

Generador de Inducción Autónomo Alimentando Cargas no Lineales y Desequilibradas

Aldo J. Benitez^{†1}, Fernando Botterón^{†2} and Guillermo García^{*3}

[†]*Grupo de Investigación y Desarrollo en Ing. Electrónica (GID-IE), Facultad de Ingeniería, UNaM
Oberá Misiones Argentina*

¹javierbenitez@fio.unam.edu.ar

²botteron@fio.unam.edu.ar

^{*}*Grupo de Electrónica Aplicada (GEA), Facultad de Ingeniería, UNRC.*

Río Cuarto Argentina

³g.garcia@ieee.org

Abstract—Is propose an excitation system for autonomous induction generators that feeds non-linear and unbalanced loads. The generator is composed of an induction machine (IM) of the squirrel cage type, the excitation system has a capacitor bank and a four-wire converter connected in parallel with the IM. The control algorithm of the excitation system is based on the Instantaneous Reactive Power theory, which allows the converter to inject the reactive power required for the excitation and voltage regulation of the IM; also it allows to compensate the harmonics and imbalances introduced by the loads. In this way, the voltages and currents that circulate through the IM will be sinusoidal and balanced, reducing losses and torque oscillations, increasing the performance and useful life of the generation system. Simulation results are presented that demonstrate the viability of the proposal.

Resumen— En este trabajo se propone un sistema de excitación para generadores de inducción autónomos que alimenta cargas no lineales y desequilibradas. El generador está compuesto por una máquina de inducción (MI) del tipo jaula de ardilla, el sistema de excitación posee un banco de capacitores y un convertidor de cuatro hilos conectados en paralelo con la MI. Como algoritmo de control del sistema de excitación se propone utilizar la teoría de la Potencia Reactiva Instantánea, la cual permite que el convertidor inyecte la potencia reactiva requerida para la excitación y regulación de tensión de la MI; además permite compensar los armónicos y desequilibrios introducidos por las cargas. De esta manera las tensiones y corrientes que circulan por la MI serán sinusoidales y equilibradas, disminuyendo las pérdidas y las oscilaciones de torque, aumentando el rendimiento y vida útil del sistema de generación. Se presentan resultados de simulación que demuestran la viabilidad de la propuesta.

I. INTRODUCCIÓN

La conversión de todas las energías primarias en energía eléctrica, a excepción de la energía fotovoltaica, requieren de la existencia de máquinas eléctricas rotativas [1]–[3].

En lugares remotos, donde no hay acceso a las redes eléctricas convencionales ni a servicios técnicos especializados para realizar mantenimiento y/o reparaciones, es imprescindible contar con sistemas de generación autónomos robustos y de bajo mantenimiento [4], [5].

Un sistema de generación con las características mencionadas, a su vez debe incluir una máquina eléctrica rotativa que sea robusta y de bajo mantenimiento. Una máquina que satisfice las citadas especificaciones es la máquina de inducción (MI) del tipo jaula de ardilla [6]–[8]. La MI es la

más utilizada en la industria, la más robusta, la que necesita menor mantenimiento y es la de menor costo. Puede operar como generador autónomo, aunque para ello necesita un sistema de excitación.

Existen varias propuestas para excitar a una MI que pueden variar según el tipo de carga a alimentar. Estas van desde conectar a sus bornes un banco de capacitores en paralelo con la carga, la manera más sencilla, hasta otras más complejas que utilizan convertidores electrónicos de potencia o una combinación de ambas [9].

En regiones aisladas de las redes eléctricas convencionales, generalmente se utilizan cargas monofásicas, que a su vez pueden ser no lineales, por lo tanto los sistemas de generación trifásicos de cuatro hilos son una buena alternativa en estos lugares.

Las cargas monofásicas y no lineales pueden introducir desequilibrio y armónicos en las corrientes de la MI, estas corrientes distorsionadas acarrear serios inconvenientes a la MI tales como: excesiva saturación del flujo magnético, calentamiento desigual en los bobinados y torque pulsante, dando lugar a vibraciones mecánicas y ruidos acústicos [10]–[12]. Los fenómenos o factores mencionados, disminuyen el rendimiento global y la vida útil del sistema de generación [13]–[15].

Existen varios trabajos que proponen sistemas de excitación para generadores de inducción (GI), que además de regular tensión permiten compensar armónicos y desequilibrio de cargas, con el objetivo de reducir los inconvenientes mencionados.

