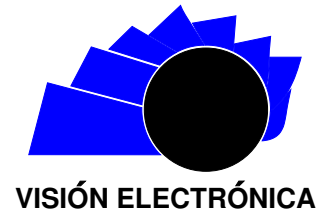




Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/index>



VISIÓN DE CASO

Control de un motor de corriente continua de 900 hp

Control of a 900 hp direct current motor

Juan D. Rivera N.¹, Juan C. Castro G.² John H. Sandoval L.³

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado:07/02/2016

Recibido:12/03/2016

Aceptado:17/03/2016

Palabras clave:

Control PI

Drive

Motor DC

Tacométrica

Tiristor.



Keywords:

PI Control

Drive

DC motor

Tachometer

Thyristor.

RESUMEN

Se presenta la metodología y las experiencias llevadas a cabo en la puesta en funcionamiento de un motor DC de 900 hp, empleando un Drive Fincor de 842 kVA. Se inicia estudiando el principio de funcionamiento de los principales elementos del sistema de control: puente rectificador controlado, tarjeta de alimentación del campo, tarjeta de señales de referencia y realimentación y circuitos de potencia y control. Después, se realiza la descripción del funcionamiento del equipo a partir de un lazo cerrado de control con retroalimentación mediante una señal taquimétrica; finalmente, se presenta el ajuste de los parámetros análogos y digitales de la programación del Drive para operar en un rango de velocidad entre 900 y 1800 rpm, con una corriente de arranque máxima de 400 A y una rampa de 30 segundos para no sobrecargar la subestación de la instalación.

ABSTRACT

This article introduces the methodology and experiences carried out in a direct current operation of a 900 HP motor, by using an 842 kVA FINCOR DRIVE. It begins with the operation study principle of the control system as a rectifier bridge, the field supply board, the reference, feedback signal board, and also the power and control circuits. Then the equipment operation description is made from a closed loop feedback control by a tachometer signal. Finally, the adjustment of the analog and digital parameters for programming Drive appears to operate in a speed range from 900 to 1800 RPM, with a 400 A maximum starting current and a ramp of 30 seconds to void overloading the substation installation.

¹Ingeniero electromecánico, UPTC, investigador grupo GridsE, Escuela de Ingeniería Electromecánica UPTC, Duitama, Correo electrónico: juandavid.rivera@uptc.edu.co

²Ingeniero electricista, UPTC, docente Escuela de Ingeniería Electromecánica Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Seccional Facultad Duitama; coordinador grupo de investigación GridsE. Correo electrónico: juan.castrogaleano@uptc.edu.co

³Ingeniero electromecánico, UPTC, investigador grupo GridsE, Escuela Ingeniería Electromecánica UPTC Duitama, Correo electrónico: john.sandoval@uptc.edu.co

1. Introducción

El motor de corriente continua es una máquina rotativa adecuada para aplicaciones donde es requerida la variación de velocidad; sin embargo, necesita ciertas condiciones de alimentación para operar satisfactoriamente, lo cual implica la rectificación controlada de la tensión de campo y armadura [1], tanto en el régimen permanente como en el transitorio, presentado en el periodo de arranque de la máquina. En el presente artículo, se presenta el principio de funcionamiento de un Drive de potencia Fincor modelo 3167S8003A que controla el arranque, parada y velocidad de un motor de corriente continua de 900hp; este opera como máquina motriz en un grupo motor-generator de 2500 kVA, empleado como fuente para la realización de pruebas de alta tensión en transformadores de potencia, donde es requerida una operación en un régimen de velocidad que varía entre 900 y 1800 rpm para obtener frecuencias entre 60 y 120 Hz a la salida del generador [2].

Los dispositivos que componen el Drive (Personality board, Snubber/trigger board, Field supply control BD, Relay/Interface board) son descritos con detalle a lo largo del documento, se presentan las características físicas, protocolos de programación y puesta a punto de cada elemento, los cuales se distribuyen en elementos de electrónica de potencia y digital. Cada una de las tarjetas hace parte de un sistema interconectado que registra y monitorea la operación general del lazo de control [3], la maniobra del sistema por parte del usuario se realiza mediante la programación de parámetros análogos y digitales distribuidos en el sistema de control proporcional e integral PI [4]. Con la realización del protocolo de instalación y programación se consolida la disponibilidad de control y operación del motor de corriente continua en régimen transitorio y permanente.

