

MEJORAMIENTO DE LOS PERFILES DE TENSIÓN USANDO UN REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSIÓN IMPLEMENTADO CON TÉCNICAS ADAPTIVAS

RESUMEN

El problema fundamental del control de tensión consiste en mantener su magnitud en terminales de la máquina síncrona dentro de los límites establecidos, utilizando diversas estrategias de regulación.

La propuesta que se presenta en este artículo se orienta a la aplicación de una metodología adaptiva en el desarrollo de un regulador automático de tensión (AVR), para que responda ante diversas perturbaciones realizadas sobre la máquina.

Para la validación de la metodología propuesta, se utiliza el sistema de prueba compuesto principalmente por una máquina síncrona y un puente semicontrolado. Los resultados son posteriormente comparados con un AVR clásico del tipo proporcional integral PI.

PALABRAS CLAVES: Control adaptivo, regulador automático de tensión, máquina síncrona

ABSTRACT

The fundamental problem of the voltage control is to maintain its value in the synchronous machine terminals between established limits, by using several regulation strategies.

The proposed approach presented in this paper is aimed to apply an adaptive methodology to develop an Automatic Voltage Regulator (AVR) capable to work well under different perturbations of the synchronous machine.

To validate the proposed methodology, a real test system composed mainly by a synchronous machine and a semicontrolled bridge is used. The obtained results are compared with the ones obtained from a classic proportional integral AVR.

KEYWORDS: Adaptive control, automatic voltage regulator, synchronous machine

1. INTRODUCCIÓN

A comienzos de la década de los noventa, se comenzó oficialmente a fomentar el interés en los temas concernientes a la calidad del servicio de energía eléctrica en muchos países, debido principalmente al nuevo mercado de libre competencia del sector eléctrico. La calidad por tanto se toma hoy día como un buen reflejo de la participación de las empresas en el mercado energético y uno de los aspectos de mayor interés frente a las exigencias del sector a nivel mundial. En Colombia, a partir del establecimiento del nuevo marco regulatorio del sector eléctrico, se pretende fortalecer el mercado eléctrico desde la óptica de la calidad del producto [1].

En un sistema eléctrico de potencia, y en el mismo marco de la calidad, es indispensable mantener los niveles de tensión dentro de límites definidos para evitar daños a los equipos e inconvenientes a los usuarios del sistema. Adicionalmente, para asegurar la calidad y confiabilidad en el suministro de energía eléctrica, se hace necesario

utilizar dispositivos reguladores en los sistemas de generación de la misma [2].

Específicamente para la máquina síncrona se cuenta con el regulador automático de tensión (mejor conocido como "automatic voltage regulator" - AVR), el cual es el encargado de actuar sobre el sistema de excitación de la máquina. Generalmente la implementación del AVR, se ha realizado con técnicas clásicas, tales como el control proporcional integral derivativo (PID), pero en los últimos años debido al éxito que han tenido las metodologías adaptivas, éstas se han empleado como técnicas de control con el propósito de incrementar la robustez del controlador ante cambios en condiciones de operación y en la configuración del sistema de potencia [3,4,5].

En [6], se presentaron los resultados de la utilización de la identificación en línea de los parámetros de un modelo para la máquina síncrona, los cuales serán utilizados para el posterior desarrollo de la metodología adaptiva presentada en este artículo.

SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO

Ingeniera Electricista, MS.c

Profesor asistente

Universidad Tecnológica de Pereira

saperez@utp.edu.co

JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

Ingeniero Electricista, Ph.D.(c)

Profesor auxiliar,

Universidad tecnológica de Pereira

jjmora@ohm.utp.edu.co

Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad ICE3

Grupo de Planeamiento de Sistemas Eléctricos – GPE

Como contenido, en la sección 2 de este artículo se presenta la configuración del montaje experimental desarrollado en el laboratorio para la prueba del algoritmo propuesto. En la sección 3 se muestran los aspectos más importantes de la implementación del AVR adaptivo, mientras que en la sección 4 se presentan las pruebas experimentales realizadas y la comparación entre los sistemas clásicos y adaptivos. Finalmente se presentan las conclusiones derivadas de esta implementación real.

