.00

Los resultados mostrados son muy consistentes con lo que se esperaba, considerando la definición del deslizamiento entre el campo generado por el rotor y el estator s_{er} . La Tabla 3 muestra la comparación entre la frecuencia medida y la frecuencia calculada f'_s .

Tabla 3. Comparación entre la frecuencia medida y la frecuencia esperada en la prueba 1.

Frecuencia medida f_s [Hz]	Frecuencia esperada f'_s [Hz]	Error porcentual.
60.0	60.0	0.0
21.1	21.7	-2.6
19.9	19.9	0.0
16.4	16.7	-1.6
12.8	13.3	-3.8
9.7	9.9	-1.7



5.0	6.3	-21.1
2.5	2.8	-9.6
0.0	0.0	0.0

Prueba 2: Campo en sentido contrario al rotor, velocidades supersíncronas

Al girar la turbina (máquina de CD) a velocidades mayores a la velocidad síncrona vuelve a tenerse inducción en el rotor. Los valores de deslizamiento varían entre 0 y -1 y los voltajes registrados coinciden aproximadamente con los de la Prueba 1, ya que la velocidad relativa es prácticamente la misma. Estos resultados y el error en la frecuencia se muestran en las Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4. Resultados de la prueba 2.

Velocidad n_r [rpm]	Frecuencia de voltajes en estator f_s [Hz]	Voltaje inducido en el estator V_s [V]	Deslizamiento s_{er}
1901	4.0	9.0	-0.06
2002	6.9	13.7	-0.11
2103	10.5	10.3	-0.17
2202	14.7	25.5	-0.22
2302	17.6	34.1	-0.28
2402	20.6	39.5	-0.33
2501	24.0	45.9	-0.39
2608	26.9	51.6	-0.45

Tabla 5. Comparación entre la frecuencia medida y la frecuencia esperada en la prueba 2.

Frecuencia medida f_s [Hz]	Frecuencia esperada f'_s [Hz]	Error porcentual.
4.0	-3.4	18.8
6.9	-6.7	1.7
10.5	-10.1	4.0
14.7	-13.4	9.7
17.6	-16.7	5.2
20.6	-20.1	2.4
24.0	-23.4	2.5
26.9	-26.9	-0.3

Prueba 3: Campo y rotor girando en el mismo sentido

Se partió nuevamente de alimentar el rotor del GIRD con voltaje y frecuencia nominal. En esta prueba, se intercambiaron dos de las fases que alimentaban al GIRD para cambiar la dirección de giro del campo, de tal manera que el giro del rotor estuviera en el mismo sentido que el del campo. Como se mencionó anteriormente, con estas condiciones obtenemos deslizamientos mayores a 1, por lo que los voltajes del estator pueden ser defrecuencias mayores a 60 Hz. Estos resultados se reportan en las Tabla 6 y 7. En las mediciones



correspondientes a la velocidad síncrona se ve que se tiene un deslizamiento de 2 y una frecuencia de 120 Hz, el doble de la frecuencia nominal, acorde con (4) y (5).

Tabla 6. Resultados de la prueba 3.

Velocidad n_r [rpm]	Frecuencia de voltajes en estator f_s [Hz]	Voltaje inducido en el estator V_s [V]	Deslizamiento s_{er}
0	60.0	112.6	1.00
1003	94.5	173.2	1.56
1251	101.6	188.8	1.70
1502	110.4	204.4	1.83
1752	118.8	220.0	1.97
1804	121.1	225.2	2.00
2011	130.2	240.8	2.12
2250	137.7	247.7	2.25

Tabla 7. Comparación entre la frecuencia medida y la frecuencia esperada en la prueba 3.

Frecuencia medida f_s [Hz]	Frecuencia esperada f'_s [Hz]	Error porcentual.
60.0	60.0	0.0
94.5	93.4	1.1
101.6	101.7	-0.1
110.4	110.1	0.3
118.8	118.4	0.3
121.1	120.1	0.8
130.2	127.0	2.5
137.7	135.0	2.0

Prueba 4: Voltaje del GIRD con carga

Un ejemplo muy ilustrativo de cómo influye el deslizamiento es conectando a los devanados del estator del GIRD a un motor jaula de ardilla. Se hizo girar al rotor a diferentes velocidades, que indujeron voltajes de distintas frecuencias en el estator, que se utilizaron alimentar al MIJA y lograr que operara a distintas velocidades. El motor utilizado también es de 4 polos, 60 Hz, por lo que en condiciones nominales su velocidad síncrona es de 1800 rpm.

Inicialmente, se alimentó el GIRD con el campo inducido en el rotor y el rotor girando en sentidos contrarios, para poder tener deslizamientos entre -1 y 1. De esta manera las frecuencias de los voltajes inducidos en el estator del GIRD son siempre menores que 60 Hz, por lo que el MIJA giró a una velocidad mucho menor que la velocidad síncrona. Cuando el deslizamiento es negativo, según (5), la frecuencia de los voltajes inducidos es negativa. Esto implica un cambio de signo en la velocidad angular de las ondas de voltaje $\omega = 2\pi f_s$, lo que resulta en un cambio en la secuencia de fases de los voltajes. Este efecto se ve claramente en el experimento realizado, ya que al llevar al primomotor a velocidades superiores a la velocidad síncrona el MIJA comenzó a



girar nuevamente, a una velocidad acorde a la frecuencia de los voltajes inducidos, pero ahora en diferente sentido.

