

## USO DE GENERADORES ASÍNCRONOS EN MICRO CENTRALES

Roberto Leidhold y Guillermo García

Grupo de Electrónica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nac. #36 Km. 601 - 5800 - Río Cuarto - Argentina - Tel.: +54-58-676255; Fax: +54-58-676246  
E-mails: rleidhold@ing.unrc.edu.ar - ggarcia@ing.unrc.edu.ar

**RESUMEN:** La *Máquina Asíncrona (MA)* es la más económica y robusta de las máquinas eléctricas rotativas convencionales. Estas características la hacen atractiva para ser usada en micro centrales eléctricas de bajo costo, eólicas e hidráulicas. A pesar de que esta máquina es muy usada como motor, su uso como generador autónomo no se ha popularizado debido a que resulta complicado realizar su excitación y control de tensión. Actualmente, el avance tecnológico en la electrónica de potencia y la microelectrónica ha permitido el desarrollo de una gran variedad de sistemas de excitación para MAs. En éste trabajo se presenta una clasificación y una descripción sucinta, incluyendo las principales características, de los sistemas más comunes para la excitación MAs.

### INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado el interés en el desarrollo y uso de diferentes fuentes de energía renovables, entre ellas las relacionadas con micro centrales eólicas e hidráulicas. Los sistemas de energía no convencionales generalmente operan en regiones remotas, lo que hace muy importante contar con sistemas robustos, de bajo costo y que requieran un mínimo de mantenimiento.

Tradicionalmente, en micro centrales eléctricas se han utilizado generadores de corriente continua o síncronos. Estos generadores, además de su mayor costo debido a razones constructivas (conmutadores, rotores bobinados, etc.), requieren de contactos eléctricos móviles, lo que obliga hacer trabajos de mantenimiento periódico, con lo que, finalmente, se incrementa el costo de la energía producida. Para minimizar el mantenimiento se han utilizado *Generadores con Imanes Permanentes (GIP)* y *Generadores Asíncronos (GA)*, también llamados de inducción, los que no requieren de contactos móviles. Si comparamos a estos dos últimos generadores, podemos decir que el GA, del tipo jaula de ardilla, es mucho más barato y robusto que el GIP.

El GA consiste en un sistema formado por una *Máquina Asíncrona (MA)* convencional y un sistema adecuado para excitarla, posibilitando de esta manera la generación. A pesar de que el fenómeno de autoexcitación de la MA es conocido desde hace mucho tiempo (e.g. Bassett y Potter 1935), el uso de esta máquina en lugares aislados (no conectada a redes eléctricas convencionales para su excitación) no se ha popularizado, fundamentalmente, debido a las dificultades para autoexcitar y controlar la tensión en este tipo de máquina. La forma más simple de autoexcitar una MA, para implementar un GA, es a través de la conexión de un banco de capacitores, de valor fijo, en paralelo con la máquina (e.g. Wagner, 1939). Este sistema de excitación es muy simple, barato y robusto pero tiene el inconveniente de la mala regulación de tensión, inclusive pueden ocurrir transitorios de sobretensión, los que pueden dañar cierto tipo de cargas conectadas al GA (Smith *et al.*, 1968).

Debido a lo anterior, para lograr una mejor calidad de la energía eléctrica generada, es que se han propuesto diferentes formas de excitar GAs, tanto trabajando en forma aislada o interconectados a sistemas convencionales de energía eléctrica (cogeneración), las que sirven para regular tanto la frecuencia como la tensión generada.

El objetivo de este trabajo es presentar las diferentes formas de excitación para GAs, tanto para trabajar en forma aislada como interconectados con otros sistemas, incluyendo una propuesta innovadora de los autores (Leidhold, 1997).