2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

En la figura 1, se presenta un esquema de la configuración utilizada en el laboratorio, para probar la propuesta aquí presentada.

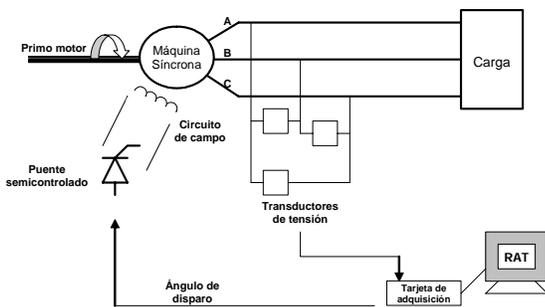


Figura 1. Configuración utilizada en el laboratorio

2.1. Sistema de excitación

El sistema de excitación utilizado e implementado en este proyecto es del tipo estático y consta de un puente rectificador monofásico semicontrolado, el cual alimenta el circuito de campo de la máquina síncrona. La estructura utilizada para la implementación del puente se ilustra en la figura 2.

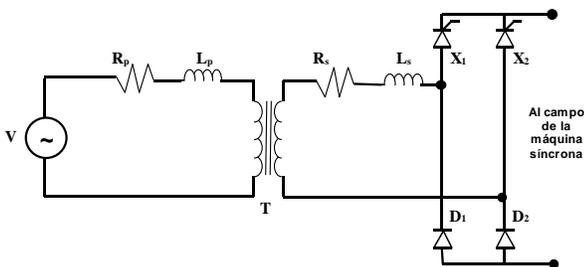


Figura 2. Puente semicontrolado

La variación de la tensión de campo se realiza a través de la variación en el ángulo de disparo de los tiristores (α) del puente. Así, cuando el sistema de excitación detecta una baja tensión en la salida del generador, se incrementa

la corriente en el campo con la disminución del ángulo α ; por otro lado, si se detecta una tensión en terminales de la máquina mayor al límite superior permitido, la corriente del campo se disminuye con el aumento del ángulo α .

Para el control de los rectificadores con tiristores se realiza un disparo de los mismos mediante un control de fase, de manera que los pulsos que se envíen a las puertas de los tiristores tengan siempre el mismo retardo, es decir, que estén sincronizadas con la tensión de red. Para ello se utilizan los siguientes elementos en la implementación real del circuito en el laboratorio:

- Circuito detector de cruce por cero: Encargado de determinar el instante en que señal de alimentación del circuito control realiza cruces por cero
- Sistema de temporización: Implementado con un microcontrolador PIC16F84A, que recibe el valor del ángulo de disparo de los tiristores enviado desde el computador. Éste temporiza después de recibir la señal de habilitación del circuito detector de cruce por cero y envía los pulsos digitales al circuito de aislamiento. En el sistema implementado, se cuenta con la capacidad de variar los pulsos desde 0° hasta 180° .

Adicionalmente se tienen lo siguientes elementos utilizados en la implementación:

- Sistema de medición: Encargado de obtener la tensión en terminales del generador a través de transductores. Se utilizaron tres transductores CCT08 de Omega, rango de entrada de 0 a 650 V ca.
- Circuito de aislamiento: Es el encargado de aislar la interface de control de la interface de potencia por medio de optoacopladores.
- Fuente regulada ± 12 voltios: Suministra alimentación al microcontrolador.

En la figura 3, se presenta el hardware implementado como puente rectificador semicontrolado.



Figura 3. Hardware desarrollado como puente rectificador

2.2 Regulador automático de tensión (AVR)

El regulador de tensión es la parte inteligente del sistema de control de la excitación de la máquina. Ante una perturbación en el sistema, es necesario que este regulador actúe lo más rápidamente posible para reestablecer unas condiciones normales. Con el desarrollo rápido de los dispositivos y tecnologías electrónicas, se ha visto en gran medida favorecida la implementación de reguladores digitales.

Las funciones básicas de un AVR son las siguientes:

- Regular el nivel de tensión en los bornes del generador, manteniéndolo dentro de los límites operativos considerados como normales.
- Aplicar señales de estabilización para mejorar el funcionamiento de la máquina, tanto en estado estacionario como en estado transitorio.