En [16] se propone un esquema de regulación de tensión para GI trifásicos, que esta compuesto por una MI trifásica acoplada a un impulsor primario de velocidad constante, un banco de capacitores de autoexcitación y un convertidor trifásico de tres piernas conectado en paralelo a la MI. El sistema permite mantener las corrientes y tensiones de la MI sinusoidales, alimentando cargas de tres hilos lineales y no lineales, equilibradas y desequilibradas entre fases. La estrategia de control de tensión y compensación se basa en inyectar corrientes en fase y en cuadratura con la tensión generada por la MI.

En [17] se propone una estrategia de regulación de tensión y frecuencia para GI autónomos para aplicaciones de energía eólica. El sistema utiliza una topología compuesta por una

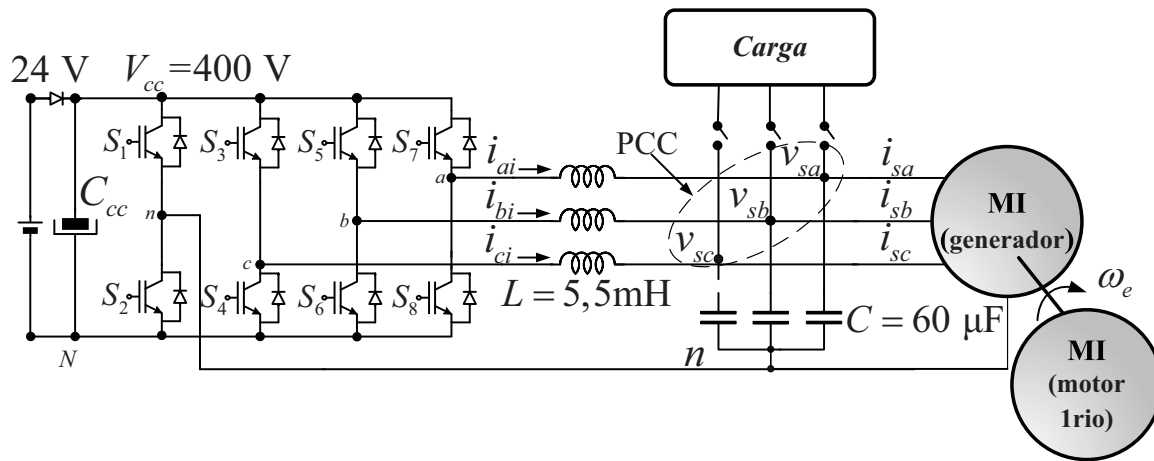


Fig. 1. Sistema propuesto

turbina eólica, una caja multiplicadora, una MI, un banco de capacitores de autoexcitación y un inversor trifásico de tres piernas en paralelo con la MI. Este sistema permite alimentar cargas de tres hilos, lineales y no lineales, equilibradas y desequilibradas entre fases, manteniendo sinusoidales las corrientes y tensiones de la MI. La estrategia de control y compensación está basada en el producto de la tensión del GI y de la corriente de carga de secuencia positiva.

En [18] se propone un GI con convertidor paralelo que permite alimentar cargas monofásicas no lineales, se compensan los armónicos y se muestran resultados experimentales. En este sistema el generador y el convertidor son trifásicos y alimentan cargas monofásicas, las que se conectan entre dos fases de la MI, donde la tercera fase se conecta al convertidor.

En [19], [20] se propone un generador de inducción autónomo basado en una topología híbrida con regulación de voltaje y frecuencia. Se utiliza una MI conectada en paralelo con un banco de capacitores conmutados y un convertidor de cuatro hilos. La regulación de voltaje se logra mediante dos lazos de control en coordenadas síncronas $d-q$ y la conexión en forma discreta de los capacitores a medida que varía la carga, lo que permite reducir el tamaño y potencia del convertidor. También se realiza un control de corriente del convertidor basado en un compensador PI para compensar el desequilibrio de cargas. Se utiliza un método de sincronización con la tensión del PCC basado en un filtro de Kalman y la frecuencia se regula controlando una carga balasto conectada al PCC. Se presentan resultados experimentales donde pueden observarse transitorios ocasionados por la conmutación del banco de capacitores.

Existen trabajos donde se propone utilizar la teoría de Potencia Reactiva Instantánea o teoría $p-q$ [21], [22], para controlar a los GI. En [23]–[25] se proponen sistemas de generación trifásicos, aplicando la citada teoría. Pero estas propuestas solo permiten alimentar cargas trifásicas equilibradas, quedando fuera del campo de aplicación las cargas monofásicas.