2. Materiales y métodos

2.1. Motor de corriente continua

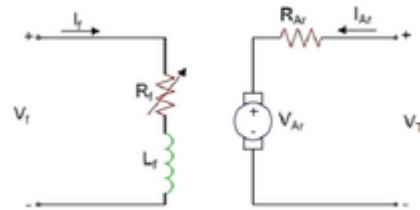
El motor de corriente continua, o motor DC, es una máquina eléctrica compuesta por dos devanados: uno de campo, ubicado en la parte estática del motor o estator, y otro de armadura, ubicado en el devanado del rotor, el cual se conecta al exterior por medio del contacto de escobillas [1]. El funcionamiento de la máquina consiste en proporcionar una señal de potencia DC tanto al devanado de campo, como al devanado de armadura y por efectos de la ley de Ampere, al hacer fluir una corriente por un hilo conductor (armadura) que corta un campo magnético (campo), se genera una fuerza y un

par mecánico que hace efectiva la rotación de motor [5].

El modo de conectar los dos devanados del motor, dan origen a cuatro formas posibles de excitar la máquina: motor DC con excitación separada, en derivación, en serie y compuesta.

El motor empleado en este trabajo corresponde a una máquina con excitación separada [6], su esquema se presenta en la Figura 1 y en la Figura 2.

Figura 1: Motor DC



Fuente: elaboración propia.

En este caso el campo es suministrado por una tarjeta electrónica y la armadura es alimentada con un puente rectificador controlado.

Figura 2: Motor DC



Fuente: elaboración propia.

Las características del motor se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Características motor DC

Característica	Magnitud
Potencia	700/700/550 kW
Tensión armadura	500/500/500 V
Corriente armadura	1495/1174 A
Tensión campo	300 V
Corriente de campo	12,7/8,4/5,8 A
Velocidad	900/1300/1800 rpm

Fuente: elaboración propia.

La fuerza electromotriz presentada en la armadura del motor, representada mediante la tensión E_A , se relaciona con el flujo generado por el devanado de campo y la velocidad del motor mediante la ecuación (1), [1].

$$E_A = k\phi n \quad (1)$$

Donde:

E_A : Tensión interna en armadura. (V).

K : Constante constructiva de la máquina.

ϕ : Flujo de campo. (Wb).

n : Velocidad del motor. (rpm).

Debido a la componente resistiva del devanado de armadura, la tensión en bornes del motor se relaciona con la tensión interna mediante la ecuación (2), [5].

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad (2)$$

Donde:

E_A : Tensión interna. (V).

I_A : Corriente de armadura. (A).

R_A : Resistencia de armadura. (Ω).

A partir de las ecuaciones (1) y (2), es posible obtener una expresión para la velocidad del motor, la cual se obtiene reemplazando (1) en (2), y despejando para la velocidad n ; este modelo matemático se presenta en la ecuación (3) [6].

$$n = \frac{V_T - I_A R_A}{k\phi} \quad (3)$$

De la ecuación (3) se concluye que la variación de velocidad es posible modificando la tensión de armadura o el flujo mediante la corriente de campo, siendo estos directa e inversamente proporcionales respectivamente; dicha variación se hace efectiva mediante la operación del Drive de potencia [7], el cual mantiene un campo constante y una tensión de armadura que varía entre 0 y 500V DC.

2.2. Drive de potencia Fincor modelo 3167S8003A

Actualmente, la mejor alternativa para controlar motores de corriente continua de gran potencia es mediante el empleo de un Drive que opera como arrancador y variador de velocidad [8], rectificando la entrada trifásica de voltaje alterno y suministrando una tensión DC, tanto para el campo como para la armadura [9]; también contiene transformadores de corriente y circuitos de protección para el motor y para el Drive, tanto en el régimen transitorio como en el régimen permanente. Gracias a los recientes avances en la electrónica de potencia, se han mejorado los sistemas de control de lazo abierto, las recientes configuraciones

de lazo cerrado han resultado ser eficientes [10], óptimas y muy confiables. Las funciones de un Drive son las siguientes:

- Realizar múltiples operaciones de arranque y parada de forma suave
- Realizar control de velocidad en la operación del motor.
- Proteger al motor contra daños debidos a cortocircuito en el equipo.
- Proteger al motor contra daños debidos a sobrecargas prolongadas.
- Proteger al motor contra daños por altas corrientes de arranque.
- Las características eléctricas del Drive bajo estudio se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Características Drive Fincor

Característica	Valor
Referencia	3167S8003A
Potencia	800 HP, 842 kVA
Alimentación	460/3/60
Tensión entrada	460 V
Tensión salida	500 V
Corriente entrada	1,080 A
Corriente salida	1,280 A
Tensión Campo	300 V

Fuente: elaboración propia.