El AVR implementado en el proyecto que se referencia en [7] es del tipo PI clásico, donde sus constantes proporcional K_p , e integral K_i , son establecidas de una manera empírica por medio del método de ensayo y error, para la condición nominal de operación de la máquina. El procedimiento clásico para sintonizar el controlador es el siguiente:

- Se elige un valor de K_p para el cual no se presente una gran sobreoscilación, cuando la máquina se somete a una señal tipo escalón en el circuito de campo. La constante K_i en este momento se hace cero.
- Posteriormente se reduce un poco la constante proporcional para añadir la constante integral, con la cual se busca anular o en su defecto reducir el error en régimen permanente. Los valores de las constantes obtenidas por este procedimiento se presentan en la tabla 1.

K_p	K_i
1	0.7

Tabla 1. Parámetros del controlador

El resultado para una variación en la carga obtenido con el controlador sintonizado, en comparación con el resultado sin controlador se presenta en la figura 4. En esta figura se muestra que la caída de tensión del sistema con AVR, en el momento de la perturbación, es sólo del 10% durante un corto tiempo. El sistema sin AVR presenta una caída mucho más grande, cercana al 22% y que se mantiene mientras no se retira la carga o se varía manualmente la excitación de la máquina.

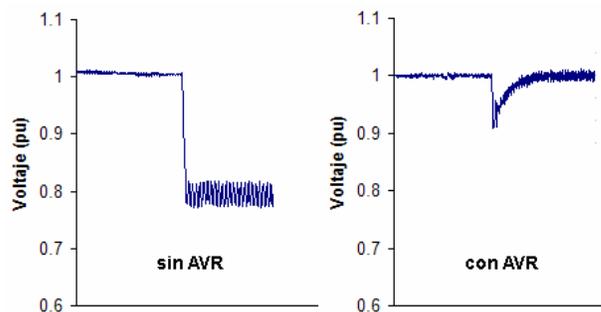


Figura 4. Respuesta del generador ante una variación del 20% en la carga, sin AVR y con AVR

3. IMPLEMENTACIÓN DEL AVR ADAPTIVO

La idea básica del control adaptivo es modificar los parámetros que definen el regulador (PID, por ejemplo) en tiempo real, de acuerdo con el comportamiento instantáneo del sistema. De este modo, suponiendo que un controlador se hubiese ajustado adecuadamente para determinadas condiciones, el ajuste no sería válido si alguna de ellas cambiase; en cambio la utilización de las técnicas de control adaptivo permiten reajustar los parámetros del regulador cada vez que el comportamiento del sistema se modifica.

El AVR fue desarrollado utilizando un método de control adaptivo, que parte de un comportamiento ideal del sistema, definido mediante un modelo de referencia. La diferencia instantánea entre el comportamiento real del sistema y el modelo deseado, se utiliza para calcular los parámetros del controlador. En este tipo de esquema es utilizada la identificación en línea de la planta. [8].

El estimador implementado en [6] determina los parámetros con base en el tensión de terminales de la máquina síncrona $V_t(k)$, sus dos valores anteriores, $V_t(k-1)$ y $V_t(k-2)$, la señal de control $U(k)$ y sus valores anteriores, $U(k-1)$ y $U(k-2)$, tal como se presenta en la figura 5.

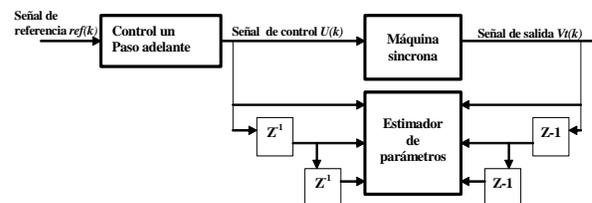


Figura 5. Control un paso adelante

El vector de parámetros estimados por el identificador está definido por:

$$\Theta(k) = [b_2 \ b_1 \ b_0 \ -a_2 \ -a_1 \ -a_0] \quad (1)$$

El controlador adaptativo utilizado es del tipo un paso adelante [3]; en él se utiliza la ecuación DARMA [4], pero ahora incluyendo la salida deseada en un instante de tiempo $(k+1)$, es decir:

$$V_t(k+1) = b_2 u(k) + b_1 u(k-1) + b_0 u(k-2) + a_2 V_t(k) + a_1 V_t(k-1) + a_0 V_t(k-2) \quad (2)$$

