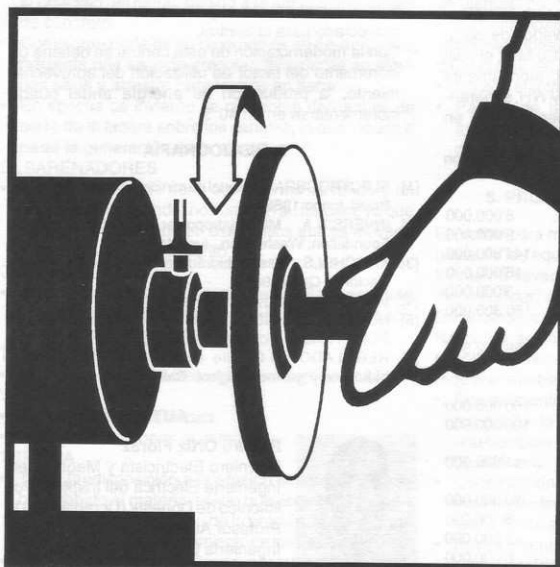


Regulación de velocidad del motor de corriente continua con excitación independiente

Experiencia utilizando un controlador lógico programable



RESUMEN

En este artículo se presentan las experiencias obtenidas en la regulación de la velocidad de rotación de un motor de corriente continua de 7.5 HP, con excitación independiente, empleando como controlador un autómata programable SIMATIC 95-U de SIEMENS. El sistema está implementado con dos lazos digitales de regulación, un lazo interno de corriente y un lazo externo de velocidad.

ABSTRACT

This paper presents the experiences about the speed control of a 7.5 HP D.C. motor, with a SIEMENS - PLC type S5-95 U working as the controller. The control system was implemented with two digital control loops, an internal armatura current control loop and external speed loop.

1. INTRODUCCIÓN

Los controladores lógicos programables (PLCs) han ido ganando espacio en tareas inherentes a la automatización de procesos industriales. Inicialmente los PLCs se concibieron para desarrollar tareas de tipo secuencial, incluyendo funciones de mando, alarmas y protección. Sin embargo, a los pocos años de su aparición en el mercado, fueron desarrollados PLCs, que estaban en capacidad, no sólo de ejecutar labores secuenciales cada vez más complejas, sino que también podían realizar tratamiento de señales analógicas en tiempo real. Esto último propició la utilización de esta nueva gama de PLCs en lazos de

□ Hernando Vásquez P.
Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Universidad del Valle

□ Andrés Felipe Jaramillo S.
Ingeniero Electricista
GERS Ltda. - Cali

□ Helmer Muñoz V.
Ingeniero Electricista
KAMATI Ltda. - Cali

regulación y control, como también la interacción de señales analógicas en la ejecución de procesos secuenciales, convirtiéndose, de esta forma, en una poderosa herramienta para la automatización de procesos. La integración de diversas funciones en un sólo equipo, disminuye la cantidad de elementos necesarios para automatizar un proceso, lo cual reduce el costo de la instalación, a la vez que aumenta la confiabilidad de la misma.

Teniendo en cuenta el desarrollo actual de los PLCs, se decidió experimentar en la regulación de velocidad de un motor de corriente continua con excitación independiente, con el propósito de evaluar el desempeño del autómata seleccionado para las acciones de regulación, mando y protección del motor.

Para la regulación de velocidad se programó en el PLC un esquema de regulación en cascada, el cual consiste en una bucla interna de corriente de armadura y una bucla externa de velocidad angular.

Las funciones de mando incluyen las secuencias de arranque y parada de la máquina y la acción de parada de emergencia.

Se implementaron también, en el autómata programable, protecciones de sobrecorriente, sobrevelocidad y ausencia de corriente de campo.

Los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto, muestran la factibilidad de utilizar este tipo de autómata, como elemento central de mando y regulación en procesos exigentes en velocidad de respuesta.

2. MODELAMIENTO DEL SISTEMA

En la figura 1 se presenta el diagrama implementado de bloques del sistema de control en cascada. Se observa que los elementos de la planta G1, G2 y G3 presentan interacciones que deben ser simplificadas, empleando álgebra de bloques para poder aplicar alguna estrategia de control.

