

Diseño de una Carga Electrónica Controlada Aplicada al Generador Síncrono para el Desarrollo de un Simulador de Cargas

Investigación

M.C. Luis Antonio Castañeda Ramos¹, M.C. José Alfredo Jáuregui Acevedo¹,

M.C. Mario Salvador Esparza González¹,

Dr. Carlos Humberto Saucedo Zárate², Dr. Carlos Sánchez López².

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica-Electrónica

² Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales

lacr347@yahoo.com.mx

Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. A. López Mateos 1801 Ote. Fracc. Bona Gens, Aguascalientes, Ags., México. C.P. 20256, Tel: 01 (449) 9105002, Fax: 01 (449) 9700423

Resumen

En esta investigación se presenta el desarrollo del diseño de un equipo que permite llevar a cabo la medición de la velocidad, la potencia y el par de un motor eléctrico; el cual se empleará para definir sus características de operación sometiéndolo a prueba en los regímenes de trabajo de par o potencia constante, empleando para ello una medición indirecta no invasiva de las características mecánicas. Se utiliza un generador síncrono acoplado en la flecha, que sirve como carga, transductor y medio de control del par o potencia. La carga variable en terminales del generador es electrónica, se emplea un rectificador controlado con retroalimentación de corriente. Los resultados muestran el análisis de un motor de 120W en los diferentes regímenes alcanzando un par máximo de 0.9039 Nm (8 lbf-pulg) y una potencia máxima de 122 watts. La máquina síncrona y la topología de carga electrónica propuesta permite un mayor flujo de potencia y mejor control que otras alternativas.

Palabras clave: Generador síncrono, ángulo de disparo, par, potencia y velocidad.

Abstract

This research it is shown the development of a system for measuring the speed, power and torque of an electric motor to define its operating characteristics, it has the capability of subjecting the testing motor working the regimes constant torque and constant power scheme, using indirect noninvasive measurement the mechanical properties. A synchronous generator coupled to the shaft is used, which serves as a load transducer and as torque control or power. The variable load applied to the terminals of the generator is electronic, by means of controlled rectification using a power-current feedback system. The results that are presented, analyzed the behavior of a 120W motor in different regimes reaching maximum torque of 0.9039

Nm (8 lbf-inch), a maximum power of 122 watts. We concluded that the use of synchronous machine and load topology proposal, allows a greater flow of power and better control than other alternatives.

Key words: Synchronous generator, firing angle, torque, power, speed.

Introducción

El uso de motores eléctricos tiene un abanico enorme de aplicaciones tanto en el ramo industrial, de servicios, residencial, agrícola y comercial. Dada la variedad de procesos que precisan el uso de motores eléctricos, el problema de la elección del motor y su sistema de control se presenta muy extenso, de tal manera que cada caso en particular requiere una solución específica. Son varios los factores que deben tenerse en cuenta a la hora de elegir un motor y su sistema de control para un proceso determinado. Entre ellos el régimen de velocidad, de carga, alimentación disponible, medio ambiente, precio, gastos de explotación y mantenimiento. La solución a cada problema no es única, pudiendo haber distintas opciones respecto al sistema adecuado. Sin embargo se puede decir que el “sistema motor + control” más adecuado es aquel que se ajusta a las especificaciones del proyecto con el menor costo. Por otro lado, al hacer uso de los motores eléctricos, se debe tener en cuenta un aspecto muy importante que es el tipo de carga, el cual define las características de trabajo. Cada tipo de carga define un régimen determinado de las variables de salida del motor que son: velocidad, par y potencia. Se destacan tres de los regímenes más importantes que son [1]:

a) Régimen de velocidad constante (para cualquier valor de par). Se presenta sobre todo en máquinas herramientas, bandas transportadoras, tracción múltiple, etc.

b) Régimen de par constante (a cualquier valor de velocidad). Por ejemplo en devanadoras y máquinas de tracción.

c) Régimen de potencia constante (a cualquier valor de par y velocidad). Como en las máquinas trituradoras.