En este trabajo se propone un sistema de generación trifásico de cuatro hilos que permite alimentar cargas monofásicas y trifásicas, lineales y no lineales, equilibradas y desequilibradas, manteniendo las corrientes sinusoidales y

equilibradas en la MI. Se propone aplicar la teoría $p-q$ para el algoritmo de control implementado, el cual permite regular las tensiones del PCC y de la barra de CC mientras se compensan los armónicos y el desequilibrio producidos por las cargas.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se describe el sistema propuesto, el algoritmo de excitación y compensación. En la Sección III se muestran los resultados de simulación y finalmente en la Sección IV se presentan las conclusiones del trabajo.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

En la Fig. 1 se ha representado un diagrama del sistema de generación propuesto. Este está compuesto por un impulsor primario que impone una velocidad externa (ω_e), por ejemplo una turbina eólica, hidráulica, a biogas, acoplada a una máquina de inducción tipo jaula de ardilla, que tiene conectado en paralelo un banco de capacitores y una fuente controlada de corriente, ambos contribuyen a su excitación inyectando corrientes en el PCC.

Se utiliza un sensor de posición para medir la posición del rotor y calcular la velocidad (ω_e) durante el arranque.

La fuente de corriente controlada está compuesta por un inversor trifásico fuente de tensión con un lazo interno de control de corrientes, cuyas referencias son calculadas mediante la teoría $p-q$.

En el PCC también se conectan las cargas que pueden ser monofásicas y trifásicas, lineales y no lineales.

A. Algoritmo de excitación y compensación

Se puede observar en la Fig. 2 el diagrama que representa al algoritmo de excitación y compensación, basado en la teoría $p-q$.

Al algoritmo ingresan todas las señales medidas, corrientes, tensiones y posición del rotor, luego se transforman al referencial $dq0$, sincrónico con la secuencia positiva de las tensiones generadas por el GI [26]. Dichas señales son utilizadas para calcular las referencias de la fuente de corriente controlada, i_{dq0}^* , con el objetivo de excitar a la MI, regular tensión, compensar armónicos y desequilibrios introducidos por las cargas.

