

Lazos de control para un Regulador Automático de Voltaje (AVR)

DEMILLON-PASCUAL, Rufino*† & TREJO-LEAL, Huber

Recibido Enero 15, 2017; Aceptado Marzo 10, 2017

Resumen

Un sistema de alimentación y control de corriente de campo se le conoce como Regulador Automático de Voltaje (AVR Automatic Voltage Regulators). El sistema de excitación es entendido como la fuente para hacer circular corriente en los devanados de campo de la máquina síncrona. A través del nivel de la tensión y la corriente de campo, se realiza el control de voltaje en el lado de potencia, permitiendo proteger al sistema de potencia (control de límites de capacidad de la máquina síncrona, del sistema de excitación y componentes adicionales). Los tipos de sistemas de excitación en base a la fuente de potencia utilizada, se clasifican en:

- Sistema de excitación rotativo de corriente continua.
- Sistema de corriente rotativo de excitación alterna.
- Sistema de excitación estático.

El enfoque del trabajo es el desarrollo del control de **un sistema de excitación estático**, cuyas características es que todos los componentes son estáticos (no rotan) y proveen de corriente de excitación directamente al campo del generador con anillos rozantes, con posibilidades de mantenimiento, asimismo; la fuente de potencia de los rectificadores es el generador (o la barra de servicios auxiliares) mediante un transformador reductor que provee una tensión adecuada para inyectarlo a los SCRs.

AVR, Corriente, Máquina Síncrona, PLC

Abstract

A power supply and field current control system is known as the Automatic Voltage Regulator (AVR). The excitation system is understood as the source for circulating current in the field windings of the synchronous machine. Through the voltage level and the field current, voltage control is performed on the power side, allowing the power system to be protected (control of capacity limits of the synchronous machine, excitation system and additional components). The types of excitation systems based on the power source are classified as:

- Direct Current Rotating Excitation System.
- Alternating Excitation Rotary Current System.
- Static Excitation System.

The focus of the work is the development of the control of a static excitation system, whose characteristics are that all the components are static (do not rotate) and provide excitation current directly to the generator field with friction rings, with maintenance possibilities, as well; The power source of the rectifiers is the generator (or the auxiliary service bar) used a reductor transformer which provides a suitable voltage to inject it to the SCRs.

AVR, Current, Synchron Machine, PLC

Citación: DEMILLON-PASCUAL, Rufino & TREJO-LEAL, Huber. Lazos de control para un Regulador Automático de Voltaje (AVR). Revista de Operaciones Tecnológicas. 2017. 1-1:35-48.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: rdemillon@utvm.edu.mx

Introducción

La máquina síncrona es el elemento primordial que permite generar energía eléctrica a potencias elevadas, sin embargo está expuesta a variaciones de cargas, las cuales debe soportar en un estado estable; una mayor carga implica mayor demanda de corriente; esto provoca que los voltajes en las terminales del generador sean movidos hacia abajo, por el contrario si se desconecta cargas muy grandes el voltaje tiende a elevarse, ante situaciones mencionadas la variable a controlar es la corriente de campo, la cual no debe sobrepasar la banda de operación permisible.

Lograr la estabilidad de voltaje, se requiere de sistemas de controles adecuados para la corriente de campo; debido a que ésta repercute directamente en los voltajes en las terminales del generador y en parámetros eléctricos adicionales. El sistema debe estar dentro de un estado estable, en caso pasar a un estado inestable se debe de ajustar los parámetros al máximo permisible, disponiendo de sistemas de control de respuesta rápida para evitar algún daño al generador, en caso de no lograr estabilizar el sistema es necesario salir de operación.

En el transcurrir de los tiempos, los sistemas de control han evolucionado; buscando ser más robustos, estables y confiables. Estos sistemas deben ser amigables para los programadores y operadores, de tal forma que les permita realizar ajustes de parámetros cuando esto sea requerido. En el mercado existen diversos sistemas de control para la excitación de las máquinas síncronas, cada fabricante tiene diseños particulares. Un AVR tiene el reto de mantener la tensión dentro de ciertos límites sin exponer la integridad del generador, cumpliendo los estándares y normatividades pertinentes (ejemplo la *IEEE Standard 421.5- 2005*, ANCE, N. M. (marzo 2005), ANSI C50.13-1989).

Para este fin se han utilizado distintas soluciones, como aquellas que emplean reguladores de tensión, en sus distintas configuraciones. Estos reguladores clásicos compensan las variaciones lentas de tensión que se presentan en las líneas de alimentación.

La tendencia actual en investigación, tiene como objetivo implementar reguladores que puedan compensar diversas perturbaciones de tensión, tales como las variaciones rápidas, las cuales no pueden ser corregidas por los reguladores estándares. El diagrama general de un AVR está compuesto generalmente por:

- Un regulador.
- Un excitador.
- Un transductor de la tensión terminal.
- Un compensador de carga.
- Un estabilizador de potencia del sistema.
- Distintos circuitos de protección de la máquina.

Justificación

Para obtener potencia eléctrica en una máquina síncrona, se requiere de energía mecánica y una fuente de voltaje en DC. La fuente de DC se obtendrá de un sistema de excitación estático, provee de varias ventajas, como mayor velocidad de respuesta, mayor robustez y continuidad en el servicio. Tener continuidad implica reducir costos de operación, aunque inicialmente se requiere inversiones económicas muy elevadas.

La investigación y desarrollo tecnológico busca nuevos esquemas de AVR con características técnicas que de más confiabilidad como: ser más robusto ante cualquier eventualidad transitoria, una mayor velocidad de respuesta contar con un sistema redundante y, ser más económico como producto final respecto a los AVR disponibles en el mercado.

Los AVR's impiden con todas sus alternativas de control que el generador salga de operación o de sincronía; al mismo tiempo protege al equipo.