Las características de trabajo antes mencionadas son las que comúnmente se presentan en un proceso real, y un sistema de control práctico debe ser capaz de satisfacerlo.

Existen trabajos previos [2-3-4] desarrollados bajo el mismo principio, pero utilizando una máquina de corriente directa (CD) funcionando como generador y un convertidor CD-CD como carga; este arreglo presenta las desventajas derivadas por el conmutador en el rotor en pruebas desarrolladas a baja velocidad y alto par, de acuerdo con los trabajos [3-4]. En [4] se obtienen resultados donde se muestra que la potencia máxima en el motor es del 50% de su capacidad en algunos puntos de operación.

El objetivo de este trabajo es diseñar y desarrollar un equipo de prueba para motores eléctricos de cualquier tipo que incluya la medición de velocidad, potencia y par y que permita definir sus características de operación en los regímenes de trabajo siguientes: a) par constante y b) potencia constante. Estos resultados apoyarán la elección del motor más apropiado a la aplicación en particular.

El sistema emplea una medición indirecta (no invasiva) de las características mecánicas mediante un generador síncrono acoplado en la flecha, que hace la función de carga y transductor a la vez.

Se diseña una carga electrónica variable con lazo de control de corriente y potencia basada en un rectificador trifásico controlado; la cual se conecta en terminales del generador acoplado al motor en estudio modificando el parámetro de operación según la prueba a realizar.

El proyecto se desarrolló durante el año 2013 en el laboratorio de aplicaciones industriales del Instituto Tecnológico de Aguascalientes, recibió financiamiento por parte de la DGEST.

Fundamentos teóricos

A) EL Generador síncrono.

El generador síncrono es una máquina rotatoria que convierte la energía mecánica a energía eléctrica, su nombre se debe a que la frecuencia eléctrica que produce se sincroniza con la velocidad mecánica de rotación. La frecuencia de la tensión generada (f) es directamente proporcional a la velocidad de rotación del rotor (S) y al número de polos magnéticos (P) incluidos en la misma y se expresa por la ecuación:

$$f = \frac{S \cdot P}{120} \quad (1)$$

Para la transmisión de la energía mecánica en el eje del rotor es importante observar tres parámetros que son: velocidad, par y potencia. Para el desarrollo de las relaciones de potencia y par de salida de un generador síncrono trifásico, se debe tomar en cuenta el diagrama fasorial de la figura 1 donde se representa una fase del generador que entrega la corriente de armadura de fase (I_a) con el ángulo de defasamiento (ϕ) en retraso con respecto a su voltaje de fase (V_f). Se representa además el flujo (Φ_g) que produce al voltaje generado (E_g), el flujo (Φ_a) que origina las corrientes en el devanado de armadura y el voltaje de reactancia síncrona de armadura (E_{xs}). Φ_R es la resultante de los flujos Φ_g y Φ_a resultado del voltaje de fase.

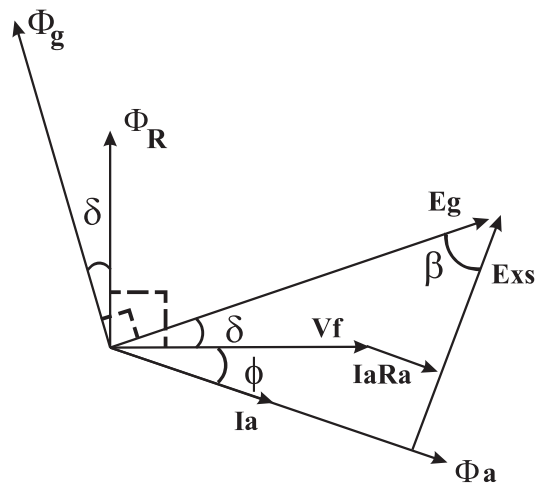


Figura 1. Relaciones de voltaje, flujos y ángulo de par de un generador síncrono.