### CLASIFICACION DE LOS DIFERENTES SISTEMAS

A continuación son presentadas y explicadas, sucintamente, las siguientes clasificaciones de GAs:

- en función de las diferentes posibilidades de interconexión
- en función de las diferentes posibilidades de operación
- en función de las diferentes posibilidades de excitación

#### A - CLASIFICACION EN FUNCION DE LAS DIFERENTES POSIBILIDADES DE INTERCONEXION

##### **GA Conectado a una Red de Distribución Convencional**

En este caso, el GA dispone de una fuente de tensión, teóricamente ideal, desde donde puede extraer energía para su excitación. La tensión y la frecuencia eléctrica consumida por los usuarios son independientes de la potencia que se extrae del GA. Quien, fundamentalmente, controla la "calidad de la energía" es la red a la cual está interconectado el GA. No obstante, el GA puede introducir armónicos, contribuir a la existencia de un factor de potencia indeseable, producir oscilaciones de tensión y hasta inestabilidad en el sistema eléctrico. Estos problemas pueden ser solucionados con el uso de modernas técnicas de control y electrónica de potencia (convertidores estáticos).

#### **Nota Técnica**

### GA para Operación Autónoma

En este caso, el GA es la única fuente de energía eléctrica disponible en el local. Generalmente se requiere un sistema de almacenamiento y control de energía para, al menos, iniciar la autoexcitación del GA y también para “amortiguar” (almacenando energía) las variaciones de la potencia generada debido a, por ejemplo, la inconstancia del viento.

### GA para Co-generación con Máquinas Similares (Parques Eólicos)

En este caso, el GA forma parte de un conjunto de generadores del mismo tipo. Este es el caso de los parques eólicos. Normalmente las diferentes máquinas que componen el parque trabajan en diferentes puntos de operación lo que puede ocasionar interferencias en el desempeño de los restantes GAs. Este problema también puede ser resuelto con el uso de modernas técnicas de control y electrónica de potencia.

## B - CLASIFICACION EN FUNCION DE LAS DIFERENTES POSIBILIDADES DE OPERACION

### Velocidad de la Turbina Cuasi-constante y Frecuencia Eléctrica Generada Constante

Al ser la frecuencia eléctrica generada constante, se pueden conectar cargas convencionales (e.g. iluminación y motores) directamente al GA. En la mayoría de los casos, esto implica que la velocidad de la turbina tendrá un rango de trabajo muy limitado. Si se trata de turbinas eólicas o hidráulicas, se debe variar el ángulo de los alabes (paso) en función de la velocidad del viento o nivel de agua, según sea el caso, para lograr un rendimiento óptimo del sistema.

### Velocidad de la Turbina y Frecuencia Eléctrica Generada Variables

En algunos casos se prefiere operar con velocidad variable, donde, para mantener un buen rendimiento, se debe controlar la velocidad de giro en función de la velocidad del viento o nivel de agua, según sea el caso. El trabajar con velocidad variable, en la mayoría de los casos, implica generar tensión de frecuencia variable, lo cual limita las cargas que se pueden conectar directamente al GA, siendo necesaria la existencia de una “interface” con los usuarios (convertidores estáticos).

### Velocidad de la Turbina Variable y Frecuencia Eléctrica Generada Constante

La desventaja que presenta la frecuencia eléctrica variable, en el caso anterior, puede ser solucionado rectificando y volviendo a invertir con frecuencia constante o a través de MAs con rotor bobinado excitadas desde el rotor.

## C -- CLASIFICACION EN FUNCION DE LAS DIFERENTES POSIBILIDADES DE EXCITACION DE UN GA

### C.1 - Excitación a Través de una Fuente de Tensión Externa

Cuando se dispone de una fuente de tensión alterna a la cual se desea inyectar energía, la excitación la provee dicha fuente de tensión. Este es el caso de las MAs conectadas a las redes convencionales.

Si se opera a frecuencia constante, la MA se conecta directamente a la red (Fig.1) y se controla la potencia generada variando el deslizamiento (diferencia entre la velocidad del rotor y la de sincronismo). Esto se logra ajustando la velocidad de la turbina (y del generador) a través del control del ángulo de los alabes. Si el GA opera con frecuencia variable, la conexión con la red debe realizarse a través de un convertor estático CA/CC/CA (Fig.2) a través del cual se controla la potencia inyectada en el sistema eléctrico.