Problema

De acuerdo a¹ los esquemas de variación de voltaje, las principales perturbaciones de tensión son las siguientes:

- Sobretensión de larga duración. - Es un incremento superior al 110% de la tensión nominal, durante un tiempo mayor a un minuto. Generalmente resultan de la desconexión de una carga muy grande.
- Baja tensión de larga duración. - Es una disminución a un valor menor que el 90% del nominal, durante un tiempo mayor a un minuto. Su principal causa es la sobrecarga en las líneas.
- Sobretensión de corta duración (*swell*). - Es un incremento a un valor entre el 110% y el 180% del nominal, con una duración entre 0.5 ciclos de línea a 1 minuto. De manera similar a la sobretensión de larga duración, se produce generalmente por la desconexión de cargas muy grandes.
- Baja tensión de corta duración (*sag*). - Es una disminución a un valor entre el 10% y el 90% del nominal, con una duración entre 0.5 ciclos de línea a 1 minuto. Generalmente es ocasionado por la conexión de grandes cargas o el encendido de motores.

Estabilidad de tensión y generación distribuida se están tomando como eje principal para la confiabilidad y seguridad de un sistema de potencia, los estudios de estabilidad de tensión toman mucha fuerza en la actualidad, principalmente por el crecimiento de las redes eléctricas.

Además de la importancia de mantener el sistema disponible la mayor cantidad de horas posibles y al menor costo. Dependiendo de su magnitud, pueden provocar daños en equipos eléctricos, desconexión de dispositivos de la red, interrupciones del servicio en sectores del sistema y hasta apagones. Según Kundur (1994), la estabilidad de tensión “es la habilidad de un sistema de potencia de mantener dentro de un rango de valores permisibles la tensión en todas las barras del sistema, bajo condiciones normales de operación y después de estar sujeto a una perturbación”.

La estabilidad de tensión de un sistema de potencia está interrelacionada con la generación, la transmisión y la distribución. Se ve afectada por perturbaciones en el sistema como por ejemplo cortocircuitos (monofásicos, bifásicos o trifásicos), salida de generadores del sistema, cambios significativos de carga, entre otras.

Un AVR debe de responder a perturbaciones transitorias, forzando al campo compensar una caída de tensión momentánea o reducir la misma en caso de una elevación de tensión, además consiste en la capacidad y velocidad de respuesta del generador sin exceder sus límites como son:

Situación	Efecto
Límite de tensión de campo	Falla de la aislación del rotor
Límite de la corriente de campo	Calentamiento del rotor
Límite de carga MVA	Calentamiento del estator
Límite de subexcitación	Calentamiento región final del estator

Tabla 1. Elementos de control y efectos de pasar el límite permitido

¹ R. C. Dugan, et al, Electric Power Quality, McGraw Hill, New York, 1996.

Un sistema de generación debe operar en estado estable, dentro de los parámetros establecidos, a pesar de las perturbaciones que puedan suscitarse en el sistema.

En la figura 1 muestra el diagrama a bloques de un sistema de generación, con sus elementos de control y protección que permite tener mayor claridad de la misma. Los AVR's disponibles en el mercado varias de ellas cuentan con varias entradas/salidas analógicas y digitales, en muchos casos no se utilizan todos los canales, que se consideran innecesarios, sin embargo, ya vienen ensamblados lo que hace que los costos de los AVR's comerciales en el mercado se eleven drásticamente sus costos.

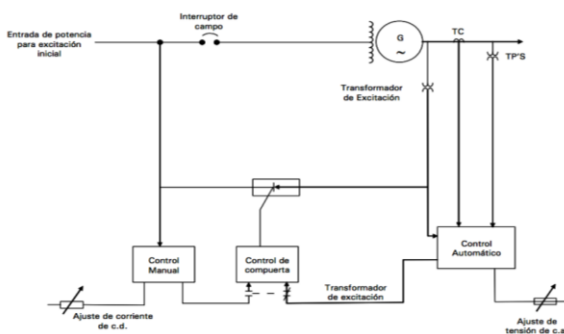


Figura 1 Sistema de generación eléctrica (NMX-J-501 ANCE-2005)

Con el propósito de reducir el tiempo de respuesta de los AVR's, se han desarrollado varias alternativas tal como esquemas en los cuales se utilizan técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM), además de dispositivos de potencia modernos, tales como el transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT)

Hipótesis

Un AVR debe poseer diversas herramientas para brindar la mayor disponibilidad y confiabilidad posible. Esto se logra teniendo varios elementos de control y protección, así como la redundancia máxima.

La propuesta del AVR se busca alcanzar mayor robustez mediante una mayor redundancia, en los sistemas de retroalimentación, tener un menor costo económico del AVR, debido a que se pretende reducir las cantidades de entradas y salidas, dejando solamente las que se requieren.

El diseño busca conjugar las características de respuesta de los elementos primarios de potencia (Generador, Transformador de Excitación y Convertidor de tiristores) de tal manera que cumplan los requerimientos de respuesta determinados por el planeador de la red eléctrica. Las características básicas de respuesta se orientan a condicionar la máxima respuesta transitoria del generador durante disturbios en la red con el objeto de aumentar los márgenes de estabilidad.

La velocidad de respuesta transitoria, en el caso de los sistemas con excitadores estáticos, a base de convertidores de tiristores las tensiones de techo, están limitadas por la relación de la transformación de excitación, por otra parte, la velocidad de respuesta está determinada así mismo por las tensiones de techo, la cantidad de hierro en los núcleos de los circuitos magnéticos y la eficacia de la función de control. Los tiempos que se busca alcanzar con los sistemas de control son los siguientes:

- Tiempo de respuesta menor a 0.25s.
- Tiempo de estabilización mayor a 0.7 s y menor de 1 s. con una banda de estabilización de $\pm 2\%$ de la magnitud del escalón.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de excitación conformado por una etapa de potencia en base a un transformador de excitación, interruptor de campo y un convertidor de tiristores.