Realizando un análisis del diagrama fasorial de la figura 1 se puede demostrar que la potencia de salida por fase (P_f) del generador síncrono está definida por:

$$P_f = E_g I_a \sin \beta - I_a^2 R_a \quad (2)$$

Por lo que la potencia de salida del generador es la diferencia de la potencia de entrada y las pérdidas por calentamiento (despreciando las pérdidas mecánicas).

Dado que la potencia de entrada en el eje del generador está definida por: $P_e = E_g I_a \sin \beta$, se deduce una expresión que involucra algunos parámetros de diseño y de operación que se definen en la ecuación:

$$P_e = E_g I_a \left[\frac{\left(V_f + \frac{I_a R_a}{\cos \phi} \right)}{(I_a X_s - I_a R_a \tan \phi)} \right] \sin \delta \quad (3)$$

Despreciando el efecto de la resistencia de armadura (R_a) comparado con el de la reactancia síncrona (X_s) ($R_a \ll X_s$) [1] se puede reducir la expresión anterior a:

$$P_e = \frac{E_g V_f}{X_s} \sin \delta \quad (4)$$

La ecuación anterior muestra que la potencia por fase de entrada en un generador síncrono depende del ángulo δ entre V_f y E_g , y de la reactancia X_s .

En función de variables mecánicas la potencia se obtiene por:

$$P_e = \tau_e \omega_m \quad (5)$$

Donde τ_e representa el par a la entrada del generador y ω_m es la velocidad mecánica en la flecha del generador. Substituyendo la ecuación (4) en (5) y despejando el par tenemos:

$$\tau_e = \frac{3E_g V_f}{X_s \omega_m} \sin \delta \quad (6)$$

Con la ecuación (6) se concluye que el par desarrollado en la flecha del generador depende, al igual que la potencia, del ángulo δ entre V_f y E_g ; si el generador está en vacío, V_f y E_g son iguales y $\delta = 0$, lo que nos da un par de cero. Para que el ángulo del par δ sea diferente de cero se requiere tener corriente en la armadura, es decir si se incrementa la corriente de la armadura, se tendrá una respuesta casi lineal, logrando incrementos en el par y en la potencia a la entrada del generador, siempre y cuando se mantenga constante la excitación en el campo del rotor y su velocidad en el eje de la flecha. Esta respuesta de operación la podremos observar en la Figura 2. En resumen, al incrementar la demanda de corriente en el circuito de la armadura, se espera un incremento en el efecto de frenado o de carga en la flecha del rotor.

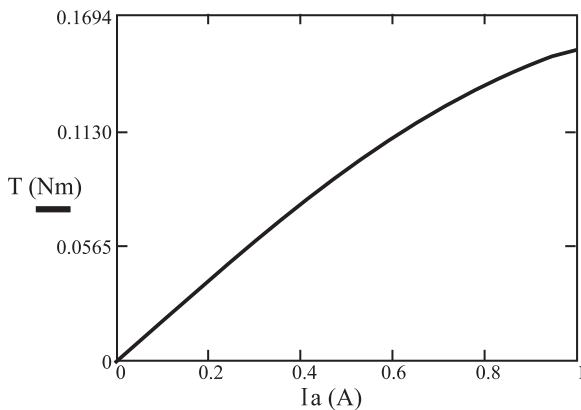


Figura 2. Curva de carga en el eje del generador síncrono

B) El Controlador de carga electrónico.

El triodo para corriente alterna (TRIAC) es un dispositivo semiconductor bidireccional que permite conmutar la corriente alterna de manera que actúa como un interruptor estático que posee tres terminales como se muestra en la figura 3. Cuando se presenta una

tensión más positiva en T2, la corriente fluye de T2 a T1 y cuando la tensión es más positiva en T1, la corriente fluye de T1 a T2. El modo de conducción y de bloqueo de este dispositivo puede controlarse por medio de una tensión de disparo que se aplique en la terminal G. La regulación de tensión se obtiene controlando este disparo en ambos semiciclos mediante un circuito sincronizado con la fuente de corriente alterna (CA) para producir la conducción del TRIAC en el instante deseado.