2.3. Principio de funcionamiento del DRIVE

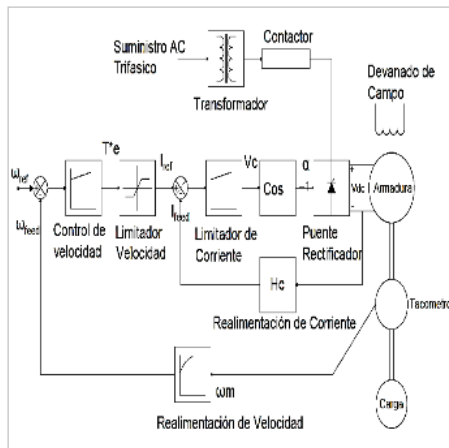
La función del Drive es realizar control sobre el motor cumpliendo las funciones de un arrancador suave y las de un variador de velocidad; en función de ello, este dispone de elementos que componen un tipo de control, el cual utiliza el sistema de lazo cerrado de realimentación [11]. La distribución de los componentes se presenta en la Figura 3.

En la Figura 2 se presenta la entrada trifásica de 440V, la cual ingresa al totalizador o protección principal; esta ingresa al puente rectificador controlado, cuya salida corresponde a la señal DC de armadura del motor que antes de ingresar al motor pasa por el contactor DC, mostrado en la parte inferior derecha. En la parte izquierda se presenta la interfaz usuario-máquina, la tarjeta de alimentación de campo y los transformadores de control y refrigeración del Drive.

Figura 3: Drive Fincor 3167S8003A

Fuente: elaboración propia.

El Drive utiliza un sistema de control PI, con un sistema de control de lazo cerrado con retroalimentación, que contiene un lazo interno de corriente y un lazo externo de velocidad, los cuales ejercen control sobre variable de velocidad, par y potencia [12]. El esquema del sistema de control se ilustra en la Figura 4.

Figura 4: Lazo cerrado con realimentación

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- ω_{ref} : velocidad de referencia.
- ω_{feed} : velocidad de realimentación.
- $T * e$: error de velocidad.
- I_{ref} : corriente de referencia.
- I_{feed} : corriente de realimentación
- α : ángulo de retraso de tiristor.

La etapa de control inicia con una señal de referencia de velocidad (ω_{ref}), la cual es controlada previamente por el usuario, en la mayoría de los casos por medio de un potenciómetro lineal que envía una señal de tensión

entre 0 y 10 VDC, proporcional a la velocidad; el valor típico de resistencia del potenciómetro es 10 k Ω . Esta señal es comparada permanentemente con la señal de realimentación (ω_{feed}), la cual es registrada directamente de las condiciones de funcionamiento del motor por medio de una tacométrica o sensor de velocidad; este hace parte del lazo externo de control de velocidad. La señal de tensión es comparada con la señal de referencia y la comparación de las señales corresponde a la señal de error $T * e$, la cual, por efectos del control, se mantiene en valores reducidos [13].

Luego de la comparación de las señales de referencia y realimentación, se procede a controlar la velocidad y mantenerla en el estado comandado; en seguida se comparan las modificaciones con señales límites, que son programadas como máximas y mínimas, para mantener la operación del conjunto en condiciones seguras. Terminado el lazo de velocidad, continúa el lazo de control de corriente, partiendo de la señal de referencia de corriente (I_{ref}), la cual, igualmente, se compara con la señal de realimentación (I_{feed}); esta hace parte del lazo interno de control de corriente y par mecánico. Al igual que la señal de velocidad, las señales de corriente son comparadas con el propósito de mantenerse dentro de los límites programados en el Drive y evitar las sobrecargas.