Así como una etapa de control en base a una unidad de control de excitación (UCE), las cuales deben contener las funciones de regulación, compensación, limitación, protección, y control lógico, el cual se simulará en Simulink de MATLAB.

Objetivos específicos

- Diseñar un sistema en el que conjuguen las características de respuesta de los elementos primarios de potencia (generador, transformador de excitación y convertidor de tiristores) de tal manera que cumplan los requerimientos de respuesta determinados por el planeador de la red eléctrica.
- Condicionar la máxima respuesta transitoria del generador durante disturbios en la red con el objeto de aumentar los márgenes de estabilidad.
- Determinar la velocidad de respuesta en función de las tensiones de techo, la cantidad de hierro en los núcleos de los circuitos magnéticos y la eficacia de la función de control.

Marco Teórico

El generador sincrónico trifásico, es la máquina que se utiliza en las centrales eléctricas (Turboalternador) o bien como sistema autónomo de generación (Grupo electrógeno). El giro del rotor se produce mediante una máquina impulsora (Motor diésel, turbina de vapor, de gas, hidráulica, eólica), que mantiene una velocidad angular constante. La alimentación del electroimán se logra a través de un par de anillos rozantes que permiten la continuidad eléctrica entre una parte fija y una parte móvil.

El rotor es la parte móvil del generador y es donde se ubica comúnmente el devanado de campo, este último necesita la circulación de corriente continua para producir el campo magnético constante. Debido a que el rotor está en movimiento, resulta difícil poder alimentar al devanado de campo con corriente continua, por esa razón se requiere de un sistema de anillos rozantes y escobillas los cuales permiten el ingreso de la corriente desde una fuente externa.

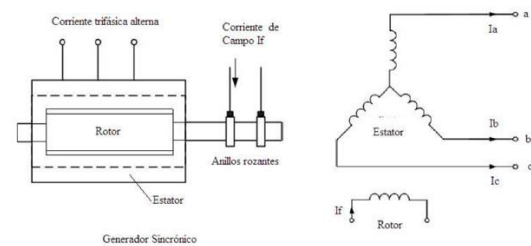


Figura 2 Diagrama Esquemático del Generador Sincrónico (Ivan Calero)

Fuerza electromotriz de la máquina síncrona

Siendo ω la velocidad angular del rotor y de acuerdo a la ley de Faraday-Lenz, entre los terminales de la bobina se inducirá una fuerza electromotriz cuyo valor está dado por:

$$e_A = e_{u1-u2} = -N_A \frac{d\phi}{dt} = N_A * \omega * \phi_{rot} * \text{sen}(wt) \quad (1)$$

Donde:

e_A = Fuerza electromotriz fase A

ω = velocidad angular del rotor.

N = Espiras

ϕ = Flujo de campo magnético

$$E_{max} = N * \omega * \phi_{rot} \quad (2)$$

$$e_A = E_{max} * \text{sen}(wt) \quad (3)$$

Si se aplica la ecuación a la expresión anterior para las tres fases se tiene:

$$e_A = N_A * \omega * \phi_{rot} * \text{sen}(wt) \quad (4)$$

$$e_B = N_B * \omega * \varphi_{rot} * \text{sen}(\omega t - 120^\circ)$$

$$= N_B * \omega * \varphi_{rot} * \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) \quad (5)$$

$$e_C = N_C * \omega * \varphi_{rot} * \text{sen}(\omega t + 120^\circ)$$

$$= N_C * \omega * \varphi_{rot} * \text{sen}(\omega t + 2\pi/3) \quad (6)$$

Donde

$e_A = e_B = e_C$ es el voltaje inducido en cada fase.

φ_{ROT} = Flujo de campo magnético del rotor

El voltaje inducido se retrasa al flujo que circula por cada una de ellas en 90° . Se puede considerar un voltaje interno E inducido para cada fase, cuya característica principal es que retrasa al flujo del rotor en 90° : De esta manera se ha logrado tener un sistema de tres tensiones alternas desfasadas una de otra, 120° en el tiempo.

Circuito equivalente de la máquina sincrónica

La existencia de los ejes ficticios directo y en cuadratura, permite modelar eléctricamente las variables del estator a través de la resistencia del estator y las reactancias del eje directo y en cuadratura. Particularmente, si el rotor es de polos salientes las reactancias en ambos ejes son diferentes y su cálculo supone un desarrollo complejo. En el rotor cilíndrico, sin embargo, se define una única reactancia: $X_s = X_d = X_q$, por lo cual es posible establecer un circuito como el de la Figura 3.

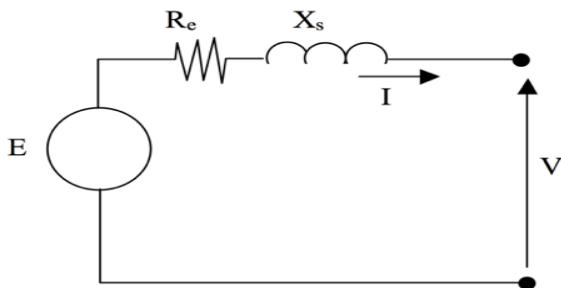


Figura 3 Circuito equivalente por fase de una máquina sincrónica

A partir de la figura se define:

$$E = L^{er} * I_r * \omega * \text{sen}(\omega t) \quad (7)$$

$$L^{er} = \frac{N_e N_r}{R} \quad (8)$$

Donde:

E es la tensión inducida de la máquina.

Re es la resistencia en los enrollados del estator.

L^{er} es la inductancia mutua entre rotor y estator.