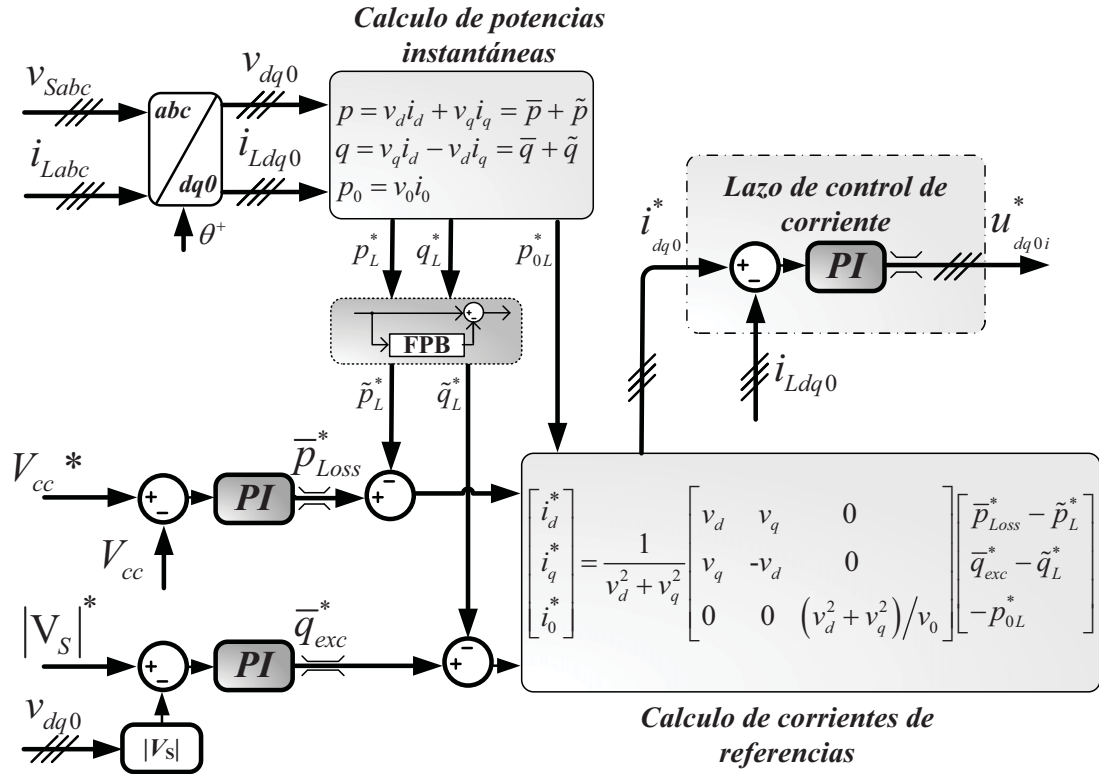


Fig. 2. Algoritmo de excitación y compensación propuesto

Las referencias de la fuente de corriente i_{dq0}^* provienen de,

- el bloque de cálculo de las potencias instantáneas de la carga, p_L^* , q_L^* y p_{0L}^* (1-3);
- el lazo de regulación de la tensión de la barra de CC del convertidor, referencia V_{cc}^* ;
- el lazo de regulación de la tensión del GI, referencia $|V_S^*|$;

El bloque de calculo de las potencias instantáneas, calcula las componentes de potencia instantánea de la carga, p_L , q_L y p_{0L} basado en la medición de las tensiones y corrientes de la carga, dadas por las expresiones (1-3).

$$p_L^* = v_d i_{Ld} + v_q i_{Lq} = \bar{p}_L + \tilde{p}_L \quad (1)$$

$$q_L^* = v_q i_{Ld} - v_d i_{Lq} = \bar{q}_L + \tilde{q}_L \quad (2)$$

$$p_{0L}^* = v_0 i_{L0} \quad (3)$$

Donde v_d , v_q y v_0 representan las tensiones del generador (v_{Sabc}) en el referencial $dq0$ y donde i_{Ld} , i_{Lq} e i_{L0} representan las corrientes en la carga en el mismo referencial.

A su vez, estas componentes de potencia pueden descomponerse en sus partes continuas y oscilatorias, \bar{p}_L y \tilde{p}_L y \bar{q}_L y \tilde{q}_L , respectivamente. Esto mediante un filtro pasa bajos, tal como está representado en la Fig. 2.

Las componentes de potencias que se desean compensar son las oscilatorias, debido a que provocan armónicos y desequilibrio, así también la de secuencia cero p_{0L} , que provoca circulación de corriente por el neutro.

El lazo de regulación de la tensión de la barra de CC del convertidor, V_{cc}^* , calcula la referencia de la potencia activa a ser transferida por el convertidor entre la barra de CC y la MI, \bar{p}_{Loss}^* , necesaria para mantener constante la tensión de la barra de CC.

Con el lazo de regulación del módulo de la tensión del GI, $|V_S^*|$, se determina la referencia de potencia reactiva \bar{q}_{exc}^* a ser transferida por el convertidor hacia el PCC para excitar a la MI y mantener constante el módulo de la tensión del GI donde,

$$|V_S| = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \sqrt{\Delta} \quad (4)$$

Una vez obtenidas las potencias \bar{p}_{Loss}^* , \bar{q}_{exc}^* , \tilde{p}_L , \tilde{q}_L y p_{0L} , ingresan al bloque de **calculo de corrientes de referencia** dadas por (5-7),

$$i_d^* = \frac{1}{\Delta} [(v_d)(\bar{p}_{Loss}^* - \tilde{p}_L^*) + (v_q)(\bar{q}_{exc}^* - \tilde{q}_L^*)] \quad (5)$$

$$i_q^* = \frac{1}{\Delta} [(v_q)(\bar{p}_{Loss}^* - \tilde{p}_L^*) + (v_d)(\bar{q}_{exc}^* - \tilde{q}_L^*)] \quad (6)$$

$$i_0^* = \frac{-p_{0L}^*}{v_0} \quad (7)$$

Finalmente estas referencias ingresan al lazo de control de corrientes y permitirán al convertidor inyectar dichas corrientes en la barra de CA.

III. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los resultados de simulación, obtenidos al implementarse el sistema representado en la Fig. 1, teniendo en cuenta los parámetros de la MI de la Tabla I y las cargas de la Tabla II. Se mostrará el comportamiento de las variables del sistema en los siguientes casos,

- 1) evolución de la tensión del GI durante el arranque en vacío
- 2) evolución de la tensión del GI durante la conexión de carga lineal balanceada y cambios de referencia
- 3) conexión de carga no lineal desequilibrada