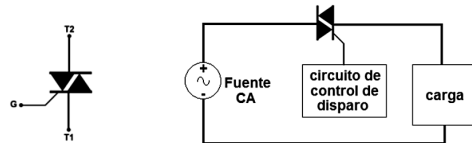


Figura 3. Símbolo y diagrama de un regulador básico.

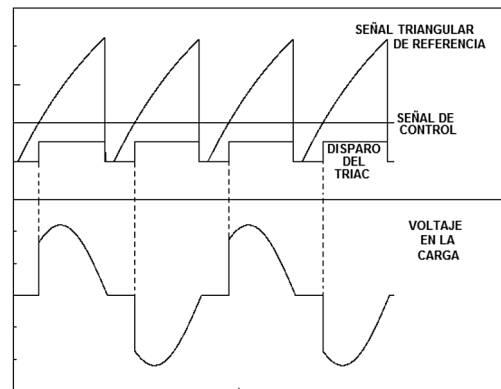


Figura 4. Control de ángulo de disparo.

En la figura 4 se muestra un ejemplo de cómo se lleva a cabo la señal de disparo en el TRIAC para regular la tensión aplicada en la carga. En la parte superior de la figura se puede apreciar la señal triangular de referencia proveniente de un circuito RC, la cual está sincronizada con la forma de onda de la fuente; esta señal se compara con un voltaje de control proveniente del usuario de manera que al tener un voltaje de referencia superior al de control, se produce un nivel alto en la señal de disparo del TRIAC aplicado a la compuerta. Este hecho ocasiona que el dispositivo entre en conducción permitiendo que se transfiera potencia a la carga en el momento de disparo.

Este método permite tener un control del ángulo de disparo a partir de un nivel de voltaje de control [6].

De las gráficas se deduce que entre más aumente el voltaje de control, menor será la transferencia de potencia hacia la carga. El voltaje RMS transferido a la carga se obtiene de la ecuación 7, el cual depende del ángulo de disparo α .

$$V_{RMS} = \frac{E_{max}}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (7)$$

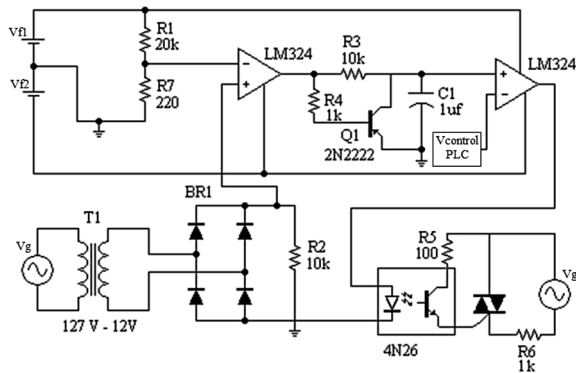


Figura 5. Circuito de disparo y regulador de voltaje.

Materiales y métodos

Para regular la potencia transferida del generador hacia la carga, se diseña la tarjeta electrónica que se muestra en la figura 5. En la parte inferior del circuito se observa la presencia de un transformador cuya finalidad es la de aislar la tensión del generador y obtener una muestra que permita transformarse en la señal triangular de referencia de la figura 4. A partir de ésta y de la señal de control se dispara el TRIAC, permitiendo variar la potencia transferida. El tiempo de disparo se determina mediante:

$$t = -\ln\left(\frac{V_c - V}{-V}\right)RC \tag{8}$$

Una vez calculado el tiempo, se emplea la ecuación 9 que determina el ángulo de disparo del TRIAC, necesario para el cálculo del voltaje RMS en la carga resistiva de acuerdo con la ecuación 7, en donde la frecuencia se obtiene por la información que tiene la señal senoidal proveniente del generador de acuerdo con la ecuación 1.