N_e, N_r son el número de vueltas de los enrollados de estator y rotor respectivamente.

R es la reluctancia del circuito magnético.

I_r es la corriente rotórica (de excitación).

En el caso de la máquina operando como generador se tiene:

$$\vec{E} = R_e \vec{I} + jX_s * \vec{I} + \vec{V} \quad (9)$$

El diagrama fasorial correspondiente se muestra en la figura 4.

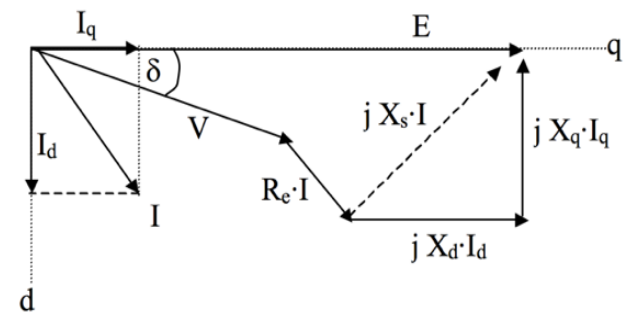


Figura 4 Diagrama fasorial de una máquina sincrónica como generador

En la Figura 4 el ángulo δ representa el ángulo de torque, es decir, el ángulo entre las fuerzas magnetomotrices del estator y rotor. La expresión para la potencia eléctrica generada por fase (caso de operación como generador) es (R_e se desprecia):

$$P = V * I * \cos(\theta) = \frac{E * V}{X_s} \text{sen}(\delta) \quad (10)$$

La ecuación muestra que la potencia activa inyectada a la red depende por una parte del ángulo entre las fuerzas magnetomotrices y principalmente de la tensión inducida “E” la cual es controlable a través de la corriente de excitación. Si se consideran los reactivos inyectados o absorbidos de la red se tienen:

$$Q = V * I * \text{sen}(\theta) = \frac{E*V}{X_s} \cos(\delta) - \frac{V^2}{X_s} \quad (11)$$

En el caso del torque generado en la operación como motor se tiene que cada fase aporta con:

$$T = \frac{V*I}{\omega} * \cos(\theta) = \frac{E*V}{\omega X_s} \text{sen}(\delta) \quad (12)$$

En el caso de una máquina con rotor de polos salientes, las dos ecuaciones anteriores se convierten en:

$$P = \frac{E*V}{X_d} \text{sen}(\delta) + \frac{X_d - X_q}{2X_d * X_q} V^2 \text{sen}(2\delta) \quad (13)$$

$$Q = \frac{E*V}{X_d} * \cos(\delta) - V^2 \left(\frac{\cos^2(\delta)}{X_d} - \frac{\text{sen}^2(\delta)}{X_q} \right) \quad (14)$$

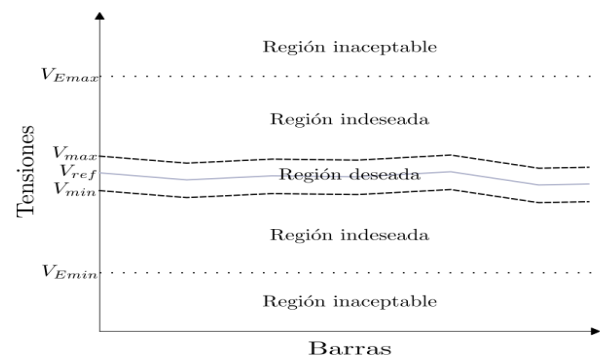
Reguladores Automáticos de voltaje o tensión

Considerando las necesidades de seguridad que requiere el generador eléctrico y la estabilidad del sistema, los objetivos del presente trabajo consisten en identificar los esquemas de protección apropiados para un generador, así como la velocidad de respuesta conjuntamente con los equipos auxiliares que intervienen en los cálculos de ajustes de protección.

Los AVR de los generadores, actualmente, están diseñados para seguir un valor de referencia específico (Van Cutsem y Vournas, 1998). Con el propósito de obtener un control de tensión coordinado, el diseño de un AVR del tipo estático para excitación de generadores eléctricos de gran capacidad.

No solo tiene un valor deseado único, sino una banda de valores entre los que pueda operar según el valor de tensión de su generador respectivo.

Estabilidad de tensión y generación distribuida se están tomando como eje principal para la confiabilidad y seguridad de un sistema de potencia, principalmente por el crecimiento de las redes eléctricas, además de la importancia de mantener el sistema disponible la mayor cantidad de horas posibles y al menor costo.



Gráfica 2 Regiones de operación del generador²

Para lograr lo mencionado es trascendental la búsqueda de un sistema robusto a perturbaciones, ya que estas, dependiendo de su magnitud, pueden provocar daños en equipos eléctricos, desconexión de dispositivos de la red, interrupciones del servicio en sectores del sistema y hasta apagones. Según Kundur (1994), la estabilidad de tensión “es la habilidad de un sistema de potencia de mantener dentro de un rango de valores permisibles la tensión en todas las barras del sistema, bajo condiciones normales de operación y después de estar sujeto a una perturbación”. Aunque los AVR presentan claras ventajas frente a los esquemas clásicos, utilizan una topología diferente a los reguladores clásicos, por lo que la sustitución de éstos no se puede realizar de manera directa por un regulador rápido de taps u otra tecnología.

² Luis Emilio Vargas Ramírez, 2013

Para cumplir con estos requerimientos, además de brindar la protección necesaria, un AVR debe poseer diversas herramientas para brindar la mayor disponibilidad y confiabilidad posible

Metodología de Investigación

De acuerdo al modelo propuesto, se plantea la siguiente metodología cuantitativa, la cual utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis, confiando en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de estadísticas para establecer con exactitud patrones de comportamiento en una población. Según Sampieri (Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2003) se utiliza primero para describir y refinar preguntas de investigación. A veces, pero no necesariamente, se prueban hipótesis (Grinnel & A. Unrau, 2005).