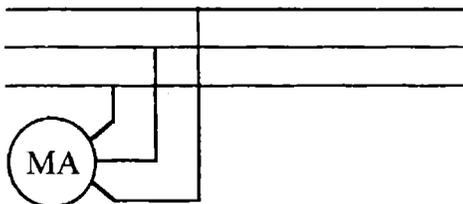


Fig. 1

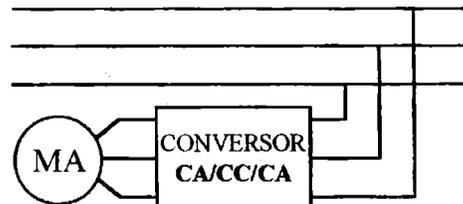


Fig. 2

### C.2 - Capacitores en Paralelo

La forma más simple y conocida de excitar un GA cuando no se dispone de una fuente de tensión convencional, para producir la excitación del mismo, es conectando un banco de capacitores en paralelo con la máquina (e.g. Vas 1992; Shridhard *et al.*, 1995) (Fig. 3). En este caso, el punto de trabajo (y la tensión generada) depende de las características de la MA y del banco de capacitores. En la Fig.4 se observa que para obtener la tensión  $V_{sn}$ , siendo  $X_l$  la curva de magnetización de la MA (curva tensión-corriente en vacío), se debe seleccionar un capacitor de impedancia  $X_{cn}$ . Por otra parte se observa que si el capacitor es menor que  $X_{cmin}$  no ocurre la autoexcitación de la MA.

Este sistema de excitación provee muy mala regulación de tensión debido tanto a las variaciones de la carga como a las variaciones de la velocidad del rotor (Shridhard *et al.*, 1995). Por otro lado, para que se produzca la autoexcitación del GA debe existir una tensión inicial en el banco de capacitores o un magnetismo remanente en el hierro de la máquina. En la práctica, la existencia o no del magnetismo remanente depende de las condiciones de parada de la máquina. En el caso que la máquina se desexcite por un aumento excesivo de la carga o por una disminución de la velocidad, se produce su total desmagnetización lo que impide que ésta vuelva a autoexcitarse. En este último caso, para volver a excitar la máquina se debe crear un flujo magnético inyectando una corriente en las bobinas del estator o en el banco de capacitores.

En este caso, la frecuencia generada es función de la velocidad de giro del rotor y del deslizamiento, el cual a su vez depende de la carga. Es por esto que, para mantener constante la frecuencia, es necesario contar con un lazo de control de velocidad. La regulación de tensión es muy sensible a la carga eléctrica y también a la frecuencia generada.

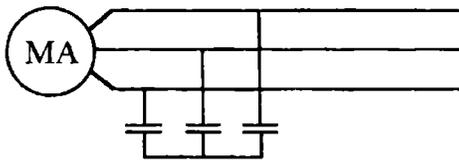


Fig. 3

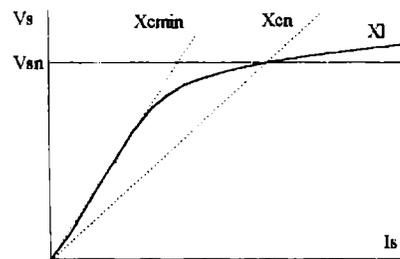


Fig. 4

**C.3 - Bancos de Capacitores Paralelo-Serie:** (e.g. Bim *et al.*, 1989; Shridhard *et al.*, 1995).

Para mejorar la regulación de tensión, puede incluirse un banco de capacitores en serie con la carga (Fig. 5). Esto produce alguna mejora en la regulación de tensión para diferentes cargas y velocidades del rotor (frecuencia generada). Persisten en este caso las dificultades para lograr la autoexcitación.