$$\alpha = 2\pi f t \tag{9}$$

La tensión que la máquina síncrona tiene en las terminales de línea es un parámetro importante de medir y se logra con la señal de muestra que se obtiene del transformador pasándola por un rectificador y un filtro capacitivo de manera que se obtenga la tensión máxima que permita obtener el valor RMS por la expresión:

$$V_{RMS} = 0.707E_{max} \tag{10}$$

La potencia que se transfiere del motor de prueba al generador se analiza con los parámetros eléctricos de voltaje, corriente y el factor de potencia (FP), este último es un indicador que depende directamente del nivel del contenido armónico de la corriente por la deformación de la señal según sea el ángulo de disparo

α . El factor de potencia se obtiene a partir de análisis asistido por computadora empleando el software de diseño PSPICE, donde se lleva a cabo el estudio para cada uno de los ángulos de disparo que se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. FP para cada valor de ángulo de disparo.

α (grados)	FP	α (grados)	FP
10	1	100	.805
20	.996	110	.761
30	.988	120	.718
40	.977	130	.65
50	.963	140	.598
60	.945	150	.517
70	.913	160	.449
80	.87	170	.372
90	.848		

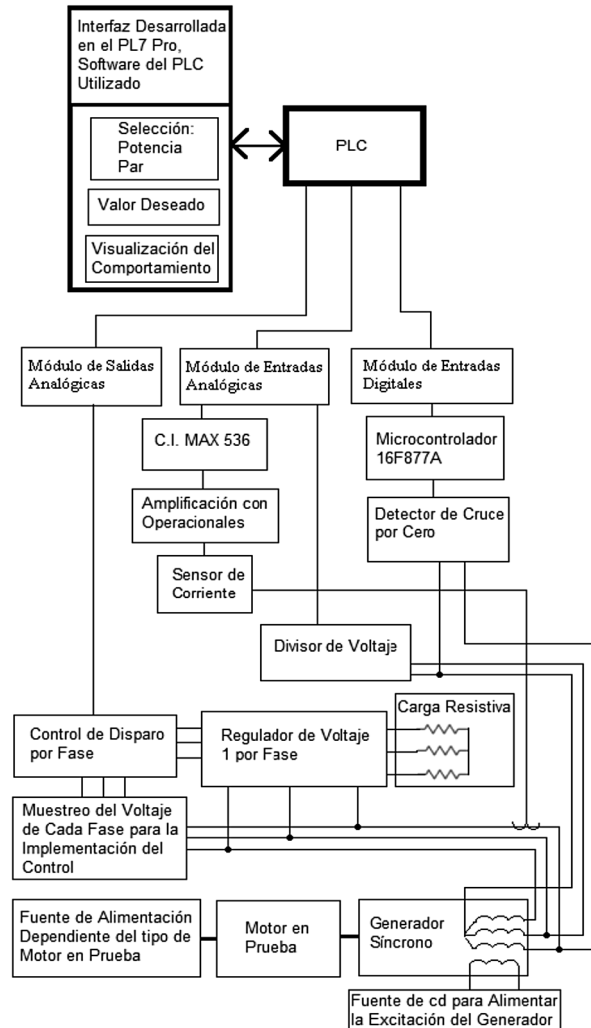


Figura 6. Diagrama esquemático del simulador de cargas.

El cálculo de la potencia eléctrica por fase P de la máquina síncrona está dado por la expresión:

$$P = V \cdot I \cdot FP \quad (11)$$

La adquisición de datos y tratamiento de los mismos son realizados por un dispositivo denominado controlador lógico programable (PLC). Se emplea el modelo TSX 37-21 de Telemecanique el cual tiene capacidad de análisis matemático [8], y los módulos siguientes: módulo digital de entradas TSX DMZ 28 DR, módulo analógico de entradas TSX ASZ 401 y módulo analógico de salidas TSX AEZ 801.

En la figura 6 se muestra un diagrama a bloques del sistema completo del simulador de cargas integrando el PLC, módulos de entradas, módulo de salidas y otras tarjetas electrónicas de adquisición de datos y de control de potencia.