Tipo de Investigación

De acuerdo a la naturaleza y nivel de conocimiento de este proyecto, el tipo de investigación que se propuso fue investigación descriptiva, debido que se buscó describir a todos los componentes que conforman los AVR's, lo que permitió proporcionar un diseño que satisficiera las necesidades del operador.

Métodos Teóricos

La naturaleza de esta investigación, permite proponer un método lógico; esta investigación se basa en las leyes de Faraday y Lenz, entre otras, lo que permitió llegar a un resultado factible para el operador.

Metodología de Desarrollo

Se planteó la posibilidad de varios esquemas de control en lazo cerrado como son:

- Compensador de carga
- Regulación del compensador de reactivos
- Ajustador de voltaje
- Controlador PF Tipo I y Tipo II
- Controlador VAR Tipo I y Tipo II
- Limitador de mínima excitación (UEL) y máxima excitación y (OEL)
- Limitador de voltaje y frecuencia Volts/Hz
- Sistema Estabilizador de Potencia (PSS)
- Regulación de corriente de campo en lazo abierto

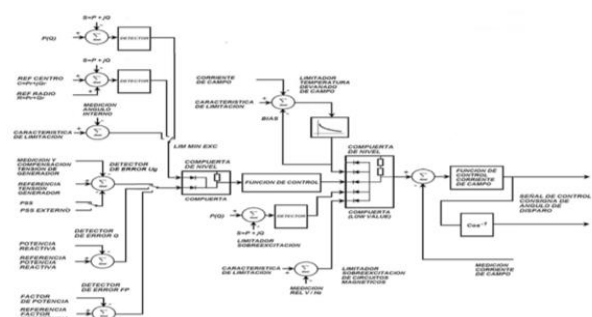


Figura 5 Diagrama a bloques, canal de regulación de tensión en terminales de un generador

El trabajo desarrollado integró varias etapas; como punto de partida fue conocer los objetivos del proyecto y metas a alcanzar, a partir de ello se realizó el trabajo de investigación de varios estudios desarrollados en este rubro.

Concluido este proceso de documentación e investigación del tema se procedió a realizar los análisis de cada método de control desarrollando sus diagramas de flujo para posteriormente desarrollar la programación para el PLC. Específicamente se trabaja con un modelo de CPU 315-2DP de la marca SIEMENS con un módulo AI 8x13 BIT, con capacidad para 8 de entradas analógicas. Este dispositivo utiliza el principio de medida por integración; dicho período está entre los 50 ms y 60 ms (mucho mayor al tiempo de lectura de la marca descartada).

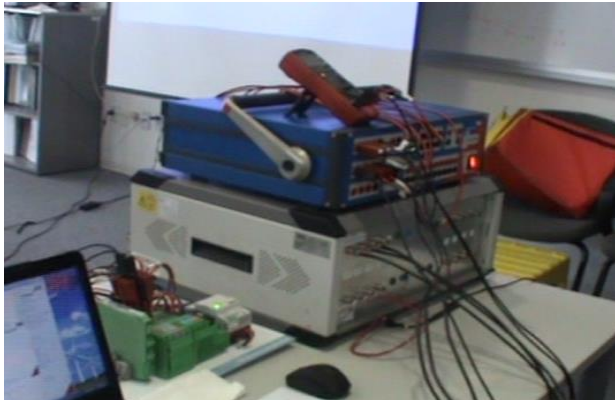


Figura 6 Equipos que permitieron ver la velocidad de respuesta de los PLCs

Después de considerar la marca del PLC, se procedió a programar en el lenguaje de Simulink, mismo que se corrió en MATLAB con un esquema de un generador síncrono, con las variables de entrada y salida.

Una vez programado cada función de control en cada caso se ingresó los parámetros de referencia, así como las señales de entrada y salida para realizar las pruebas de cada función de control, con el objetivo de tener las diversas posibilidades de control y observar la velocidad de respuesta ante arranque o alguna perturbación en el voltaje de salida

Análisis de filtros pasa bajas

Una de las principales aplicaciones del trabajo es que se pone en práctica el análisis en Laplace de los Filtros Pasa Baja.

En el AVR es importante limitar el paso de las señales a cierta frecuencia para mejorar el comportamiento del controlador.

El valor de corte del Filtro lo otorga el usuario. Lo importante es la aplicación del conocimiento físico-matemático a una aplicación final, en este caso, en los estabilizadores de potencia en sus diferentes tipos.

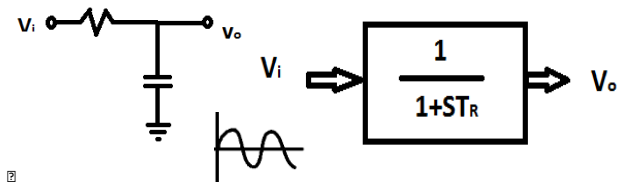


Figura 7 Filtro pasa bajas

$$A = \frac{V_0}{V_i} \tag{15}$$

$$V_0 = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} V_i \tag{16}$$

$$V_0 = \frac{1}{RCS + 1} V_i \tag{17}$$

Si $V_i = V_p \sin \omega t$ (18)

$$V_i(s) = V_p \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \tag{19}$$

$$V_0 = \frac{\omega V_p}{(1 + RCS)(s^2 + \omega^2)} \tag{20}$$

Si $T_R = RC$ (21)

$$V_0 = \frac{\omega V_p}{T_R} \frac{1}{\left(s + \frac{1}{T_R}\right)(s^2 + \omega^2)} \tag{22}$$

$$\frac{1}{\left(s + \frac{1}{T_R}\right)(s^2 + \omega^2)} = \frac{A}{s + \frac{1}{T_R}} + \frac{Bs + C}{s^2 + \omega^2} \tag{23}$$