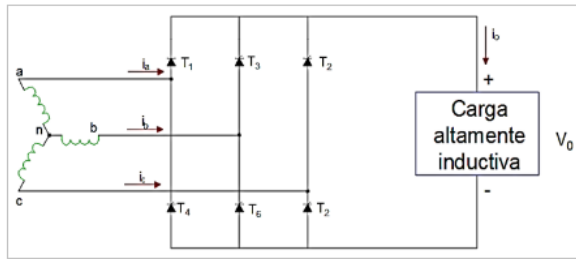
A partir de la señal de corriente se calculan los ángulos de disparo de los tiristores del puente rectificador, controlado a partir de la función Cos^{-1} [14]; de esta manera, se modifica la proporción de onda útil y por ende se cambia el valor RMS de la tensión de armadura, que de acuerdo con la ecuación (3) hace efectiva la variación de velocidad.

2.4. Elementos del sistema de control

El lazo cerrado con retroalimentación se compone de diferentes elementos que permiten transformar y registrar las señales de referencia y realimentación, las cuales tienen como propósito mantener el sistema estable y atendiendo a los requerimientos de operación comandados por el usuario. Los elementos que componen el sistema de control son:

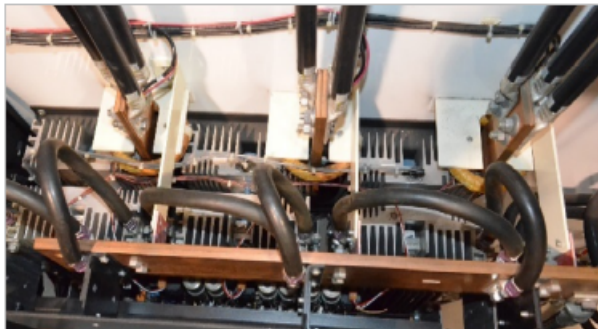
A. Puente rectificador controlado

Es uno de los elementos de electrónica de potencia principales del Drive, su función es realizar la conversión AC-DC de la señal de potencia de armadura del motor. En la figura 5 se presenta el esquema del puente rectificador controlado, [15].

Figura 5: Puente rectificador controlado

Fuente: elaboración propia.

El puente rectificador se compone de seis tiristores SCR (Rectificador Controlado de Silicio), los cuales rectifican la señal trifásica de entrada de 440 Vac, y, de acuerdo al ángulo de disparo de las compuertas, permite modificar la magnitud de la señal DC de salida. De acuerdo a la configuración del puente es permitido variar la polaridad de la tensión mas no el sentido del flujo de corriente en armadura, lo cual corresponde a un convertidor de dos cuadrantes [16]. En la figura 6, se presenta la entrada trifásica del puente junto con las barras que conectan la señal rectificada al devanado de armadura y los disipadores de calor de los tiristores.

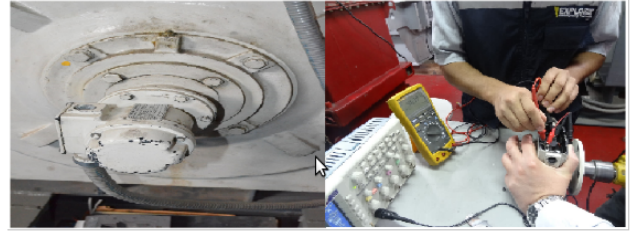
Figura 6: Módulo de puente

Fuente: elaboración propia.

La operación del puente depende del tratamiento de las señales de referencia y realimentación.

B. Sensor de velocidad

Mediante un sensor taquimétrico o un encoder, se obtiene una señal de retroalimentación para determinar la velocidad del motor. En este caso, se dispone de ambas posibilidades y se emplea una tacómetrica instalada en el motor como presenta la figura 7.

Figura 7: Sensor taquimétrico y pruebas

Fuente: elaboración propia.

La tacométrica consiste en un generador DC que se encuentra unido al eje principal del motor, cuya señal de tensión es directamente proporcional a la velocidad en una proporción de 60 mV/rpm, en este caso en un rango de 0 a 120 Vdc; la señal de salida fue normalizada entre 0 y 10 Vdc para poder ser comparada con la señal de referencia del potenciómetro. El tratamiento, comparación y cálculo del error del lazo cerrado se lleva a cabo en el control digital del Drive, [17].