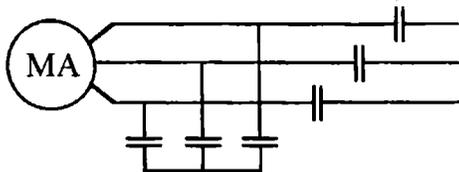


Fig. 5

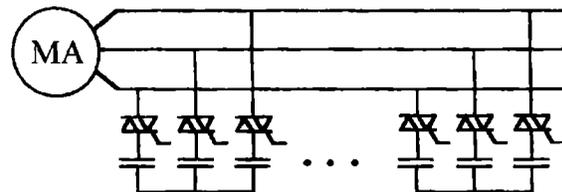


Fig. 6

**C.4 - Bancos de Capacitores en Paralelo Conmutado** (e.g. Mujadi *et al.*, 1993).

Este es otro método propuesto para mejorar la regulación de tensión, requiere de un control activo para conmuta un banco de capacitores (Fig. 6). Esto es equivalente a un capacitor variable por pasos en paralelo con la MA.

**C.5 - Generadores Estáticos de Potencia Reactiva ("Static VAR Generators"):**

Aparte de capacitores, se puede obtener potencia reactiva para la excitación de la MA usando diversas técnicas comunes en la corrección de factor de potencia, como ser: con inductores controlados con tiristores en paralelo con capacitores como se muestra en Fig. 7 (e.g. Brene y Abbondani, 1977); o reactores saturables en paralelo con capacitores (Fig. 8) (e.g. Murthy y Bhim, 1996; Casel y Knitterscheidt, 1981); o con inversores (Fig. 9) (e.g. Gyugyi, 1979; Elder y Boys, 1984; Arrilaga y Watsen, 1978).

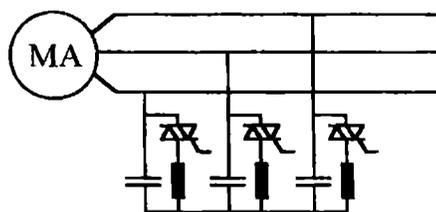


Fig. 7

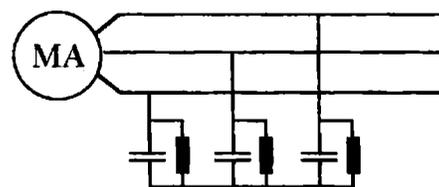


Fig. 8

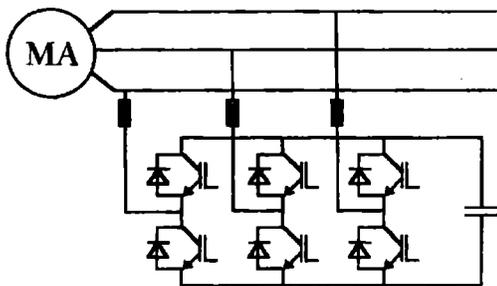


Fig. 9

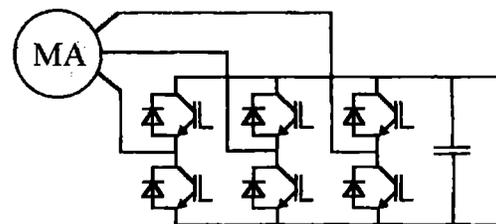


Fig. 10

**C.6 - Capacitor Activo**

Usando la teoría de la "Potencia Real e Imaginaria Instantánea" (Akagi *et al.*, 1984; Watanabe *et al.* 1992), se puede emular por medio de un inversor, el comportamiento de un "Capacitor Variable". Esto posibilita variar en forma continua e instantánea el valor de la capacidad de excitación. La topología más común es como la mostrada en la Fig.9. Se diferencia de los Generadores estáticos de potencia reactiva por el algoritmo que controla las llaves electrónicas del inversor y, fundamentalmente, por usar un solo capacitor, de valor mucho menor (menor costo) en el bus de corriente continua.

**Nota Técnica**

### C.7 - Controladores vectoriales (Leidhold *et al.*, 1997).

Basado en la experiencia obtenida a través de la teoría de control vectorial para motores de inducción (e.g. Leonhard, 1996; García *et al.*, 1994), se ha propuesto una nueva metodología para el control de GAs. El control vectorial consiste en la obtención de dos variables de control en función de los valores instantáneos de las corrientes del estator y del flujo magnético estimado. Estas dos variables permiten controlar independientemente el flujo magnético y las corrientes rotóricas, por lo tanto el par motor o potencia activa generada.