Desarrollando los sistemas de ecuaciones

$$v_o = \frac{\omega v_p}{T_R} \tag{24}$$

$$v_o = \frac{\omega v_p}{T_R} \left[\frac{T_R^2}{1 + (T_R \omega)^2} e^{-\frac{T}{T_R}} - \frac{T_R^2}{1 + (T_R \omega)^2} \cos \omega T + \frac{T_R}{(1 + (T_R \omega)^2) \omega} \sin \omega t \right] \tag{25}$$

- El 1^{er} sumando corresponde al estado transitorio.
- El 2^{do} y 3^{er} sumando corresponde al estado estable

Simplificando la ecuación (25) tenemos las siguientes ecuaciones.

$$v_o = M \cos(\omega t + \phi) \tag{26}$$

Donde:

$$M = \frac{v_p}{\sqrt{1+(\omega T_R)^2}} \tag{27}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(-\frac{v_p}{\omega T_R v_p}\right) \tag{28}$$

Si se estudia la magnitud M su comportamiento se visualiza en la gráfica tiene el siguiente comportamiento

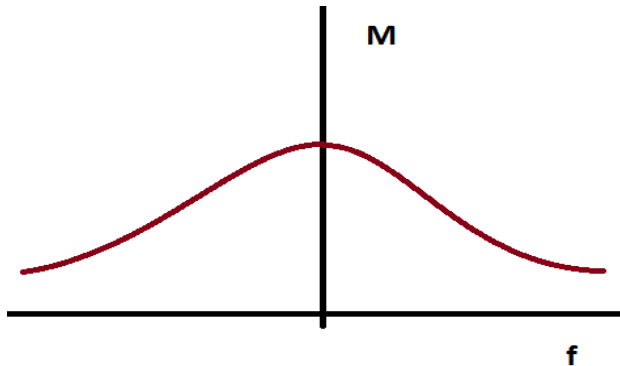
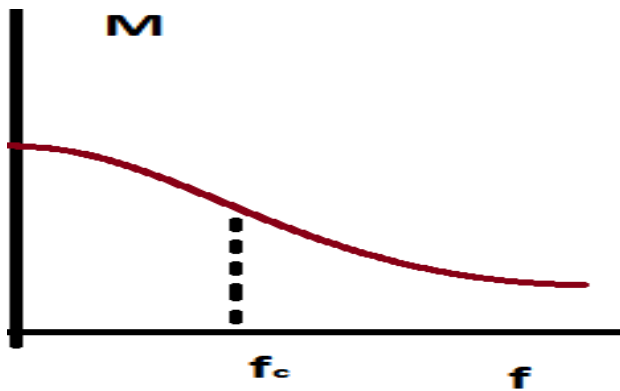


Gráfico 3 Tendencia de M vs f

De acuerdo a la teoría de filtro es un filtro pasa bajas.



Gráfica 4 Filtro pasa bajas

La frecuencia de corte o frecuencia crítica se encuentra con la formula

$$\omega T_R = 1 \tag{29}$$

$$T_R = \frac{1}{2\pi f} \tag{30}$$

$$f = \frac{1}{2\pi T_R} \tag{31}$$

Se debe otorgar el valor de la frecuencia crítica, para que a partir de ésta se encuentre el valor de TR.

Resultados

La regulación automática de voltaje a lazo cerrado

El regulador automático de voltaje (AVR) controla el voltaje en terminales del estator.

Compensador de carga

Es usada para controlar el voltaje representativo, ya sea dentro o fuera del generador. Con esto se mide la corriente por armadura (devanados del estator), la caída de voltaje es sumada o restada al voltaje en terminales. La magnitud resultante Vc es la que llega al AVR, la expresión matemática es:

$$V_c = |E_t + (R_c + jX_c) I_c| \tag{32}$$

El compensador tiene una resistencia ajustable (Rc) y la reactancia inductiva (Xc) que simulan la impedancia entre los terminales del generador y el punto donde la tensión es controlada de forma más efectiva. En la Tabla 2 se muestra las variables utilizadas para el diseño del algoritmo del compensador de carga.

Símbolo	Descripción	Valor
XTg	Reactancia del generador	0.1066

Tabla 2 Variables del compensador de carga

En la figura 8 se la implementación del algoritmo de compensador de carga.

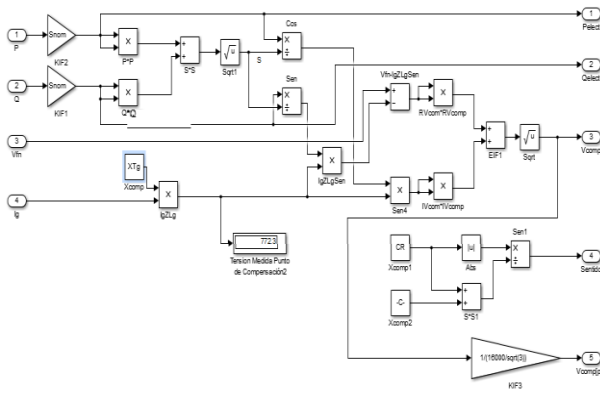
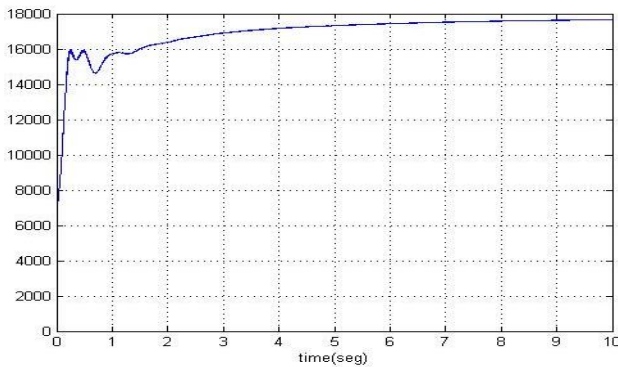


Figura 8 Algoritmo de compensador de carga

El comportamiento del voltaje con el algoritmo de compensador de carga se muestra en la gráfica 5.