Por tanto, en el instante de tiempo k , el valor de la tensión en terminales de la máquina $V_t(k+1)$ será el próximo valor de V_t , utilizado para llevar el sistema a un valor deseado V_t^* . Luego se tiene que:

$$V_t(k+1) = V_t^*(k+1) = \text{ref}(k) \quad (3)$$

Se concluye entonces que $V_t^*(k+1)$ es la referencia. Luego, reemplazando (3) en (2) y despejando $u(k)$ se obtiene (4)

$$u(k) = \frac{1}{b_2} [V_t^*(k+1) - b_1 u(k-1) - b_0 u(k-2) - a_2 V_t(k) - a_1 V_t(k-1) - a_0 V_t(k-2)] \quad (4)$$

En la ecuación (4), $u(k)$ es el valor de la señal de control en el instante k , para que en el instante $k+1$ la salida $V_t(k+1)$ sea igual a la referencia $V_t^*(k+1)$.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

El sistema descrito se sometió a diferentes circunstancias de prueba. Se presentan en este artículo las respuestas del sistema ante variaciones en el valor de la tensión de referencia y ante variaciones en la carga de la máquina síncrona.

4.1. Variación en la referencia de tensión de la máquina síncrona

Las pruebas de la variación en el valor de la referencia de los terminales de la máquina síncrona se realizaron para una carga de tipo resistiva. La variación, en forma de escalón, en la referencia de $\pm 10\%$ lo ilustra la figura 6.

A los 20 s se realizó un incremento en la señal de referencia. La respuesta de la máquina con el AVR clásico es inmediata ante este cambio en la excitación, pero presenta una considerable oscilación que dura aproximadamente 5 segundos. Una vez alcanzado el estado estable se somete la máquina a un nuevo cambio en la referencia a los 40 s, donde se regresa a las

condiciones iniciales en la tensión referencia. Se observa que el tiempo de estabilización permanece en 5 s.

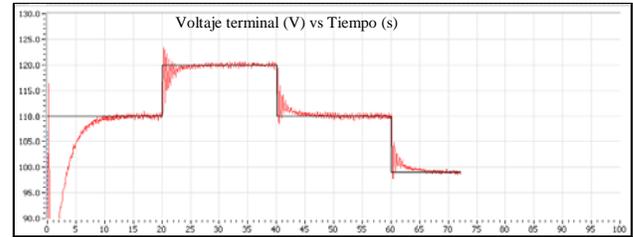


Figura 6. Respuesta del AVR clásico ante cambio de $\pm 10\%$ en la referencia.

Cuando se utiliza la máquina pero ahora con el AVR adaptativo, el tiempo de adaptación ante las mismas variaciones, se reduce a la mitad del presentado con el AVR clásico de la figura 6. Este comportamiento se presenta en la figura 7.

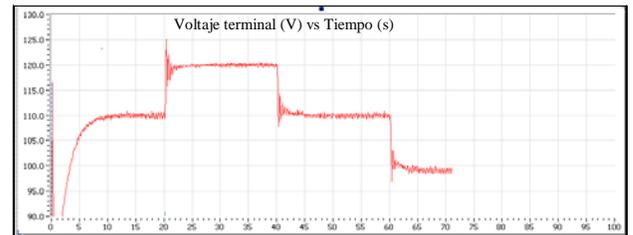


Figura 7. Respuesta del AVR adaptativo ante cambio de $\pm 10\%$ en la referencia.

4.2. Variación en la carga de la máquina síncrona

Para la prueba de variación de la carga de la máquina síncrona se consideraron las siguientes condiciones:

- La carga utilizada fue del tipo inductivo con un factor de potencia 0.9.
- El generador se operó con un tensión de referencia de 110V en terminales. Se realizó un incremento en la carga del 30% (aproximadamente) a los 20s y a los 30s se retira esta carga.

