



Universidad Popular Autónoma del Estado de
Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados

Investigación y Consultaría

Doctorado en Ingeniería Mecatrónica

“Diseño de un control difuso para un compensador
vectorial serie para el control de potencia activa
en una línea de transmisión”

Tesis que para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería Mecatrónica

Presenta

Efrain Villalvazo Laureano

Asesor de tesis

Dr. Juan Miguel González López

Puebla, México

Agosto 2015



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Manzanillo Colima a 31 de Julio de 2015.

A QUIEN CORRESPONDA:
POSGRADOS UPAEP

Por este conducto, hago de su conocimiento que después de haber procedido a la revisión rigurosa y detallada de la Tesis denominada "Diseño de un control difuso para un compensador vectorial serie para el control de potencia activa en una línea de transmisión" que presenta el estudiante Efrain Villalvazo Laureano con número de matrícula 89500002 e inscrito en el Doctorado en Ingeniería Mecatrónica, como revisor, considero aprobada esta para su impresión.

ATENTAMENTE

Dr. Juan Miguel González López
Director de tesis

Dedicatoria

A mi esposa María Guadalupe por haber sacrificado mucho tiempo de familia, además del sacrificio económico.

A mi hija Perla Guadalupe por comprenderme desde los tres años que el doctorado formaba parte de mi trabajo.

A Dios que me permitió llegar hasta la culminación de mi trabajo y me dio fuerza para seguir adelante cuando estaba enfermo.

A mis familiares que en algún momento de mi preparación profesional me apoyaron.

Agradecimientos

A mi asesor el Dr. Juan Miguel González López por conducirme con paciencia y apoyarme siempre que fue necesario.

Al Lic. Juan José Guerrero Rolón Director General de Recursos Humanos de la Universidad de Colima por su gran apoyo para mis estudios doctorales.

A mi amigo Ing. Alfredo López Herrera por haberme dado la oportunidad de entrar a trabajar al sistema de Universidades Tecnológicas e impulsarme a continuar con mi crecimiento académico.

Al M. C. Miguel Santana Rodríguez Rector de la Universidad Tecnológica de Manzanillo por permitirme continuar con mis estudios.

Al Dr. Miguel Ángel Celestino Sánchez por aprobar el inicio de este proyecto de estudios doctorales.

A todos mis compañeros de trabajo que me apoyaron de diferentes formas.

A PROMEP por apoyarme con la beca de nuevo PTC para la realización de este proyecto.

Especialmente a la coordinadora del doctorado a la Dra. Rubí Salazar Amador y mis maestros.

Resumen

En el primer capítulo de este proyecto se realiza un recorrido amplio sobre los principios, antecedentes y conceptos de los diferentes tipos de FACTS; así como los objetivos a cubrir en el desarrollo del mismo, aunado a la justificación técnica y su pertinencia.

El capítulo dos se abordan los principales conceptos de sintonización con dos de los métodos fundamentales y el desarrollo matemático paso a paso aplicado a un SVeC genérico balanceado.

El tercer capítulo se detalla, el modelado de un SVeC en Simulink-Matlab con cada una de sus etapas desde sistema eléctrico de potencia hasta la de electrónica de potencia y control, también describe el funcionamiento de cada uno de los circuitos internos del diseño.

El penúltimo capítulo es el cuarto, el cual incluye el modelado del SVeC con ambos controladores difuso y PID clásico, por otra parte hace un recorrido sobre la historia del arte de varias aplicaciones de controladores difusos a los FACTS y además comprende el desarrollo de las reglas difusas para lograr el control del SVeC.

En el último capítulo el quinto se realiza una presentación de los resultados en forma cualitativa y cuantitativa del desempeño de los controladores difuso y PID clásico aplicados a un SVeC; también se presentan las aportaciones, así como el trabajo a desarrollar a corto y mediano plazo.