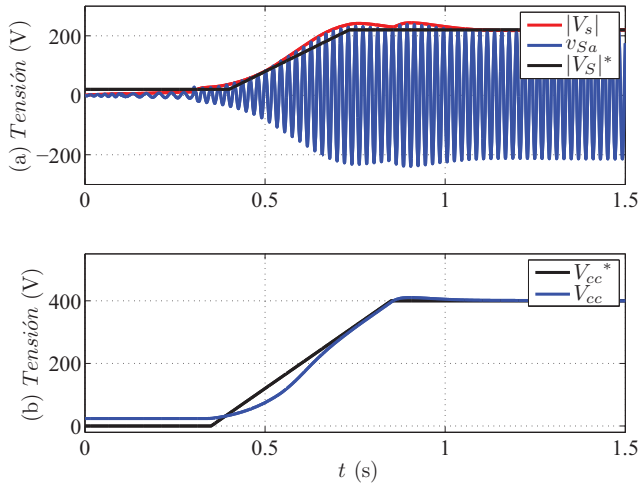


Fig. 3. Arranque del sistema, (a) V_{S_a} y (b) V_{cc} .

Para la simulación se supondrá que la MI está girando en vacío a velocidad nominal de 1500 rpm, con flujo y tensión nulos. Inicialmente para que la máquina genere energía es necesario que el convertidor provea una corriente reactiva inicial, para lo cual en este caso se simula una batería de 24 V conectada a la barra de CC, que junto con la corriente provista por los capacitores darán inicio al proceso de autoexcitación del GI.

TABLA I
PARÁMETROS DE LA MI.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
P (kW)	3.3	R_r (Ω)	0.4
R_s (Ω)	1.8	L_r (mH)	5.75
L_s (mH)	5.75	L_M (mH)	134.21
L (mH)	5	C (μF)	60
Nº polos	4	J (kgm^2)	0.04
Velocidad (RPM)	1500		

TABLA II
PARÁMETROS UTILIZADOS EN SIMULACIÓN

Parámetro	Características
Carga 1 (CA)	$r_1=r_2=r_3=80$ (Ω), $L_1=L_2=L_3=1$ (mH)
Carga 2 (CA)	$r_1=r_2=r_3=250$ (Ω), $L=3$ (Hy)
Carga 3 (CA)	$r_1=45$, $r_2=90$, $r_3=135$ (Ω)
Carga 4 (CC)	$r=150$ (Ω), $L=3$ (Hy)
Tensiones	$ V_S =200$, $V_{cc}=400$ V

A. Arranque del sistema

En la Fig. 3 se presenta la evolución de la tensión de fase instantánea del generador v_{S_a} y la tensión de la barra de CC V_{cc} durante el arranque. Como al inicio la tensión en bornes del GI es nula, inicialmente se configura al convertidor para proveer una corriente de arranque, en un referencial dado por la posición del rotor medida más un pequeño deslizamiento. Una vez que la tensión $|V_S|$ aumenta se toma el ángulo estimado a partir de las mediciones de tensión de secuencia positiva, utilizándose un detector de secuencia positiva [26].

En la Fig. 3, en $t=0$ s, con las referencias de tensiones $|V_S^*|=20$ V y $V_{cc}^*=0$ V, el controlador genera una referencia de corriente para que el convertidor inyecte una corriente que permite dar inicio al proceso de autoexcitación

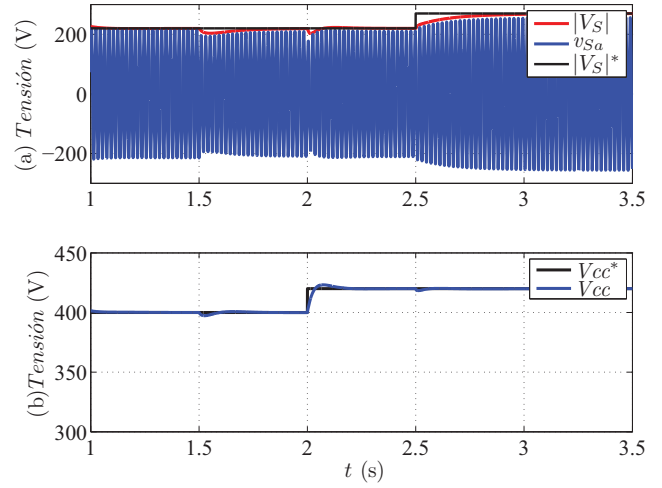


Fig. 4. Desempeño de control de tensión, (a) $|V_S|$ y (b) V_{cc} .

de la MI, hasta que la $V_{S_{abc}} > 20$ V, lo que ocurre en $t=0.3$ s. En $t=0.4$ s el controlador genera las referencias $|V_S^*|$ y V_{cc}^* en forma de rampa, hasta que las tensiones se establezcan en sus valores de referencia $|V_S^*|=200$ V y $V_{cc}^*=400$ V.