C. Personality board 105845301

Esta tarjeta recibe las señales de referencia y retroalimentación del potenciómetro y del encoder o taquimétrica y suministra las señales análogas y digitales de salida de 24 Vdc, de monitoreo de la operación del Drive y del motor para el funcionamiento en condiciones normales y de falla; las señales digitales de monitoreo entre 0 y 10 Vdc para: At Speed, Drive running, alarm, Drive OK, overspeed, field loss, feedback loss y las señales análogas: motor armature current, tachometer generator voltage, armature voltage. En la Figura 8, se presenta la vista física de la tarjeta personalizable junto con la tarjeta de disparo de tiristores.

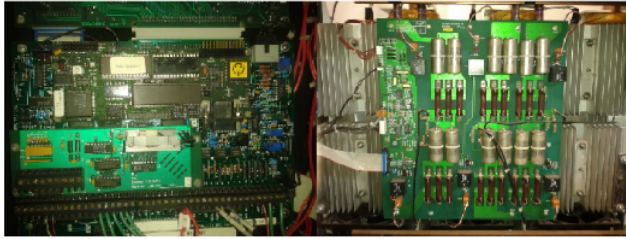
D. Snubber/trigger board no. 1055955

Esta tarjeta hace parte del lazo de cerrado de control, tiene como función el registro del estado del ángulo de retraso de los tiristores y la modificación de los ángulos cuando es necesario modificar la onda de salida. Se ubica en el módulo del puente rectificador controlado, recibiendo las señales de los transformadores de corriente que están en la entrada del Drive y la corriente de salida en DC para la armadura que hace parte de lazo interno de retroalimentación de corriente; en la Figura 8 se presenta este elemento.

En la parte posterior de la tarjeta se encuentran las salidas para las compuertas (Gates) de cada uno de los tiristores. También se encuentra el potenciómetro de potencia para ajustar la capacidad del motor a operar;

por lo demás, no es necesario ni recomendable intervenir este dispositivo.

Figura 8: Tarjetas personality board, snubber/trigger



Fuente: elaboración propia.

E. Field supply control bd. assy no. 10446001

Esta tarjeta cumple la función de suministrar la alimentación de campo del motor, se alimenta a una tensión de 440 Vac suministrando tensión rectificada que llega hasta 300 Vdc. Para la puesta en servicio se ajustó la corriente de campo mediante un procedimiento de ensayo con rotor bloqueado; en la Figura 9 se presenta la vista exterior de la tarjeta de alimentación de campo junto con la tarjeta de interface.

F. Relay/Interface board

Esta tarjeta enlaza las señales de electrónica de potencia con las de electrónica digital; además, permite la conexión del circuito de mando que incluye: arranque, parada, contacto de protección térmica, parada de emergencia. Para proteger dicha tarjeta, se instalaron relés auxiliares para los pilotos de señalización de arranque, parada, sobrecarga. En la figura 9, se presenta la vista general de la tarjeta.

Figura 9: Tarjetas Field supply- Relay/Interface



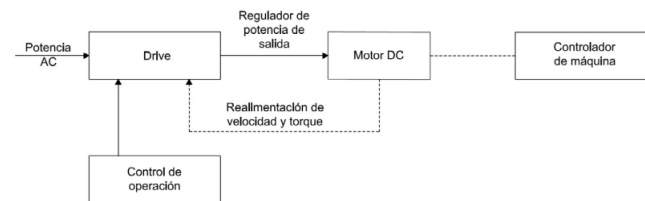
Fuente: elaboración propia.

3. Pruebas y resultados

3.1. Puesta a punto del Drive Fincor

La configuración del Drive, de acuerdo a las características del motor y las condiciones de la instalación de empresa, consistió en ajustar un total de 197 parámetros, análogos y digitales, los cuales son modificables por medio de la interface de comunicación ubicada en el módulo principal del equipo, el mismo donde se encuentra el microprocesador principal del Drive. El principio de operación a partir de la modificación de parámetros se ilustra en el esquema de la Figura 10.

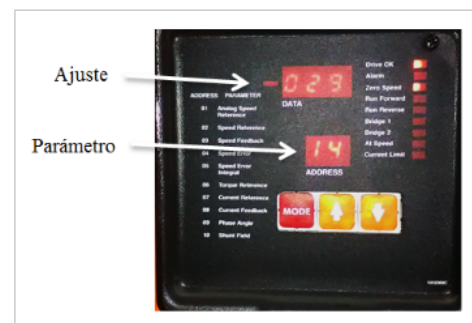
Figura 10: Principio de configuración



Fuente: elaboración propia.