Índice general

página

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
CAPÍTULO I.- PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO	1
1.1 Introducción al proyecto.....	1
1.1.1 Generación de energía.	2
1.1.2 Centros de carga.	3
1.1.3 Centros de carga.	4
1.2 Congestión en líneas de transmisión.....	6
1.3 Flujos de potencia incluyendo la tecnología de las redes flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS).	7
1.3.1 El concepto de FACTS.....	7
1.3.2. Clasificación de los FACTS.....	11
1.4 Objetivos.	16
1.4.1 Objetivo general.....	16
1.4.2 Objetivos específicos,	16
1.5 Alcances.....	16
1.6 Antecedentes	17
CAPÍTULO II.- PARÁMETROS DE SINTONIZACIÓN PARA UN CONTROL PID APLICADO PARA UN SVeC.....	20
2.1 Introducción a la sintonización.....	20
2.2 Primer método de Ziegler-Nichols para la sintonía	21
2.3 Segundo método de Ziegler-Nichols para la sintonía.....	23
2.4 Cálculo de los parámetros del PID para un SVeC genérico balanceado.....	24
CAPÍTULO III.- MODELADO DE UN COMPENSADOR VECTORIAL SERIE EN MATLAB-SIMULINK.	32
3.1 Descripción general del circuito.....	32
3.2 Interruptores bidireccionales.....	33
3.3 Comparador de voltaje	37
3.4 Circuito de conmutación con IGBT's	40
CAPÍTULO IV.- MODELADO DE CONTROLADORES PID Y DIFUSO PARA UN SVeC EN SIMULINK- MATLAB.	47

4.1 Descripción general del diagrama en Simulink-Matlab con controlador PID.	47
4.2 Diagrama interno del módulo Controlador P+I.....	48
4.3 Estado del arte de controladores difusos.....	49
4.4 Descripción general del diagrama en Simulink-Matlab con un controlador difuso... 55	
4.5 Funciones de membresía en Matlab.....	56
4.6 Establecimiento de reglas difusas en Matlab.....	58
4.7 Programa de control difuso.....	61
CAPÍTULO V.- RESULTADOS DE SIMULACIÓN COMPENSADOR VECTORIAL SERIE	
CON CONTROLADOR DIFUSO.....	63
5.1 Introducción.....	63
5.2 Diseño del control difuso.	65
5.3 Comparación de resultados.....	70
5.4 Conclusiones.....	74
5.5 Aportaciones	75
5.6 Trabajo futuro.....	76
5.7 Bibliografía	77
5.7 Anexos	80

Índice de figuras

Figura 1 Sistema eléctrico de potencia	1
Figura 2 Generadores eléctricos termoelectrónicos	2
Figura 3 Red de transmisión	3
Figura 4 Distribución y consumo	5
Figura 5 Congestión en líneas de transmisión	6
Figura 6 Esquema ilustrativo del control del flujo de potencia en una línea de transmisión: a) Línea de transmisión puramente inductiva. b) Línea de transmisión con dispositivo FACTS integrado	8
Figura 7 Sistema en lazo cerrado	21
Figura 8 Sistema en lazo abierto con señal escalón	21
Figura 9 Respuesta característica en "S"	22
Figura 10 Sistema de lazo cerrado para el segundo método	23
Figura 11 Línea de transmisión con SVEC	24
Figura 12 Circuito representativo del sistema	25
Figura 13 Diagrama a bloques del sistema	28
Figura 14 Diagrama general	33
Figura 15 IGBT's en emisor común	34
Figura 16 IGBT's en colector común	35
Figura 17 Interruptor bidireccional en colector común	36
Figura 18 Respuesta del interruptor bidireccional en colector común	36
Figura 19 Comparador de voltaje	37
Figura 20 Voltaje de salida con el 90% en alto	38
Figura 21 Voltaje de salida con el 10% en alto	38
Figura 22 Voltaje de salida con el 50%	39
Figura 23 Comparación para la conmutación de voltajes	39
Figura 24 Conmutación con IGBT's	40
Figura 25 Pulsos en IGBT's 1, 3 y 5 con 6M	41
Figura 26 Pulsos en IGBT's 2, 4 y 6 con 6M	41
Figura 27 Pulsos en IGBT's 1, 3 y 5 con 7M	42
Figura 28 Pulsos en IGBT's 2, 4 y 6 con 7M	42
Figura 29 Pulsos en IGBT's 1, 3 y 5 con 9M	43
Figura 30 Pulsos en IGBT's 2, 4 y 6 con 9M	43
Figura 31 Conmutación con IGBT's con medidores de voltaje	44
Figura 32 Voltaje en los IGBT's sin inversor	45
Figura 33 Voltaje serie inyectado en la línea de transmisión de una fase.	46
Figura 34 Controlador PI en Simulink-Matlab	47
Figura 35 Controlador P+I	48
Figura 36 Controlador difuso en Simulink-Matlab	55
Figura 37 Controlador difuso	56
Figura 38 Editor FIS	56
Figura 39 Selección del tipo de controlador	57
Figura 40 Diseño de funciones de membresía	58