Finalmente, se invirtió la secuencia de fases de los voltajes que alimentan al rotor del GIRD para obtener deslizamientos superiores a 1. Como ya se explicó previamente, esto induce voltajes de frecuencias superiores a 60 Hz en el estator, con los que se logró llevar al MIJA a velocidades superiores a la velocidad síncrona. Estos resultados se muestran sombreados en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de la prueba 4. La velocidad del motor jaula de ardilla es n_{ja} .

Velocidad n_r [rpm]	Velocidad del motor jaula de ardilla n_{ja} [rpm]	Frecuencia de voltajes en estator f_s [Hz]	Deslizamiento s_{er}
1005*	781	26.6	0.44
1200*	580	19.8	0.33
1400*	382	13.3	0.22
1601*	180	6.6	0.11
1808*	0	0.1	0.00
2002*	196	6.6	-0.11
2201*	390	13.4	-0.22
2402*	538	20.1	-0.33
1009**	2717	94.2	1.56
1201**	2992	94.2	93.6

* Campo inducido en el rotor y rotor giran en sentidos contrarios

** Campo inducido en el rotor y rotor giran en el mismo sentido

Tabla 9. Comparación entre la velocidad del motor medida y la esperada en la prueba 4.

Velocidad medida n_{ja} [rpm]	Velocidad esperada n'_{ja} [rpm]	Error porcentual.
781.1	796.8	-2.0
580.7	594.0	-2.2
382.3	399.9	-4.4
180.4	198.0	-8.9
0.0	0.0	0.0
196.0	198.0	-1.0
390.3	401.1	-2.7
538.5	603.0	-10.7
2717.2	2824.8	-3.8
2992.4	3000.0	-0.3

4. CONCLUSIONES

Con las pruebas realizadas se logra demostrar, de una manera muy visual, un fenómeno que en nuestra experiencia resulta confuso para los estudiantes de ingeniería eléctrica. Se logra ver la influencia de la velocidad mecánica en los voltajes generados en el rotor de un GIRD, lo que facilita la comprensión de su



del 21 al 25 de noviembre de 2016
18 CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA

52
ANIVERSARIO
cujae

funcionamiento en sistemas de generación eólicos. Durante las pruebas realizadas, se tuvo mucha precaución, los voltajes generados en ocasiones son de una magnitud mayor a la nominal, por lo que los instrumentos de medición, principalmente el osciloscopio, debían estar aislados correctamente. La prueba con carga resulta bastante interesante, sin embargo, al conectar la carga, que en este caso fue un motor jaula de ardilla, aparece una f_{mm} en el estator del generador que interactúa con la del rotor. Si se permite que la corriente en el estator o rotor crezca demasiado sin incrementar el par mecánico proporcionado, el generador se puede motorizar y la máquina de cd puede también actuar como generador y en el peor de los casos puede dañar la fuente de alimentación. Además, en las pruebas con velocidad supersíncrona, el acoplamiento de las dos máquinas y la jaula de ardilla pueden alcanzar niveles de vibración importantes. Se recomienda invertir suficiente tiempo en revisar que todos los componentes se encuentren en buen estado, verificar las conexiones realizadas y las escalas de los instrumentos. Asimismo es importante asegurarse de que todo el equipo giratorio sea asegurado mecánicamente a la mesa de trabajo para evitar problemas por vibración. En general, estas pruebas son bastante ilustrativas y si se realizan con el cuidado adecuado permiten entender el flujo de potencia activa y reactiva presentes en los SGE, dando una herramienta bastante útil en la enseñanza de los generadores asíncronos, los cuales han cobrado gran importancia en años recientes y que todo ingeniero interesado en energías alternativas debería conocer.

5. REFERENCIAS

- [1] D. Aragón, R. Escarela, J. Olivares, J. Hernandez, V. Jimenez y F. Gonzalez, «Análisis de una máquina de inducción en el dominio de la frecuencia usando el método de elementos finitos para determinar su desempeño con carga,» *Revista Aplicaciones de la Ingeniería*, pp. 187-196, 1015.
- [2] S. D. Umans, Fitzgerald and Kingsley's Electric Machinery, McGraw-Hill Higher Education, 2013.
- [3] N. Patin, E. Monmasson y J. P. Louis, «Modeling and control of a cascaded doubly fed induction generator dedicated to isolated grids,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 4207-4219, 2009.
- [4] N. Patin, E. Monmasson y J. P. Louis, «Modeling and control of a cascaded doubly-fed induction generator based on dynamical equivalent circuits,» *Mathematics and Computers in Simulation*, pp. 225-238, 2010.
- [5] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff y S. Pekarek, Analysis of electric machinery and drive systems, John Wiley & Sons, 2013.
- [6] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, Pearson Educación, 2003.