B. Evolución de la tensión del GI durante la conexión de una carga lineal balanceada y cambios de referencia

Una vez concluido el arranque del GI, se evalúa el comportamiento del sistema ante la conexión de una carga lineal balanceada y cambios en la referencia de las tensiones $|V_S|$ y V_{cc} .

En la Fig. 4 puede observarse la evolución de las tensiones del GI, $|V_S|$, y de la barra de CC, V_{cc} . En $t=1.5$ s se aplica la carga RL trifásica balanceada, definida por la carga 1, Tabla II.

Al conectarse la carga se produce una caída de tensión en la impedancia interna de la MI, por lo que el controlador trata de compensarla, para mantener en el valor de referencia a $|V_S^*|=200$ V. Para este caso, la tensión recupera el valor de referencia en aproximadamente 0.2 s. Además, el aumento de corriente del inversor produce una caída en la tensión V_{cc} , que el controlador compensa rápidamente.

En $t=2$ s se produce un cambio en la referencia de V_{cc}^* de 20 V, donde puede observarse el aumento de la tensión V_{cc} , estableciéndose en 420 V en aproximadamente 0.1 s.

Finalmente, en $t=2.5$ s se aplica otro cambio de referencia de tensión, $|V_S^*|=250$ V, luego de lo cual $|V_S|$ se establece en el nuevo valor en 0.25 s.

Ante esta perturbación externa del sistema de control, la tensión generada y controlada en el PCC $|V_S|$, así como la tensión de la barra de CC V_{cc} , varían pero vuelven a su valor normal rápidamente. Esto muestra el buen desempeño de la regulación de tensión.

C. GI alimentando cargas no lineales desequilibradas

A continuación se muestra el comportamiento del GI alimentando una carga no lineal y desequilibrada. La carga consiste en el paralelo entre las cargas 2 y 3 de CA de la Tabla II, en paralelo con un puente rectificador trifásico a diodos sin filtro capacitivo, que a su vez alimenta la carga 4 en CC de la Tabla II.

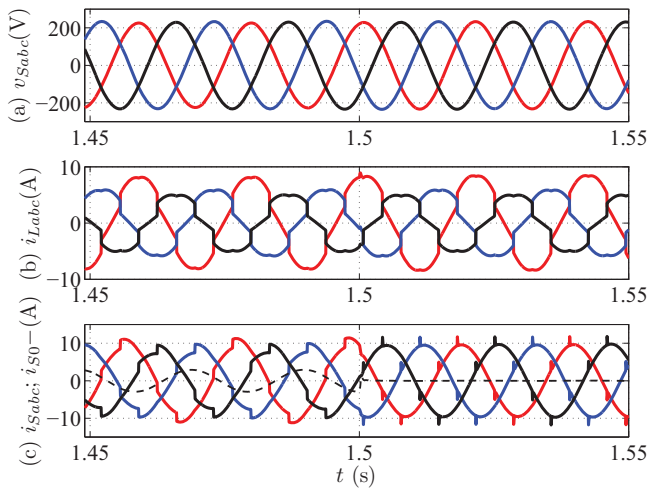


Fig. 5. GI alimentando una carga no lineal y desequilibrada.

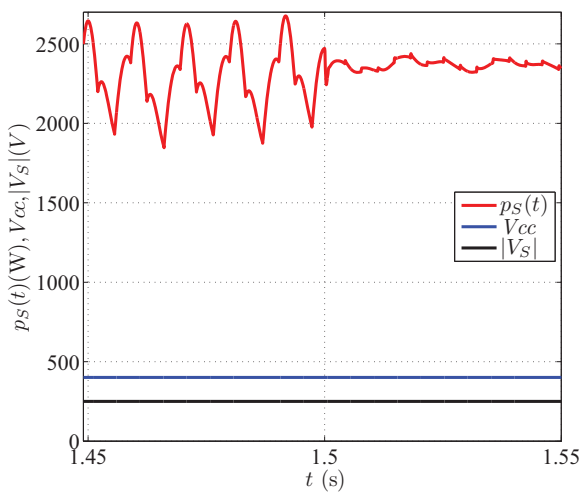


Fig. 6. Potencia instantánea y tensiones del GI, antes y después de la compensación.

En la Fig. 5 (a) se muestran las formas de onda de las tensiones de fase del generador v_{Sabc} , en (b) las corrientes de carga i_{Labc} y en (c) las corrientes de fase i_{Sabc} junto con la corriente del neutro del generador i_{S0} , durante un ensayo de conexión de las cargas mencionadas.