Los resultados comparativos obtenidos ante una variación de carga y referencia utilizando un AVR clásico tipo PI y el diseñado con el método adaptativo se presentan en las figuras 8 y 9, respectivamente.

En la figura 8 puede apreciarse la respuesta del AVR clásico ante las situaciones anteriormente descritas. Es de resaltar los 5 s que utiliza este controlador para alcanzar el estado permanente cuando se retira la carga.

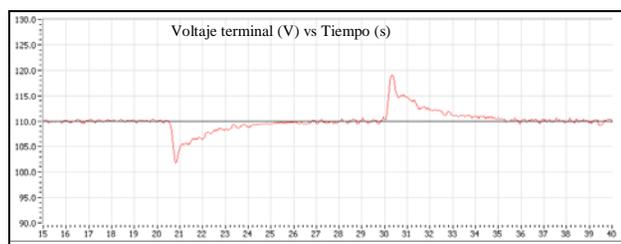


Figura 8. Respuesta del AVR clásico

En la figura 9, se presenta la respuesta del AVR adaptativo, en la cual se aprecia la velocidad de respuesta del controlador con respecto al anterior; en este caso el estado permanente se alcanza en 1,2s.

En el intervalo 20s - 22s se produce el incremento en la carga, lo cual necesariamente se refleja en una disminución de la tensión. En la figura 9, en comparación con la figura 8, se aprecia que el cambio al inicio es un poco mayor, pero se reduce el tiempo de estabilización de la señal de tensión.

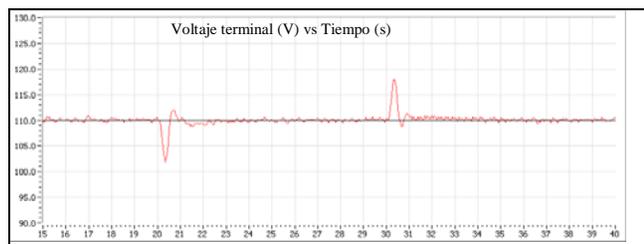


Figura 9. Respuesta del AVR adaptivo

5. CONCLUSIONES

Los resultados de control de tensión obtenidos con la metodología adaptativa mejoran notablemente el desempeño ante situaciones transitorias de cambio de carga y/o de referencia, en cuanto a la disminución del tiempo utilizado comparado con la implementación clásica.

Aunque se utiliza un método de identificación del sistema en línea, el esfuerzo computacional no es elevado debido al bajo orden seleccionado para el modelo de la máquina; a medida que dicho orden aumenta el tiempo de rutina también se incrementa. Para efectos de análisis fue escogido un modelo de orden tres, el cual presentó una adecuada respuesta.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] J. Jaimes, J. Duarte, G. Ordóñez, G. Carrillo, P. Gaona, "La calidad de la energía eléctrica en el sector eléctrico colombiano: utopía o realidad", II Congreso Internacional de la Región Andina, Andescon IEEE, Colombia, 2004.

- [2] P. M. Anderson and A.A. Fouad, Power systems control and stability, Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa, U.S. A., 1977
- [3] Liu, W., G. Venayagamoorthy, D. Wunsch, "Adaptive neural network based power system stabilizer design", IEEE Trans. On EC, 2003, pp 2970 – 2975.
- [4] Hsu, Y.Y., Kan-Lee, Liou, "Design of self-tuning pid power system stabilizers for synchronous generators", IEEE Trans. On energy conversion, vol EC-2, No. 3, 1987, pp 343 – 348
- [5] Mrad, F., S. Karaki and Bassel Copti, "An adaptive fuzzy-synchronous machine stabilizer", IEEE Trans. systems, man and cybernetics – part c: applications and reviews, vol 30, no 1, 2000, pp 131 – 137.
- [6] Pérez S, Alzate A., "Identificación en línea de la función de transferencia de una máquina síncrona", Scientia et Technica año XI No 28, Octubre de 2005, pp 31 – 35.
- [7] Pérez S., "Control de oscilaciones de la máquina síncrona utilizando un estabilizador neuronal", Proyecto de grado de maestría. Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Octubre 2005.
- [8] Goodwin & Sing (1984). "Adaptive Filtering Prediction and Control", Prentice – Hall, New Jersey