Gráfica 5 Voltaje de Compensador de carga

Regulación del compensador de reactivos

Un controlador o regulador de Factor de Potencia o de Potencia Reactiva se define en la IEEE 421.6 como “Controlador VAR/PF: Una función de control que actúa en base a un valor Set Point de referencia para modificar al regulador de voltaje con la finalidad de mantener el factor de potencia o la Potencia Reactiva de la máquina síncrona en estado estable en un valor predeterminado.

En el caso de un regulador VAR/PF, éste elimina la terminal del lazo de retroalimentación y, en su lugar, directamente controla la unidad del voltaje de campo para regular el PF o los VAR hacia el set point de referencia del usuario. Modelado y algoritmo del factor de potencia tipo II. En la figura 9 se muestra el modelo del generador completo con el modulo prueba del controlador del factor de potencia Tipo II desarrollado para este proyecto

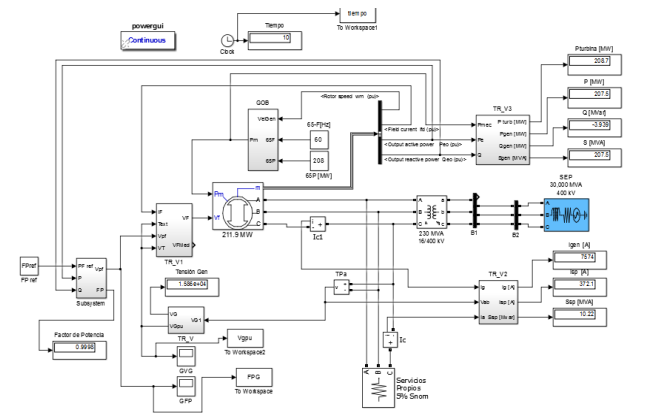


Figura 9 Modelo del generador con el módulo de Factor de Potencia

En la tabla 3 se muestran las variables utilizadas en el algoritmo de factor de potencia.

Símbolo	Descripción	Valor
Fpref	Referencia de factor de potencia	1
Kp	Ganancia Proporcional	1.2
Ki	Ganancia Integral	2
VpfMAX	Voltaje de factor de potencia máximo	1
Vpfmin	Voltaje de factor de potencia mínimo	-1

Tabla 3 Variable de Factor de Potencia

En la Figura 10 se muestra el desarrollo del algoritmo de factor de potencia diseñado en MATLAB.

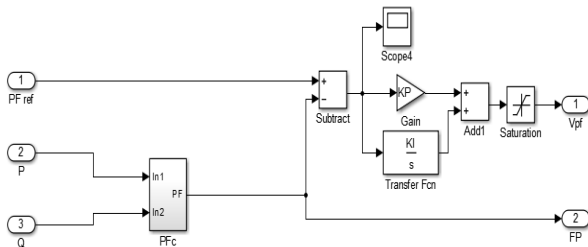
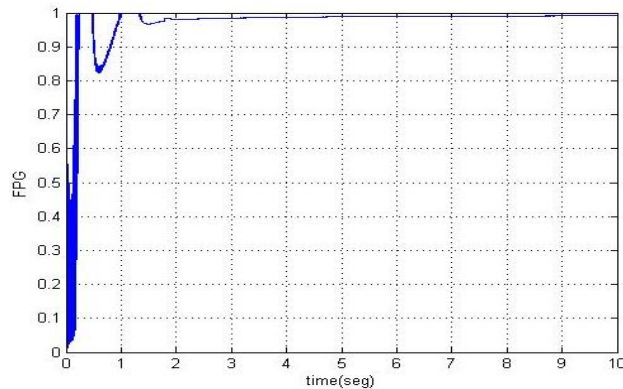


Figura 10 Algoritmo de Factor de Potencia

En la gráfica 6 se muestra el comportamiento del voltaje con el algoritmo factor de potencia desarrollado en MATLAB.



Gráfica 6 Factor de Potencia

Limitador de mínima y sobreexcitación (OEL)

Un limitador de mínima excitación (OEL), funciona a través del regulador de voltaje automático (AVR) para impulsar la excitación cada vez que se detecta una condición de funcionamiento en la que la excitación base sea demasiado baja.

Un UEL es aplicado para uno o más de los siguientes propósitos:

- Para evitar el funcionamiento que pone en peligro la estabilidad de la máquina sincrónica o que podría dar lugar a la pérdida de sincronismo debido a una excitación insuficiente.
- Para evitar la operación que daría lugar a un sobrecalentamiento en la región del extremo del estator de la máquina síncrona, lo cual normalmente se producirá cuando la máquina está absorbiendo grandes cantidades de potencia reactiva como se define por la máquina de la curva de capacidad.
- Evitar la pérdida de campo, al operar el equipo en una etapa sub-excitada.

Los limitadores de sobreexcitación (OEL), también denominado limitador de máxima excitación y limitador de corriente de campo, se han proporcionado con los sistemas de excitación por muchos años, pero recientemente, no se han modelado en sistemas de potencia con simulaciones dinámicas.

Aunque no se requiere el modelado OEL en todos los estudios del sistema, la mayor parte del esfuerzo necesario para implementar estos modelos estará en la recogida de datos del limitador y pruebas de prototipos. El tiempo computacional requerido para procesar estos modelos es mínimo.