El sistema cuenta con el desarrollo de pantallas gráficas que permiten monitorear los parámetros de par, potencia y velocidad del motor de prueba, además de visualizar el comportamiento de esta máquina ante diferentes condiciones de operación previamente establecidas por el usuario.

Resultados y discusión

La interfaz gráfica desarrollada del simulador de cargas de motores eléctricos permite monitorear las variables de salida del motor de prueba; esto es, la velocidad, el par y la potencia desarrollada. A través de las pantallas se puede variar la carga asignada al generador y a la vez al motor, de tal forma que se tiene control sobre la carga o la potencia del mismo. La figura 7 muestra el comportamiento del motor de prueba ante variaciones en la carga. Dicho comportamiento debe estar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P = T \cdot S \quad (12)$$

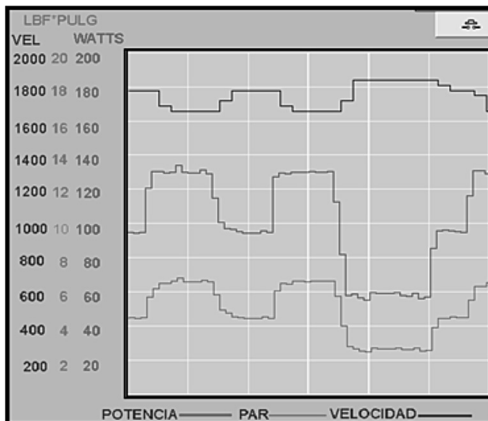


Figura 7. Gráficas de Potencia, par y velocidad

En la figura 7 se puede apreciar que ante cualquier aumento en la carga del motor, tendremos aumento tanto en el par como en la potencia desarrollada y en consecuencia una disminución en la velocidad, y por el contrario; una disminución en el par origina disminución en la potencia y aumento en la velocidad.

El diseño de este equipo se realizó de manera que mediante una consigna establecida por el usuario, se mantenga ya sea la potencia constante o el par constante. De la ecuación 12 se mantendrá un parámetro fijo mientras que los otros podrán variar para compensar el valor asignado.

A continuación se describen las pruebas realizadas en un motor de CD de 186.5 W (¼ HP) y 120 V en los regímenes de potencia constante y de par constante.

A) Operación a potencia constante.

En la figura 8 se observa una prueba a potencia constante, en donde se fija una consigna de 100 W. Al inicio se tiene una velocidad de 1166 RPM y un par de 0.7683 Nm (6.8 lbf-pulg). En seguida se realiza una perturbación ocasionada por el controlador del motor el cual produce un aumento en la velocidad hasta 1844 RPM, este escalón en velocidad origina un aumento en la potencia y en el par; sin embargo el sistema desarrollado permite compensar esta variación de modo que se mantenga constante la potencia a 130 W, el ajuste que produce el sistema en el par es de 0.4858 Nm (4.3 lbf-pulg). En la gráfica se muestran dos cambios más en la velocidad en donde se puede apreciar la relación que se mantiene con la ecuación 12, esto es; para que se mantenga la potencia constante, cualquier incremento en la velocidad deberá originar un decremento en el par, y el decremento en la velocidad producirá un aumento en el par. Se debe notar que ante cualquier cambio en la velocidad, el par debe estabilizarse al valor de consigna, que en este caso es de 100 W.

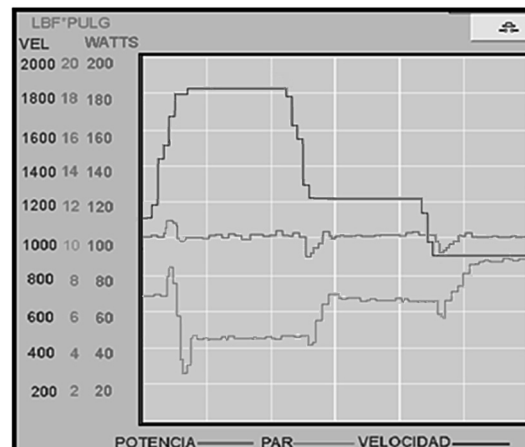


Figura 8. Potencia constante. Eje x 10 s/div.