Figura 41 Remover y agregar funciones de membresía.....	58
Figura 42 Entrada a la edición de reglas difusas.....	59
Figura 43 Edición de reglas difusas	59
Figura 44 Entrada a la comprobación de reglas difusas.....	60
Figura 45 Comprobación de reglas difusas.....	60
Figura 46 Diagrama a bloques de un controlador difuso	64
Figura 47 Función de pertenencia de entrada.....	65
Figura 48 Función de pertenencia de salida	65
Figura 49 Introducción de señal escalón al control difuso	66
Figura 50 Introducción de señal escalón al control PID.....	67
Figura 51 Variable controlada iniciando en 750MW	67
Figura 52 Pulso de disparo iniciando en 550MW	68
Figura 53 Variable controlada iniciando en 800MW	69
Figura 54 Pulso de disparo iniciando en 600MW	69

Índice de tablas

Tabla 1 Revisión general de FACTS.....	15
Tabla 2 Criterios del primer método	23
Tabla 3 Criterios del segundo método	24
Tabla 4 Arreglo de Routh.....	27
Tabla 5 Subarreglo de Routh.....	28
Tabla 6 Arreglo final.....	29
Tabla 7 Parámetros PID	31
Tabla 8 Lógica de operación.....	37
Tabla 9 Código del programa.....	62
Tabla 10 Matriz de reglas difusas	66
Tabla 11 Resultados con el método de Prony.....	74

CAPÍTULO I.- PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

1.1 Introducción al proyecto.

Un sistema eléctrico está compuesto, en términos generales, por los tres subsistemas (Expósito, 2002).

1. Generación de energía
2. Transmisión
3. Centros de carga.

La Figura 1 muestra un esquema general de un sistema eléctrico, el cual comienza con la generación en las centrales eléctricas, a la salida de éste se encuentra un transformador elevador que hace un cambio de voltaje para transportarlo por las líneas de transmisión con el fin de reducir las pérdidas por el efecto capacitivo que tiene la línea de transmisión con la tierra. Después esta energía pasa por las subestaciones de transmisión y distribución donde en éste último el voltaje es reducido a los niveles establecidos para el consumo de la energía.

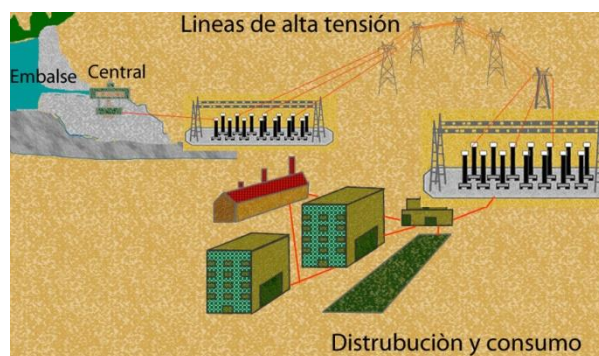


Figura 1 Sistema eléctrico de potencia

1.1.1 Generación de energía.

La energía eléctrica se genera en las centrales eléctricas. Una central eléctrica es una instalación que utiliza una fuente de energía primaria para hacer girar una turbina que, a su vez, hace girar un alternador con la finalidad de producir energía en corriente alterna sinusoidal, generalmente la energía primaria es tomada de los combustibles fósiles: petróleo, gas, carbón, plantas nucleares, etc. La Figura 2 muestra una central termoeléctrica compuesta por 6 generadores hidráulicos. Aunque en años recientes se ha promovido la utilización de fuentes primarias que respeten el medio ambiente como por ejemplo la solar, eólica, hidráulica, biomasa y geotérmica.



Figura 2 Generadores eléctricos termoeléctricos

En régimen normal, todas las unidades generadoras del sistema se encuentran en "sincronismo", es decir, mantienen ángulos de cargas constantes, (Kundur, 1994). En este régimen, la frecuencia debe ser nominal (60 Hz o 50Hz) o muy cercana a éstas para mantener estable al sistema eléctrico de potencia. Los voltajes de generación varían de 2.4 a 24 kV, dependiendo del tipo de central eléctrica.

Una vez generada la energía eléctrica en las centrales, ésta se inyecta en el sistema de transmisión que se configura como una red interconectada de líneas de transmisión y dispositivos de control.