Para $t < 1$ s el GI estaba generando en vacío en régimen permanente con el sistema de regulación de tensión. En $t = 1.4$ s, se realiza la conexión de la carga no lineal desequilibrada mencionada, se observa en la Fig. 5 (b) y (c) que las corrientes de carga y del neutro están circulando. En $t = 1.5$ s se habilita el sistema de compensación de armónicos y desequilibrio, se puede apreciar como la corriente de neutro i_{S0} se anula y las corrientes de fase i_{Sabc} se vuelven equilibradas y con menos armónicos.

En la Fig. 6 se muestran para el mismo ensayo anterior las formas de onda de la tensión generada, $|V_S|$, de la tensión de la barra de CC, V_{cc} y de la potencia instantánea antes y después de la compensación. Se puede observar que después de la compensación las tensiones permanecen sin cambios mientras que la potencia se hace prácticamente constante.

En la Fig. 7 (a) se presenta la FFT de la corriente de la fase i_{Sa} de la Fig. 5 (c) sin compensar, correspondientes al ensayo anteriormente descrito para el período de tiempo

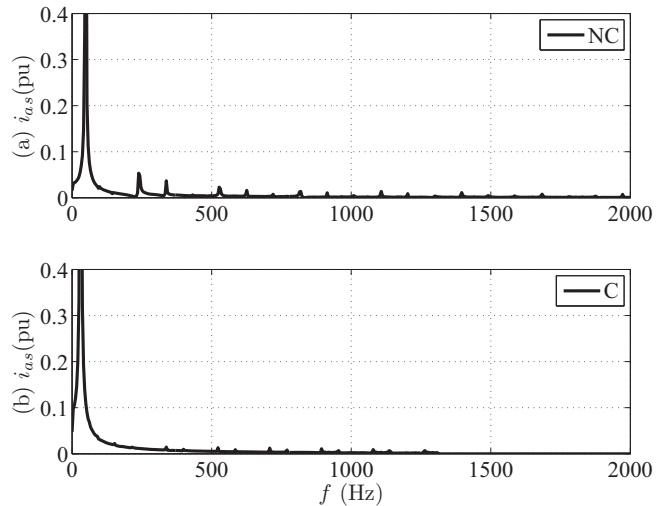


Fig. 7. FFT de i_{Sa} , (a) sin compensar, (b) compensado.

$t < 1.5$ s. En la Fig. 7 (b) se muestra la FFT de la corriente i_{Sa} compensada, correspondientes al ensayo anteriormente descrito para el período de tiempo $t > 1.5$ s. Se aprecia una disminución significativa en las amplitudes de los armónicos después de la compensación.

Estos resultados demuestran que el sistema compensa los armónicos y el desequilibrio introducidos por las cargas no lineales.

IV. CONCLUSIÓN

En ese trabajo se propuso un sistema de excitación para generadores de Inducción jaula de ardilla autónomos. Mediante simulación se implementó un generador trifásico de cuatro hilos capaz de alimentar cargas monofásicas y trifásicas, lineales y no lineales.

El sistema de excitación del generador consta de un banco de capacitores y convertidor de cuatro piernas, conectados en paralelo a la máquina de inducción.

Para controlar el generador se propuso un algoritmo basado en la teoría de la potencia activa y reactiva instantánea, que permite excitar y regular la tensión a bornes de la máquina, además realizar funciones auxiliares como la compensación de armónicos y el desequilibrio de cargas.

En base a los resultados de simulación se observó que el sistema propuesto permite regular la tensión generada, evitar que los armónicos de corriente circulen por el generador y compensar desequilibrio de cargas, además compensar la corriente que circula por el conductor de neutro. De esta manera se mostró que posible disminuir las pérdidas del GI, disminuir las pulsaciones de potencia y de par, lo que aumenta la vida útil y el rendimiento general del sistema de generación.

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM) y La Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), Argentina.