B) Operación a par constante.

En la figura 9 se aprecia una prueba realizada a par constante en donde se fija como consigna una carga definida por el par de 0.6779 Nm (6 lbf-pul). La prueba inicia con una velocidad en el motor de 1200 RPM, y que al aplicarle la carga señalada anteriormente desarrolla una potencia de 90.8 W. Enseguida se le provoca la perturbación al sistema con un incremento en la velocidad hasta llegar a 1600 RPM, y al igual que la prueba anterior, se espera un incremento tanto en la potencia como en el par. Dado que el sistema está definido para trabajar a par constante, este realiza la compensación necesaria para mantener la misma consigna, así que para mantener 0.6779 Nm (6 lbf-pul) a la velocidad de 1600 RMP, el sistema ajusta la potencia desarrollada a 121 W. En la figura 9 se presentan dos variaciones en la velocidad del motor y de acuerdo con la ecuación 12, se aprecia que para mantener el par constante, cualquier incremento en la velocidad deberá originar un incremento en la potencia, y el decremento en la velocidad producirá por igual un decremento en la potencia.

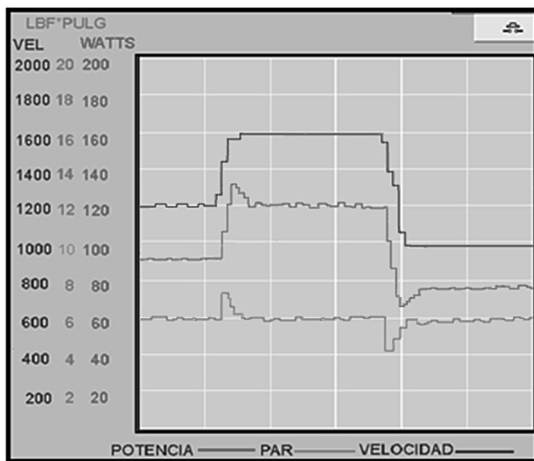


Figura 9. Par constante. Eje x 10 s/div.

En la figura 10 se observa el comportamiento del motor cuando se somete a una prueba denominada "CARGA AUTOMÁTICA". Esta prueba consiste en efectuar incrementos graduales en la potencia cada segundo, de manera que se presentan 60 escalones. La prueba tiene por lo tanto una duración de un minuto.

En esta prueba se puede apreciar el comportamiento de la velocidad del motor cuando se tiene carga variable, se presentan gráficas de par contra velocidad, potencia contra velocidad y respuesta del control contra velocidad, además de mostrar variables del sistema en visualizadores numéricos. Esta prueba nos permite obtener el porcentaje de regulación de velocidad al trabajar en vacío y a plena carga.

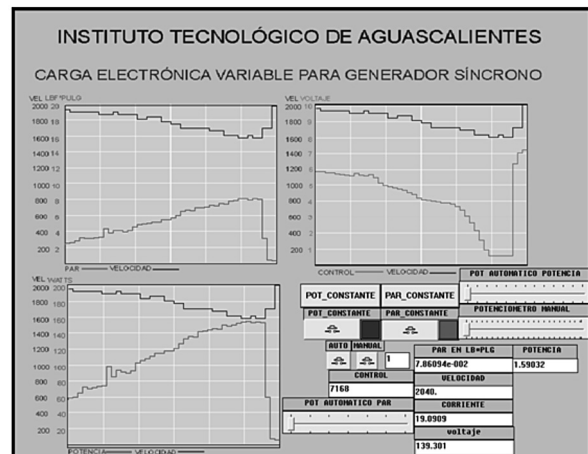


Figura 10. Prueba de "CARGA AUTOMÁTICA".