1.1.2 Centros de carga.

La energía se transporta generalmente a grandes distancias desde las centrales eléctricas a los puntos de consumo y esto se logra mediante una red de transporte encargada de enlazarlos, la red consiste en una configuración de líneas de transmisión de energía debidamente interconectadas, que generalmente están construidas sobre grandes torres metálicas que llevan a los conductores que enlazan a las centrales eléctricas con los centros de consumo. La figura 3 muestra una pequeña red de transmisión que conecta a una central eléctrica con un centro de consumo.

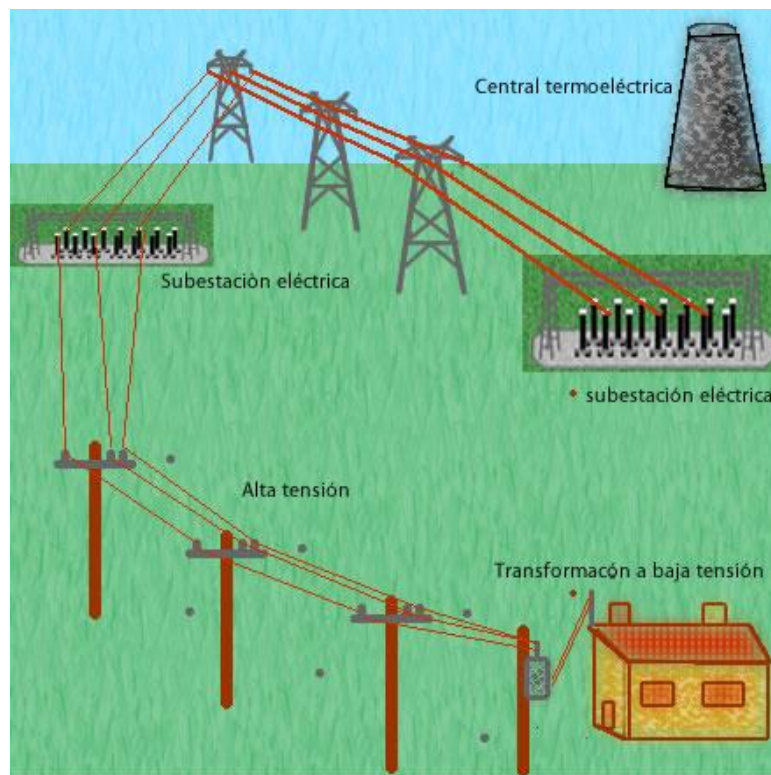


Figura 3 Red de transmisión

El objetivo final de un sistema de transmisión es la de alimentar y distribuir la energía a los consumidores, este sistema interconectado permite la puesta en común de las plantas de energía y centros de carga con el fin de reducir al mínimo la generación de energía, para minimizar el costo del combustible, además de mejorar la fiabilidad de la fuente de alimentación a través de la redundancia hacia los centros de carga. Debido a esta tendencia, las redes de transmisión en todo el mundo se han convertido en enormes sistemas complejos que contienen miles de segmentos de línea de transmisión interconectadas con grandes áreas geográficas con el propósito de distribuir la energía hacia los centros de carga.

1.1.3 Centros de carga.

En la etapa de distribución, la alimentación se toma desde el sistema de transmisión que se entregan a los consumidores en las normas específicas de calidad y fiabilidad mediante las subestaciones eléctricas de transmisión y distribución, (Grainger, 1994). (Hingorani, 2000) (Arriaga, 2001) (Acha, 2004)

Las redes de distribución de energía se encuentran en áreas urbanas y rurales, pueden ser aéreas, o subterráneas (estéticamente mejores, pero más costosas). La red de distribución está formada por una red en alta tensión (suele estar comprendida entre 6.000 a 23.000 Voltios) y otra de baja tensión (400/230 V), (Harper, 2009), para su consumo final.

La Figura 4 muestra un esquema general del sistema de distribución desde el punto donde el voltaje es reducido para transportar la energía hacia los centros de consumo, tal como casas, departamentos, y la industria.