REFERENCES

- [1] M. Nehrir, C. Wang, K. Strunz, H. Aki, R. Ramakumar, J. Bing, Z. Miao, and Z. Salameh, "A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configurations, control, and applications," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 392–403, 2011.
- [2] S. Chu and A. Majumdar, "Opportunities and challenges for a sustainable energy future," *nature*, vol. 488, no. 7411, pp. 294–303, 2012.
- [3] O. Ellabban, H. Abu-Rub, and F. Blaabjerg, "Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 748 – 764, 2014.
- [4] M. Singh, S. Singh, B. Singh, A. Pandey, R. Dixit, and N. Mittal, "Stand alone power generation by 3 phase asynchronous generator: A comprehensive survey." Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), 2nd International Conference on , Dec. 2012, 2012.
- [5] C. P. Ion and C. Marinescu, "Three-phase induction generators for single-phase power generation: An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, no. 0, pp. 73 – 80, 2013.
- [6] J. Laghari, H. Mokhlis, A. Bakar, and H. Mohammad, "A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 279–293, 2013.
- [7] Z. Chen, J. Guerrero, and F. Blaabjerg, "A review of the state of the art of power electronics for wind turbines," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, Aug 2009.
- [8] V. S. Santos, P. R. V. Felipe, J. R. G. Sarduy, E. C. Quispe, and M. Balbis, "Shaft power estimation in induction motor operating under unbalanced and harmonics voltages," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 5, pp. 2309–2315, 2016.
- [9] Y. Chauhan, S. Jain, and B. Singh, "A prospective on voltage regulation of self-excited induction generators for industry applications," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 2, pp. 720–730, March 2010.
- [10] M. Kiani and W.-J. Lee, "Effects of voltage unbalance and system harmonics on the performance of doubly fed induction wind generators," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 2, pp. 562–568, 2010.
- [11] A. K. Sharma, "Study of wind turbine based seig under balanced/unbalanced loads and excitation," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, no. 3, p. 353, 2012.
- [12] C. Wessels, N. Hoffmann, M. Molinas, and F. W. Fuchs, "Statcom control at wind farms with fixed-speed induction generators under asymmetrical grid faults," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, pp. 2864–2873, 2013.
- [13] F. B. Silva, W. E. Vanco, F. A. da Silva Goncalves, C. A. B. Junior, D. P. de Carvalho, and L. M. Neto, "Experimental analysis of harmonic distortion in isolated induction generators," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 3, pp. 1245–1251, 2016.
- [14] L. Wang and S.-C. Kuo, "Steady state performance of a self-excited induction generator under unbalanced load," in *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, vol. 1, 2002, pp. 408–412 vol.1.
- [15] T. Chan and L. L. Lai, "Steady-state analysis and performance of a stand-alone three-phase induction generator with asymmetrically connected load impedances and excitation capacitances," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 16, no. 4, pp. 327–333, 2001.
- [16] B. Singh, S. Murthy, and S. Gupta, "A stand-alone generating system using self-excited induction generators in the extraction of petroleum products," *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 46, no. 1, pp. 94–101, 2010.
- [17] A. Bouzid, M. Benghanem, B. Hamane, A. Belabbes, M. Bouhamida, and A. Draou, "Current control of the isolated self-excited induction generator using shunt active filter," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 349–358, 2012.
- [18] B. Singh, S. Murthy, and R. S. R. Chilipi, "Statcom-based controller for a three-phase seig feeding single-phase loads," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 29, no. 2, pp. 320–331, 2014.
- [19] L. G. Scherer, R. V. Tambara, and R. F. de Camargo, "Voltage and frequency regulation of standalone self-excited induction generator for micro-hydro power generation using discrete-time adaptive control," *IET Renewable Power Generation*, 2016.
- [20] L. G. Scherer, C. B. Tischer, and R. F. de Camargo, "Power rating reduction of distribution static synchronous compensator for voltage and frequency regulation of stand-alone self-excited induction generator," *Electric Power Systems Research*, vol. 149, pp. 198 – 209, 2017.
- [21] E. W. y M. Aredes H. Akagi, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. IEEE Press Series on Power Engineering, 2007.
- [22] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322, Nov 1996.
- [23] R. Leidhold, G. García, and M. I. Valla, "Induction generator controller based on the instantaneous reactive power theory," *Power Engineering Review, IEEE*, vol. 22, no. 7, pp. 51–51, July 2002.
- [24] P. Silva, R. Pinheiro, M. Aguiar, L. Junior, A. Salazar, and C. Cunha, "Implementation of a shunt active filter using the theory of generalized instantaneous power," in *Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian*, Sept 2011, pp. 782–787.
- [25] A. J. Benitez, P. M. de la Barrera, and G. O. Garcia, "Sistema de excitación y compensación de armónicos para generadores de inducción jaula de ardilla," in *Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2014 IEEE*. IEEE, 2014, pp. 73–77.
- [26] F. Rodriguez, E. Bueno, M. Aredes, L. Rolim, F. A. Neves, and M. C. Cavalcanti, "Discrete-time implementation of second order generalized integrators for grid converters," in *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*. IEEE, 2008, pp. 176–181.