Conclusiones

Al utilizar el generador síncrono para implementar el desarrollo del simulador de carga, permite superar por mucho las características del trabajo desarrollado en [2-3-4], ya que este presenta pruebas realizadas con una potencia máxima de 60 W, en cambio las pruebas realizadas con el generador síncrono trabajando a un 75% de su capacidad permiten obtener una potencia de salida de 183 W.

Existen equipos de laboratorio llamados electrodinamómetros que nos permiten ejercer carga mecánica a los motores eléctricos y que trabajan en lazo abierto, este comportamiento deja muy claro que es un sistema susceptible a las perturbaciones.

El desarrollo de la carga electrónica controlada permite establecer asignaciones de par o de potencia al simulador de carga de motores eléctricos de tal manera que se obtienen las siguientes ventajas con respecto al electrodinamómetro: el simulador trabaja en lazo cerrado y el control sintonizado permite obtener cualquier valor que este dentro del rango de trabajo con exactitud, además de que es flexible y si existe alguna perturbación como lo puede ser una modificación en la velocidad, el control es capaz de superarla, esto se puede observar en la figura 8 donde el incremento gradual de la carga genera una disminución gradual de la velocidad, notándose que el decremento de esta, genera una disminución de voltaje de salida que no afecta el crecimiento proporcional de la potencia, constatando con esto que el controlador supera esos cambios y realiza las adecuaciones de manera precisa.

Una característica muy importante del simulador es que permite someter al motor de prueba a dos regímenes de trabajo, que son a potencia constante y a par constante, además de que la interfaz nos permite visualizar el valor de los parámetros más importantes

del motor de prueba, que son la velocidad, el par y la potencia que está demandando esta máquina.

Los trabajos desarrollados en [2-3-4] presentan pruebas cercanas al valor máximo teórico que plantea, obteniendo una potencia de salida máxima de 122 W. Por lo tanto el generador síncrono nos permite obtener un 50% más de potencia que con un generador de C.D., el hecho de que se pueda manejar una mayor cantidad de potencia y por lo tanto de par, es debido a las 3 fases del generador, ya que maneja 3 circuitos iguales independientes que permiten un mayor manejo de potencia.

El controlador empleado (programado en el PLC) del tipo PI es capaz de estabilizar un cambio en el valor de par o potencia solicitado de una manera precisa y estable [7], superando el inconveniente del sistema manual realizado en los electrodinómetros que causa inestabilidad. El tiempo máximo requerido por el controlador para estabilizar un cambio es de 2 a 3 segundos.

Referencias

- [1] Stephen, J. C. (1995), *Máquinas Eléctricas*, Mc Graw Hill (México).
- [2] Quiroz P. D., (2007), *Simulador de cargas para motores eléctricos*, Tesis, Instituto Tecnológico de Aguascalientes (México)
- [3] Díaz de León G. R. A., Altamirano R. D. I., Martín G. A., Castañeda R. L. A., Esparza G. M. S. (2008), “Simulador de cargas para motores eléctricos” *6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering Research*. November (México)
- [4] Fuentes, M. J. A., (2009), *Emulador de Carga para un generador de CD de 120W*, Tesis, Instituto Tecnológico de Aguascalientes (México).
- [5] Castañeda R. L.A., Esparza G. M.S., (2010), “Diseño de un banco de pruebas para motores eléctricos”, Reunión de verano de potencia, RVP-AI-2010, IEEE (México).
- [6] Timothy J. M., (2006), *Electrónica Industrial Moderna*, Prentice Hall (México).
- [7] Maldonado P.E., Acevedo J. M., Fernández S. C., Armesto Q. J.I. (2010), *Autómatas Programables y sistemas de automatización*, Alfaomega (México).
- [8] Shneider Electric, “Manual de Referencia PL7 Micro / Junior / Pro, descripción detallada de las instrucciones y funciones”, disponible en: http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/28_000/FA28243/es_ES/PL7%20v45%20Instrucciones%20PL7.pdf

Recibido: 14 de marzo de 2013

Aceptado: 30 de septiembre de 2014