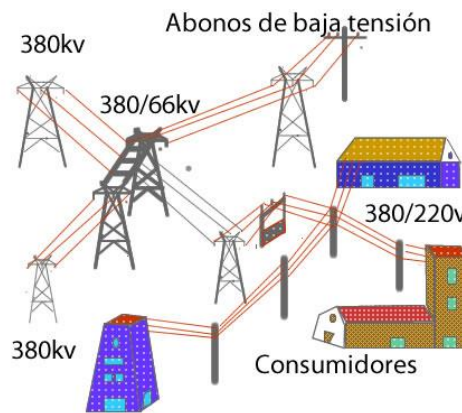


Figura 4 Distribución y consumo

En los últimos años los centros de carga han aumentado el consumo de energía eléctrica debido al rápido crecimiento de la población y de la industria lo que provoca un aumento en la generación que se debe transportar desde los centros de generación hasta los consumidores provocando que algunas líneas de transmisión se saturen o congestionen la red de transmisión y estén trabajando cerca de sus límites físicos. Una solución a éste problema es la de construir nuevas líneas de transmisión, pero generan un costo muy elevado. Además, debido a las presiones sobre el cuidado y conservación del medio ambiente y del derecho de vía, hace cada vez es más difícil, si no imposible, la construcción de nuevas líneas de transmisión con el fin de satisfacer la siempre creciente demanda de energía eléctrica, (Hingorani, 2000), (Arriaga, 2001), (Acha, 2004).

Como resultado de esto, los sistemas de transmisión de potencia actuales se ven obligadas a trabajar cerca de sus límites de capacidad y se han observado en varias regiones líneas de transmisión muy congestionadas, en particular aquellos con gran crecimiento de carga en grandes ciudades generalmente sobrepobladas, (Hingorani, 2000).

1.2 Congestión en líneas de transmisión.

Muchos sistemas en la actualidad adolecen de serias deficiencias; y la seguridad del sistema, por este motivo, es causa de preocupación. Algunos análisis recientes concernientes a las condiciones de seguridad han puesto en evidencia que muchos sistemas son bastante inseguros, en el sentido que una falla de algunas de sus líneas de transmisión podría causar apagones con una alta probabilidad, causando pérdidas millonarias en todos los aspectos, (Hingorani, 2000), (Kundur, 1994) (Taylor, 1994) (Van Cutsem, 1998), (Bertizlioglu I. N., Yalcin T., Otgonenel O., 2011).

Este crecimiento excesivo en el consumo de energía en los sistemas de potencia hace que estos sean cada vez más difíciles de controlar, ya que muchas líneas de transmisión trabajan cerca de sus límites físicos y además congestionados. Esto limita la disponibilidad y el crecimiento de la capacidad de generación (Taylor, 1994), (Van Cutsem, 1998), (Kundur, 1994), por lo que su manejo y operación implica un gran reto, además de que es una tarea compleja que enfrentan los ingenieros e investigadores en el área.

El concepto de la congestión en las redes de transmisión puede ser entendido mediante la siguiente consideración de un caso simple en la que un generador alimenta a una carga a través de dos líneas de transmisión que están conectadas en paralelo, tal como se sugiere en la Figura 5.

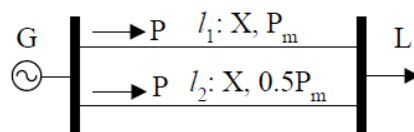


Figura 5 Congestión en líneas de transmisión

Se dice que la línea de transmisión marcada como l_1 tiene una impedancia X y una capacidad máxima para llevar energía eléctrica dado por P_m . La segunda línea, l_2 , tiene exactamente la misma impedancia que l_1 pero el máximo de su capacidad está a sólo $0,5 P_m$. Ya que tanto las líneas tienen la misma impedancia, la potencia que se envía desde el generador G a la carga L igualmente se divide en las dos líneas de transmisión, como se sugiere en la figura. Cuando la potencia demandada por L es menos de P_m , el sistema funciona dentro de su margen de maniobra de capacidad, ya que cada línea lleva menos energía que $0,5 P_m$. Sin embargo, cuando la carga L demanda más energía de P_m , es decir $1,2 P_m$ por ejemplo, cada línea lleva $0,6 P_m$, el cual sobrecarga la línea l_2 . Tomando en cuenta que la capacidad combinada de ambas líneas es de $1,2 P_m$, pero el sistema no es capaz de transportar una cantidad tal de potencia, debido a la congestión en una de sus líneas. Situaciones como ésta, en un contexto más complejo, son muy frecuentes en sistemas de energía modernos (Mancilla F. D., 2008). De igual forma también es posible que se genere una congestión en una sola línea de transmisión que no esté conectada en paralelo con otra. Una de las primeras soluciones a este problema fue planteada por (Hingorani, 2000) (Mansour, 1990) con la utilización de los dispositivos flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS) por sus siglas en inglés.

1.3 Flujos de potencia incluyendo la tecnología de las redes flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS).

1.3.1 El concepto de FACTS.

Los sistemas de potencia convencionales, especialmente las líneas de transmisión se dicen que son inflexibles debido a que ofrecen poca o nula posibilidad de control en el flujo de potencia.