Donde:

- PI_w : Controlador PI de velocidad.
- PI_i : Controlador PI de corriente.
- G_{ac} : Función de transferencia del actuador.
- G1, G2 y G3 : Funciones de transferencia del motor.
- K_t : Constante del transductor de corriente.
- K_w : Constante del transductor de velocidad.

2.1 Funciones de transferencia del motor

Cuando se regula la corriente de armadura y la velocidad,

es necesario eliminar las interacciones que se presentan entre estas variables, para poder aplicar una estrategia de optimización en cada bucla independientemente.

Las funciones de transferencia independizadas y normalizadas son [1]:

$$\frac{I_a}{E_a}(s) = \frac{T_{mk} s}{T_{mk} T_a s^2 + T_{mk} s + 1} \quad (1)$$

$$\frac{W}{I_a}(s) = \frac{1}{T_{mk} s} \quad (2)$$

La evaluación de estas funciones de transferencia se realizó mediante pruebas sencillas de laboratorio [1], obteniéndose:

$$\frac{I_a}{E_a}(s) = \frac{0.07978 s}{0.001396 s^2 + 0.07978 s + 1} \quad (3)$$

$$\frac{W}{I_a}(s) = \frac{12.5345}{s} \quad (4)$$

2.2 Función de transferencia del actuador

Como actuador se empleó un puente trifásico de tiristores totalmente controlado (figura 2).

La función de transferencia del conjunto del puente de tiristores con el dispositivo de disparo es:

$$G_{ac}(s) = \frac{V_o(s)}{V_{cm}(s)} = K_{ac} e^{-T_{ac}s} = \frac{K_{ac}}{1 + s T_{ac}} \quad (5)$$

Donde T_{ac} es el tiempo muerto de respuesta del rectificador [2]:

$$T_{ac} = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{6} = \frac{1}{12 \cdot f} \Rightarrow T_{ac} = 0.001388 \text{ s} \quad (6)$$

Y K_{ac} es la ganancia normalizada del actuador:

$$K_{ac} = 1.30435 \quad (7)$$

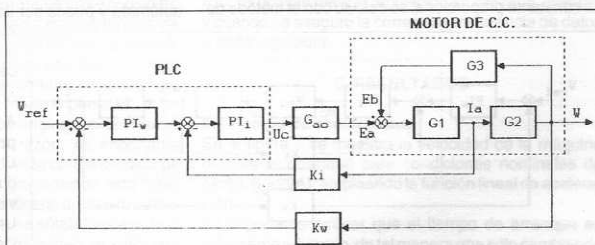


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de control.

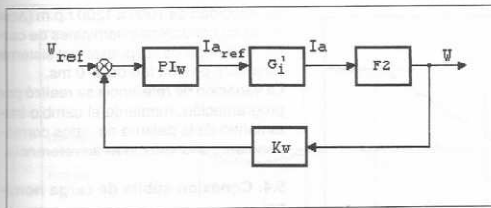


Figura 4. Bucla de regulación de velocidad.

rentes variables del proceso, como la velocidad, la corriente de armadura y el voltaje de campo, para interrumpir el funcionamiento en caso de algún eventual fallo y se programan las funciones de arranque y parada. Esta parte es siempre la primera en ejecutarse y depende solamente de los mandos externos del motor.

En la segunda parte, controlada por tiempo, se ejecutan los algoritmos de regulación PI para las buclas de corriente y velocidad.

4.1.1 Protecciones

En forma independiente de las protecciones eléctricas externas, el sistema ha sido programado con las protecciones básicas de sobrecorriente, sobrevelocidad y pérdida de campo.

Para la selección de la velocidad límite se midió directamente la máxima velocidad que alcanza la máquina, bajo la condición normal de operación mas desfavorable. Esto sucede cuando la máquina está operando en condiciones nominales de velocidad y carga, y pierde abruptamente la carga mecánica. Con este criterio, la protección de sobrevelocidad se ajustó ligeramente por encima de este valor.

Para ajustar el nivel máximo de corriente permitido, se asumió que la condición más crítica de corriente que se puede presentar bajo condiciones normales de operación, es cuando el motor está rodando en vacío, a velocidad nominal y se carga abruptamente hasta su valor de corriente nominal. El arranque no se consideró crítico porque se realiza por medio de una función de aceleración constante, la cual limita considerablemente el nivel de corriente durante este proceso. Con este criterio, la protección de sobrecorriente se ajustó ligeramente por encima del valor máximo permitido.