La tasa de rampa puede ser constante (Kundur³) o proporcional al nivel de sobreexcitación (Morison, Gao, and Kundur⁴). En los sistemas reales, un OEL puede controlar y limitar una de varias variables (corriente de campo principal o el voltaje, la corriente de campo del excitador o de tensión, etc.)

³Kundur, P., Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.
⁴ Morison, G. K., Gao, B., and Kundur P., "Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches,"

IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 3, pp. 1159–1171, August 1993.

Modelado y algoritmo del OEL

En la Figura 11 se muestra el modelo del generador e implementación de OEL. En la

Tabla 4 se muestra las variables del generador donde se puede notar la implementación del limitador de máxima excitación.

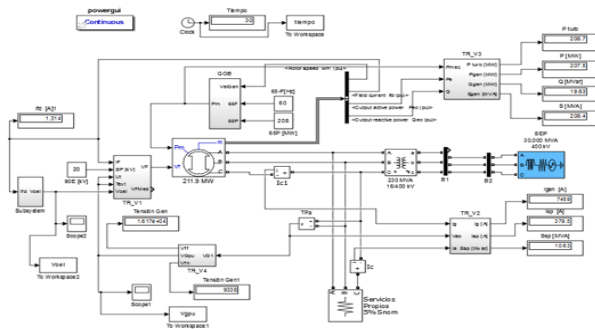


Figura 11 Modelo del generador e implementación de OEL

Símbolo	Descripción	Valor
IFLM1	Limitador de corriente de tiempo	1.6*1.25
IFLM2	Limitador de corriente de tiempo	1.05*1.25
LM1	Limitador 1	-0.085
LM2	Limitador 2	-3.85
K1	Ganancia 1	150
K2	Ganancia 2	0.248
K3	Ganancia 3	12.6
K4	Ganancia 4	140

Tabla 4 Variables del algoritmo OEL

En la Figura 12 se puede apreciar el modelo del Algoritmo OEL.

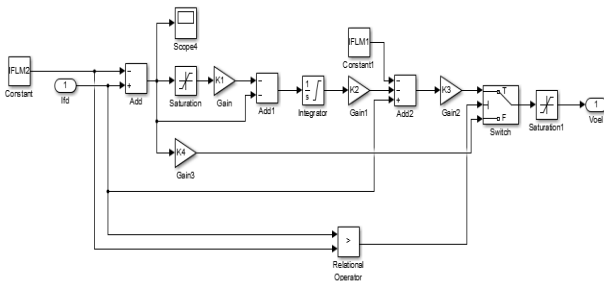
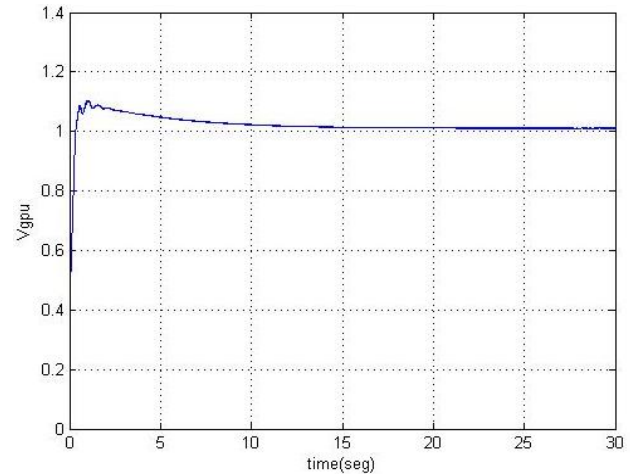


Figura 12 Algoritmo OEL

En la Grafica 7 se observa el comportamiento del voltaje generado en PU con el OEL.



Gráfica 7 Comportamiento del Vg en PU con OE

Agradecimientos

Se agradece las facilidades otorgadas para lograr el presente trabajo a partir de un convenio de colaboración y asignación de recursos, celebrado entre SEDIPSSA Comercializadora S.A. de C.V. y la Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital (UTVM).

Conclusiones

El resultado del trabajo entre cuerpo academico e industria permitio lograr alcances mas interezantes en el analisis de los AVRs desde un enfoque real.Los PID como control del generador se asegura la estabilidad del generador desde el inicio de su operación y aun ante cualquier transitorio que pudiese presentar durante su operación. Derivado de lo anterior incrementa la vida util del generador, y se reduce las penelizaciones por picos de voltaje en la red.

Hay dos características que se deben cuidar en la elección del PLC donde se llevará a cabo el desarrollo de un AVR.

- Velocidad de respuesta del PLC. Con esto se evita trabajar con PLC's que posiblemente no otorguen la velocidad de respuesta necesaria.
- La capacidad de redundancia de forma automática. De esta manera, se evita una programación para lograr un sistema de respaldo.

Cada lazo tiene ciertos criterios que cumplir para una operación estable, que va depender de los valores de referencias, las constantes de los PID y que para lograr modificar estas variables se realizo un HMI para modificar los valores del AVR dependiendo del tipo lazo. Mediante la misma permite ver el comportamiento del sistema mediante monitoreo continuo y sirve como un sistema de alarma, y verificar las variables y verificocar el historial de eventos. Como una mejora a este proyecto, se recomienda la adquisición de un generador síncrono, de esta manera, se pueden llevar a cabo las pruebas en forma física, además de analizar la posibilidad de utilizar tecnología FPGA ya que reduce drásticamente el tiempo de respuesta logrando operar el equivalente en tiempo real, que el procesador del PLC no logra.

Referencias

IEEE 421.5-2005 Cap 8 Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.

Kundur P. Power System Stability and Control 2006

SIEMENS. SIMATIC S7-300. Sistema de automatización S7-300. Datos de los Módulos. Manual de producto. 02/2013.