La tecnología FACTS es hoy una opción para incrementar la potencia transmitida y mejorar el control de los parámetros que gobiernan la operación cambiándolos de manera flexible.

Los principios básicos para el control de flujo de potencia pueden ser entendidos al considerar una línea de transmisión puramente inductiva que conecta dos subestaciones, como se ha sugerido en la Figura 6.

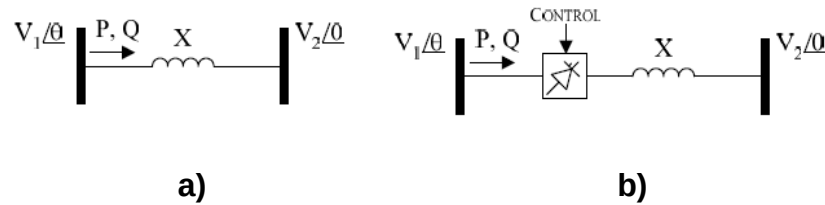


Figura 6 Esquema ilustrativo del control del flujo de potencia en una línea de transmisión: a) Línea de transmisión puramente inductiva. b) Línea de transmisión con dispositivo FACTS integrado

Usando vectores fasoriales se puede demostrar que el flujo de potencia medida en la línea de transmisión es dada por:

$$S = P + j.Q = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta + \left(\frac{V_1^2}{X} - \frac{V_1 V_2}{X} \cos \theta \right) \quad (1.1)$$

En donde P y Q son el flujo de energía conocidos como potencia activa y reactiva, respectivamente. Se puede ver de la ecuación (1.1) que el valor del flujo de alimentación depende de cuatro parámetros, a saber, la magnitud de la tensión en cada bus, V_1 y V_2 , el ángulo de transmisión, θ , y la línea reactancia, X.

Considerando ahora la inserción de un dispositivo FACTS como se muestra en la Figura 7 (b). A través de un control de electrónica de potencia, los dispositivos FACTS son capaces de modificar uno (o más) de los parámetros que definen el flujo de potencia de la ecuación, y por lo tanto controlar el flujo en la línea. Esta

simple, pero esta potente idea es el núcleo de la tecnología de los dispositivos FACTS.

Es evidente de la ecuación (1.1) que la modificación de cualquiera de los parámetros afecta tanto la potencia activa y reactiva simultáneamente. Por lo tanto, el control del ángulo θ de transmisión o la reactancia X de línea pueden ser considerados como compensación de la potencia activa mientras que en el control de la tensión en el bus se puede considerar como compensación de energía reactiva. (Taylor, 1994), (Mansour, 1990).

Esta opción para mitigar esta clase de problemas, los FACTS ofrecen la posibilidad de controlar acciones de una manera mucho más rápida (Hingorani, 2000), (Arriaga, 2001) y (Acha, 2004).

El desarrollo de la electrónica de potencia ha conducido al desarrollo e implementación de estos dispositivos con una gran velocidad de operación y con pocos problemas técnicos. Los FACTS desarrollados a finales de los 80s pueden controlar el flujo de potencia en una línea de transmisión o el voltaje en una subestación eléctrica; esto permite utilizar las líneas cerca de sus límites térmicos y/o forzar los flujos de potencia por rutas determinadas.

Debido a la rapidez en su operación, estos dispositivos también pueden ser utilizados para controlar problemas dinámicos del sistema.

De acuerdo al IEEE la definición de estos dispositivos es la siguiente (Hingorani, 2000):

(Lehn, 1998) (Pranesh, 2000) (Sen, 1998) (Song, 1999) (Gyugyi, 1995) (Uzunovic, 2001) "Sistema de transmisión de corriente alterna que incorpora controladores estáticos basados en electrónica de potencia para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia."

La tecnología de FACTS abre nuevas oportunidades en el control de la potencia y el incremento de la capacidad disponible en el sistema de potencia, ya que la posibilidad de controlar la corriente a través de una línea a un costo razonable, permite incrementar la capacidad de las líneas existentes en la red de transmisión. México pronto tendrá que evolucionar para lograr una mayor eficiencia en la transmisión y comercialización de la energía eléctrica, lo que motivará el uso de los dispositivos FACTS.