La pérdida del voltaje de campo origina sobrecorriente y sobrevelocidades; por esta razón, es importante proporcionar una protección directa contra pérdida de campo, teniendo en cuenta la gravedad de esta falla. Para lograr dicha protección se diseñó el circuito detector de campo, que proporciona una salida lógica para el autómata. En cada período de muestreo, el autómata consulta dicha variable, si por algún motivo ésta se

hace cero, el autómata ordena abrir el contactor principal inmediatamente.

4.1.2. Funciones para el arranque y la parada del motor. Para controlar el arranque del motor se utiliza una función de aceleración constante (rampa). Esta función esta programada en un módulo funcional (FB), donde se ingresan el valor de referencia de velocidad que se desea obtener después del arranque y el tiempo total para alcanzar este valor.

Con estos dos datos el módulo funcional calcula una constante de aceleración, representada por incrementos constantes de la variable de referencia que alimenta los algoritmos PI de regulación. Los incrementos se hacen a un intervalo de tiempo de 10 ms (el mínimo posible), con el propósito de lograr un arranque lineal. Una vez alcanzado el valor de velocidad deseado, se suspende la ejecución de la función rampa y el valor externo de referencia de velocidad, es directamente aplicado a los controladores PI.

Para detener la máquina se emplea una función de rampa de desaceleración, activada cuando se oprime el pulsador de stop. Similar a la rampa de aceleración, la rampa de desaceleración interviene el valor de referencia del regulador de velocidad; en este caso se decrementa constantemente el valor de la variable de referencia cada 10 ms, hasta alcanzar un valor nulo. En este momento el programa ordena abrir el contactor principal, interrumpiendo la alimentación de corriente alterna trifásica.

4.2. Algoritmo de regulación pid

El Autómata S5-95U incorpora, dentro de su sistema operativo, un algoritmo de regulación que puede ser llamado a través del módulo de organización OB-251. Para describir el funcionamiento del algoritmo de regulación, es necesario destacar algunas condiciones importantes para su adecuada ejecución, que están descritas en [3].

Realizando varias llamadas a la subrutina de regulación PID, es posible realizar regulación en cascada, siempre y cuando se asegure la correcta transferencia de datos a cada regulador.

5. RESULTADOS

5.1 Rampa de aceleración.

En la figura 5 se muestra la velocidad de la máquina durante el arranque para condiciones nominales de carga. ($I_a = 29A$), empleando la función lineal de aceleración.

Es importante aclarar que el tiempo de arranque es totalmente arbitrario, de tal manera que sólo cambiando una palabra de datos en el programa, se modifica el

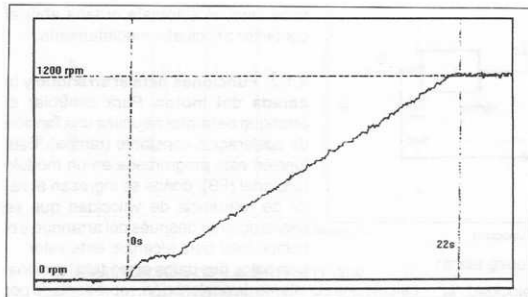


Figura 5. Arranque con rampa de aceleración.

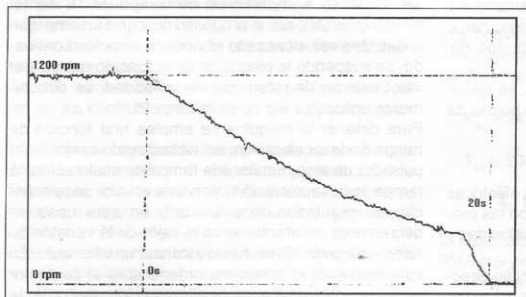


Figura 6. Parada con rampa de desaceleración.

tiempo de la rampa y, por consiguiente, la pendiente de la curva de arranque.

Se observa que luego del transitorio inicial, el autómata define el arranque lineal del motor, en este caso en 22s

5.2. Rampa de desaceleración

En la figura 6 se muestra la velocidad de la máquina, durante el proceso de parada con carga nominal. El cambio brusco de pendiente se presenta en el momento en que se abre el contactor principal. Desde ese momento, el motor se detiene debido a la inercia y a la carga acoplada. Para la rampa de desaceleración también es posible definir su pendiente por medio del programa; para el caso presentado en la figura 6, el tiempo de decremento programado fue de 20s.