Esta propuesta permite generar energía CC con velocidad del rotor y carga eléctrica variables. La implementación se logra con un inversor como el mostrado en la Fig.9. La tensión CC presenta muy buena regulación ante variaciones de carga y de velocidad. Es posible, a partir de la energía CC, obtener energía CA a través de un inversor.

### CONCLUSIONES

Se han propuesto en la bibliografía diferentes métodos de excitación para MAs. Estos métodos pueden clasificarse en las siguientes dos grandes ramas:

**Pasivos:** son aquellos que no requieren sistema de control ni electrónica de potencia. (C.1 de velocidad constante, C.2 y C.3). Son baratos y robustos, pero salvo los sistemas de velocidad constante conectados a la red, la tensión es muy sensible a las variaciones de velocidad y carga eléctrica. Se desexcitan con velocidades bajas o cargas eléctricas que superan cierto valor. Presentan dificultades para el arranque. Los sistemas conectados a la red son muy simples y robustos, son los más usados en parques eólicos, presentan el problema de aumentar el consumo de potencia reactiva del sistema.

**Activos:** son los que requieren algún sistema de control y electrónica de potencia. (C.1 de velocidad variable, C.4 a C.7). Presentan mejor regulación de tensión, pueden trabajar con velocidad variable, optimizar el rendimiento, tanto de la turbina como del propio generador, pero exige un elevado costo de electrónica de potencia (conversión CA/CC/CA). Requieren de una fuente de energía local para el arranque.

Debido a la disminución continua de los costos de la electrónica de potencia y de los correspondientes controladores asociados, y a las ventajas que estos sistemas presentan, los autores de este trabajo suponen que serán, en un futuro cercano, los más usados. Los principales problemas a resolver en los sistemas activos son: minimización de costo, robustez, y confiabilidad.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo financiero de las siguientes instituciones: CONICOR, Secretaría de Ciencia y Técnica, y Departamento de Electricidad y Electrónica de la Universidad Nacional de Río Cuarto y CONICET.

### BIBLIOGRAFIA

- Akagi H., Kanazawa Y. and Nabae A. (1984). *Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components*. IEEE Trans. on Ind. Application, Vol. IA-20, no. 3, 1984.
- Basset and Potter (1935). Capacitive Excitation for Induction Generators. *Electrical Engineering*, Vol.54, pp. 540-545.
- Bim E., Szajner J. And Burian Y. (1989). Voltage Compensation of an Induction Generator with Long Shunt Connection. *IEEE Tran. On Energy Conversion*, Vol.4, No.3, pp526-530.
- García G., Luiz J., Stephan R., Watanabe E. (1994). An Efficient Controller for an Adjustable Speed Induction Motor Drive. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. Vol. 41, No. 5. pp 533-539. Oct. 1994.
- Leidhold, R.; Bossio, G.; De Angelo, C.; Forchetti, D.; García, G. (1997). *Control vectorial para generadores de inducción*. Aprobado para la IIV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC). INAUT, Universidad Nacional de San Juan. A llevarse a cabo en San Juan del 17 al 19 de Septiembre de 1997.
- Murty S.S., Singh B.P., Nagamani C. and Satyanarayana K.V.V. (1988). Studies on the use of conventional induction motors as self excited induction generators. *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol 3, no 4, pp 842 - 848.
- Shridhar L., Bhim Singh, Jha C., Singh B. and Murthy S. (1995). Selection of capacitors for the self regulated short shunt self excited Induction Generator. *IEEE Tran. on Energy Conversion*, Vol.10, No. 1, pp10-17, Mar 1995.
- Smith, Y. and Sriharan, F. (1968). Transients in Induction Motors with Terminal Capacitors. *Proceedings IEE*. Vol 115.
- Vas P. (1992) *Electrical Machines and Drives*. Clarendon Press. Oxford.
- Wagner, C. (1939) Self-Excitation of Induction Motors. *AIEE Tran.*, Vol.58, pp 47-51, Feb 1939.
- Watanabe E.H., Stephan R.M. and Aredes M. (1993) New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No.2, pg. 697-703, July, 1993.