Las ventajas que se tienen al poder ejercer este tipo de controles se deben principalmente a que los dispositivos FACTS tienen la característica peculiar de variar, de manera controlada, los siguientes parámetros eléctricos del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP):

- a. La impedancia de la línea de transmisión.
- b. La magnitud de voltaje de algún nodo del sistema.
- c. El ángulo de fase en algún nodo del sistema.

Es importante mencionar que la modificación de cada uno de los parámetros citados persigue un objetivo predeterminado de control, y dicha acción efectúa un manejo específico sobre otros parámetros del sistema.

Asimismo, la introducción de esta clase de dispositivos ha tenido efectos importantes en el aspecto económico de las compañías suministradoras, razón por la cual se ha despertado un mayor interés en el desarrollo de esta tecnología por parte de los inversionistas en el ramo.

1.3.2. Clasificación de los FACTS

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo de la electrónica de potencia ha conducido al desarrollo e implementación de los dispositivos FACTS. En la revisión de la literatura se puede observar una evolución acelerada de la electrónica de potencia y con está la utilización de la tecnología de los FACTS. En la actualidad existen una serie de dispositivos que se han diseñado para mitigar los problemas mencionados. Una manera de clasificar los dispositivos FACTS existentes es de acuerdo a la tecnología de conmutación del dispositivo; considerando esto se tienen dos categorías:

1. Controladores FACTS basados en tiristores convencionales; por ejemplo

- a. Reactor controlado por tiristores..... TCR, (Song, 1999), (Acha, 2004).
- b. Compensador estático de VARs..... SVC, (Mithulananthan N. C., 2003).
- c. Compensador serie controlado por tiristores..... TCSC (Savelli, 2007), (Venkataramanan G. a., 2002).

2. Controladores FACTS basados totalmente en dispositivos semiconductores. En esta clase de FACTS se emplean dispositivos como IGBT y GTO, (por sus siglas en Inglés); por ejemplo

- a. Compensador estático síncrono..... STATCOM, (Lehn, 1998), (Pranesh, 2000), (Uzunovic, 2001).

b. Compensador serie estático síncrono..... SSSC, (Sen, 1998), (Song, 1999), (Mancilla F. D., 2008).

c. Controlador unificado de flujos de potencia..... UPFC, (Gyugyi, 1995), (Uzunovic, 2001).

Otra clasificación que se tiene de estos dispositivos es en función del tipo de conexión que se emplea para enlazarlos con el SEP, llevando ésta a cuatro grandes categorías:

1. Dispositivos en serie.

2. Dispositivos en paralelo.

3. Dispositivos serie-serie.

4. Dispositivos serie-paralelo.

La elección del dispositivo FACTS a utilizar es muy importante y esto depende de los propósitos que se persiguen de acuerdo a las condiciones específicas de operación del SEP, ya que una elección errónea, puede traer como consecuencia un agravamiento del problema que se quiere mitigar en vez de contribuir positivamente a la solución del mismo. Una propiedad única de los FACTS es la gran flexibilidad que presentan en los tres estados operativos del sistema de potencia: prefalla, falla y postfalla. La capacidad para controlar transitorios y para impactar rápida y significativamente el estado de postfalla los hace sumamente atractivos, (Arriaga, 2001), (Acha, 2004).

Todos los dispositivos FACTS mencionados anteriormente y existentes hasta ahora están basados en convertidores de c.c.-c.c. esto representa una gran variedad problemas en el control de la variable deseada, principalmente debido a la sincronización del (Expósito, 2002)dispositivo con la red eléctrica.

En la Tabla 1 se puede observar que a través de los años y gracias al avance significativo de la electrónica de potencia se han venido diseñando mejores, más compactos y económicos dispositivos FACTS. La mayoría de los dispositivos FACTS convencionales ha sido ampliamente estudiada bajo un sinnúmero de aplicaciones, tal como control de flujos de potencia activa y reactiva, control de la magnitud de voltaje, amortiguamiento de oscilaciones de potencia, optimización de flujos de potencia en el SEP, entre otras (González J. M., 2007), (M. Barragan Villarejo, G. Venkataramanan, F. Mancilla David, J. M. Mata Ortega, A. Gómez Exposito, 2012).