5.3. Cambios de referencia del 15%

La figura 7 presenta la respuesta del sistema, ante un cambio de la referencia

de velocidad de 1000 a 1200 r.p.m ($\Delta\omega=15\%$) en condiciones nominales de carga. El tiempo de respuesta del sistema para esta prueba fue de 970 ms.

La variación de referencia se realizó por programación, mediante el cambio instantáneo de la palabra de datos correspondiente a la velocidad de referencia.

5.4. Conexión súbita de carga nominal

Esta prueba consiste en conectar súbitamente la totalidad de la carga mecánica cuando el motor está en vacío y determinar la desviación porcentual de la velocidad.

En la figura 8 se presentan los resultados, de donde se observa que la máxima desviación de velocidad sobre la nominal es del 5.067% y el tiempo de respuesta es de 810 ms.

6. CONCLUSIONES

El sistema digital de regulación de velocidad en cascada, implementado con un controlador lógico programable S5-95U, mostró resultados excelentes, de acuerdo con los oscilogramas presentados. Los resultados anteriores demuestran que los autómatas programables, similares al seleccionado para este trabajo, que conjugan el tratamiento de señales analógicas y digitales, representan una alternativa valedera, en procesos de regulación y mando de cierta exigencia en tiempos de respuesta.

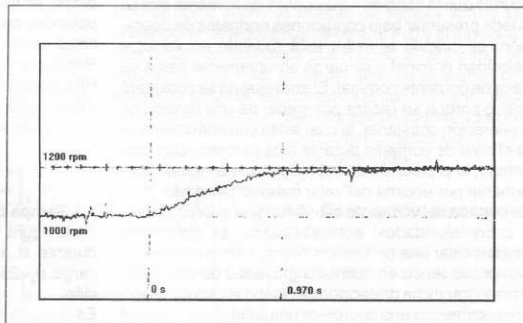


Figura 7. Cambio de referencia del 15%.

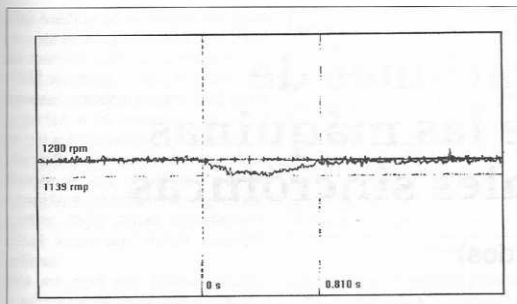


Figura 8. Conexión súbita de carga nominal.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. JARAMILLO, A.F. y MUÑOZ, H. Diseño y Construcción de un Sistema Digital de Regulación de Velocidad para un Motor de Corriente Continua de 7.5 HP, Tesis de Grado, Universidad del Valle, 1995.
- [2]. BÜHLER, H. Electrónica Industrial: Electrónica de Regulación y Control, Barcelona: Gustavo Gili S.A., 1986.
- [3]. SIMATIC S5, STEP® 5 Automata Programable, S5-900/S5-95U Manual del sistema, SIEMENS A. G., 1992.
- [4]. SIMATIC S5, STEP® 5 Basic Package, Erlangen: SIEMENS A. G., 1991.
- [5]. LEONHARD, W. Control of Electrical Drives, New York: Springer Verlag, 1990.
- [6]. FRÖHR, F. Electronic Control Engineering made easy, Berlin: SIEMENS A. G., 1985.

AUTORES

Hernando Vásquez Palacios

Ingeniero Electricista
Universidad del Valle
(1975) Ingeniero Diplomado en Electrotecnia de la Universidad Técnica de Braunschweig (1982).
Profesor de la Universidad del Valle desde 1984. Director del Programa de Postgrado de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de la Computación. Campos de Interés: Electrónica de potencia, regulación de tensión en generadores sincrónicos.



Andrés Felipe Jaramillo Salazar

Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle (1995).
Actualmente se desempeña como Ingeniero Consultor en la firma GERS Ltda. Sus áreas de interés son los sistemas de potencia y la calidad de la potencia.



Helmer Muñoz Valderrama

Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle (1995).
Es ingeniero de la firma KAMATI Ltda, donde desarrolla proyectos de automatización industrial, con base en controladores lógicos programables.

Tacto: El arte de ganar una discusión sin haber ganado un enemigo.

H.W.N.