El acceso del usuario a los parámetros de programación se realiza mediante la interface de usuario-maquina, a través de una pantalla que indica los parámetros y un teclado de fácil operación como se indica en la figura 11.

Figura 11: Interfaz H-M



Fuente: elaboración propia.

3.2. Parámetros de configuración

El control y monitoreo de todas las variables del lazo cerrado descrito se realiza a partir de la configuración de parámetros entre los que se encuentran las señales de referencia, los límites de corriente y velocidad, las señales

de retroalimentación, errores y las señales de tensiones y corriente del proceso. Dichos parámetros se distribuyen de la siguiente manera:

A. Parámetros numéricos de solo lectura

(01-19) son valores de monitoreo en tiempo real del funcionamiento del Drive, solo son de lectura y tiene variaciones que van de -999 hasta +999, por ejemplo, tensión de referencia, realimentación, error de señales, ángulos de disparo de SCR.

B. Parámetros numéricos lectura-escritura

(20-99) son valores ajustables por el usuario para las condiciones específicas de funcionamiento, estos varían entre -999 y +999; entre los más importantes se tienen: tiempo de aceleración y desaceleración, arranque y parada, límites de velocidad, corriente y tiempo de sobrecarga.

Tabla 3: Configuración de parámetros de Drive

Parámetro	Nombre	Valor
24	Velocidad máxima	805
25	Velocidad mínima	0
26	Nivel de velocidad sentido #1	999
27	Nivel de velocidad sentido #2	999
28	Referencia de par prestablecida	0
29	Referencia de velocidad definitiva	30
30	Arrancador de corriente	999
31	Corriente limite puente #1	100
32	Corriente limite puente #2	0
33	Umbral de integración de sobrecarga	750
50	Código de falla	0
51	Tiempo de rampa aceleración directa	90
52	Tiempo de rampa desaceleración directa	90
55	Ganancia proporcional de lazo de velocidad	40
56	Ganancia integral de lazo de velocidad	40
57	Factor de escala análogo	202
58	Compensación IR	0
59	Cambiador de corriente pendiente #1	0
60	Cambiador de corriente pendiente #2	0
92	Byte de salida de estado	194
93	Byte de función de led	64
94	Función de salida ST1	106
95	Función da salida ST2	100
96	Dirección	96
97	Nivel 1 de seguridad	0
98	Revisión de software procesador 1	19
99	Revisión de software procesador 2	10
151	Selección de cuadrante	1

C. Parámetros de bit de lectura

(100-131) son parámetros de lectura que solo pueden tomar valores lógicos de alto y bajo. Muestran los valores de activación de determinadas funciones como: arranque, parada, velocidad establecida alcanzada, sobrecarga, funcionamiento normal y fallas.

C. Parámetros de bit de lectura-escritura

(150-197) son parámetros que pueden configurar los estados lógicos de alto y bajo, habilitan y deshabilitan opciones de acuerdo a las necesidades del usuario; entre estos están: modo de operación, tipo de señal de retroalimentación, salidas lógicas de señalización.

D. Programación de parámetros

La configuración de los parámetros más importantes del sistema de control se relaciona en la Tabla 3.

4. Conclusiones

A partir del análisis de las características del motor DC, de las condiciones de operación del mismo y la capacidad de la subestación de la empresa, fue posible realizar la instalación y puesta en servicio del Drive Fincor para el arranque controlado del motor y una operación controlada del mismo.

La operación del Drive de acuerdo a la metodología de un control PI, proporcional-integral, es un tipo de control que registra, realimenta y compara permanentemente las variables eléctricas y mecánicas de funcionamiento del motor, lo que le permite hacer un adecuado control sobre el régimen de funcionamiento del mismo. Para ejecutar el ciclo del lazo cerrado, el Drive requiere de módulos de rectificación, protección y control; para el caso específico del estudio el montaje y programación realizada, es una alternativa adecuada para suministrar energía mecánica a un generador trifásico, el cual se destina como fuente de tensiones en frecuencia variable; estas son necesarias para aplicar pruebas a transformadores de potencia.

El motor DC ofrece ciertas ventajas de funcionamiento sobre los ampliamente utilizados motores AC, es por ello que determinados procesos industriales que requieren velocidades variables son más fáciles de implementar utilizando máquinas de corriente continua.

Debido a la naturaleza de las señales y a las condiciones de arranque de la máquina, se hace necesario implementar todos estos requerimientos ya que son exigidos por el Drive. El equipo mantiene una comunicación relativamente sencilla con el operario permitiéndole acceder al monitoreo y configuración de muchas variables del proceso, lo cual representa un recurso útil y de aplicación inmediata en la industria. Una de las principales recomendaciones al implementar este tipo de sistemas corresponde al uso de conexiones separadas para las señales AC y DC, sobre todo para las señales de referencia y realimentación, es

decir, el potenciómetro y la taquimétrica o encoder, ya que estas señales son de 10Vdc las que son fácilmente contaminadas por señales electrodinámicas o electrostáticas circundantes. Cuando estas señales son instaladas a grandes distancias del Drive es necesario el uso de cable apantallado evitando el paso por borneras, las cuales incurren en caídas de tensión y afectan la señal de entrada al Drive.

5. Reconocimientos

Los autores agradecen los aportes de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), al Grupo de Investigación y Desarrollo en Sistemas Electromecánico GridsE y a la empresa INDUSTRIAS EXPLORER S.A.S. por el apoyo y financiamiento de este proyecto de investigación y desarrollo.

Referencias

- [1] K. U. Fitzgerald, "Electric Machinery". New York, McGraw-Hill, 2003.
- [2] H. Mohseni, A. Shaygani Aknal, et al., "Induced Voltage Test of Distribution Transformers Using Static Frequency Inverters". *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp 1-5, April, 2012.
- [3] M. Nehal, F. Sohair, et al., "Adaptive PID control of a stepper motor driving". *Alexandria Engineering Journal*, vol 50, no 2, pp. 127-136, June, 2011.
- [4] K. Sunderaswaran y M. Vasu, "Genetic Tuning of PI controller for Speed Control of DC Motor Drive". *IEEE International Conference on Industrial Technology*, vol 2, pp. 521-525, January, 2000.
- [5] L. Shengqiang, L. Xiaodong, X Wilsu, "Modeling DC Motor Drive Systems in Power System Dynamic Studies". *IEEE/IAS 50th Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, pp. 1-11, May, 2014.
- [6] Hayt, Kemerly, "Análisis de circuitos en ingeniería". México D.F., McGraw-Hill, 2007.
- [7] S. Stephen, J. Ben, T. Ruban, "Improved Control Strategy on Buck-Boost Converter Fed DC Motor". *International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering*, pp. 73-77, December, 2011.
- [8] X. Lai, J Guo, Y. Cao, W. Yu, "A novel digital soft-start circuit for dc-dc switching regulator" 6th international conference on ASICON, pp. 554 – 558, October, 2005.
- [9] I. Shirazul, B. Farhad *et al.*, "Stability Analysis of a Three-phase Converter Controlled DC Motor Drive". *IEEE Third International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies (ACCT)*, pp. 101-106, April, 2013.
- [10] A. Malvino, "Principio de Electrónica". Madrid, McGraw-Hill, 2000.
- [11] G. Konstantinos et al., "Type-III closed loop control systems-Digital PID controller design". *Journal of Process Control*, vol. 23, pp. 1401-1414, 2013.
- [12] S. Subhajit, T. Tanesha, et al., "Design and simulation of speed controller using ac-dc boost converter for dc motor Drive with soft starter". *IEEE International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, pp. 1230-1234, April, 2013.
- [13] A. A. Nabil, "Modeling and simulation of ac-dc buck-boost converter fed dc motor with uniform PWM technique". *Electric Power System Research journal*, vol 73, Issue 3, pp.363-372, March, 2005.
- [14] A. T. Alexandridis, "Optimal Nonlinear Firing Angle Control of Converter-Fed DC Drive Systems". *IEEE Proc-Electr Power Appl*, vol 145, no 3, pp. 217-222, May, 1998.
- [15] R. Muhammad, "Electrónica de potencia". Londres: Ed Prentice Hall, 1995.
- [16] Ne.Mohan, T. M. Undeland, *et al.*, "Electrónica de Potencia, convertidores, aplicaciones y diseño". México D.F., Editorial McGraw Hill, 2009.
- [17] S. Islam, F. I. Bakhsh, et al., "Stability Analysis of Three-phase Converter Controlled DC Motor Drive". *Third International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, pp. 101–106, April, 2013.