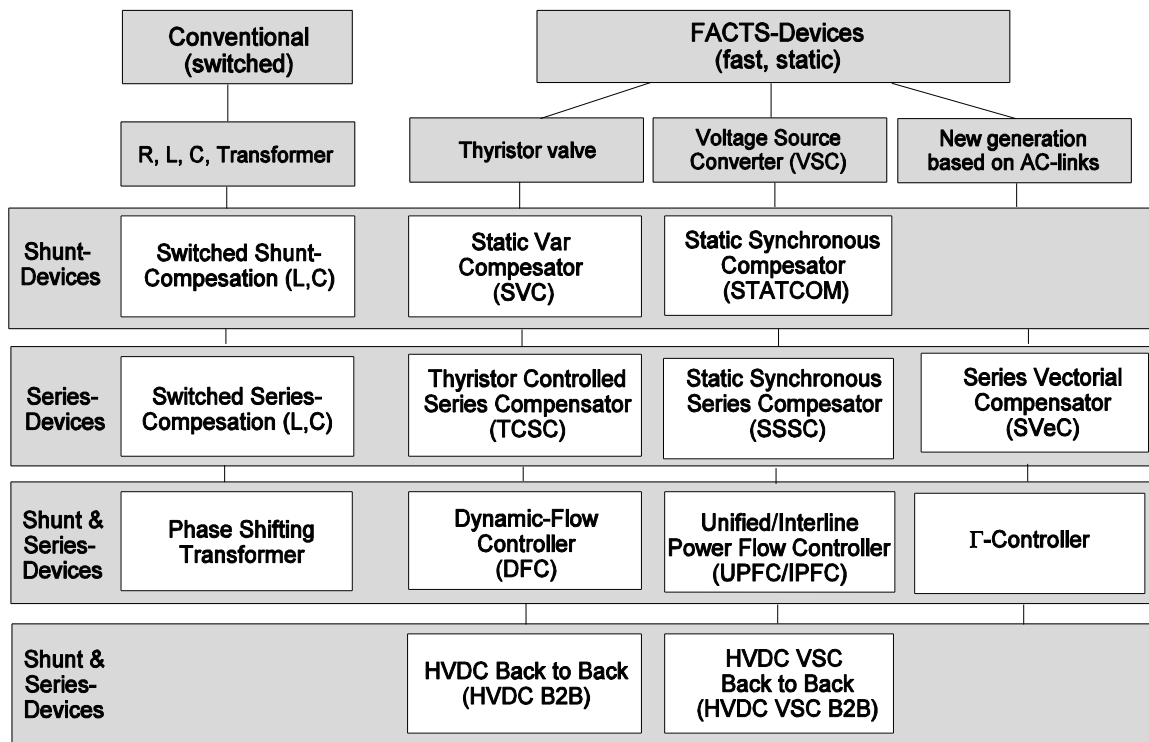
En años recientes, se han propuesto nuevos dispositivos basados en fuentes convertidoras de a.c./a.c. para controlar el flujo de potencia en una línea de transmisión (Lopes, 2001), (Venkataramanan G. , 2004) y (Venkataramanan G. a., 2002). Estos dispositivos tienen la ventaja de no requerir un enlace de c.c. y por lo tanto la sincronización en la conexión no es un problema, ya que su principio de operación se basa en la modulación por ancho de pulso para controlar de mejor forma el flujo en las líneas de transmisión y pueden realizar los mismos objetivos que los dispositivos de FACTS convencionales.

La compensación se logra mediante una fuente convertidora de a.c./a.c. el cual conecta una fuente de a.c. con la carga a través del control de la conmutación de interruptores bidireccionales. La señal de salida de a.c. con magnitud y frecuencia ajustables se realiza con un simple proceso de conversión de potencia. El principio de conversión de la fuente se realiza con una estructura distinta que los convencionales, ya que no requiere grandes cantidades de energía almacenada, (Peng, 2003), (Simon, 2002) y (Wheeler, 2002). Por consiguiente, la topología de la fuente se realiza con un tamaño compacto y con un volumen relativamente pequeño comparado con las fuentes rectificadoras basadas en los convertidores de fuente de voltaje por modulación del ancho de pulso (PWM-VSC) donde el condensador ocupa generalmente del 30 al 50% del tamaño total del convertidor. Esta característica es muy prometedora debido a la tendencia en el volumen y

precio de las fuentes convertidoras de potencia; además el flujo de potencia en el convertidor puede ser bidireccional. También de que la fuente puede operar en lugares donde las temperaturas son altas debido a la falta de condensadores electrolíticos que son muy vulnerables a altas temperaturas que son usados por los FACTS convencionales.

A estos dispositivos se les conoce como la tercera generación de dispositivos FACTS y en la actualidad solo existen dos tipos de estos. Algunos de ellos conectados en serie para controlar el flujo de potencia activa a través de una línea de transmisión, y el otro dispositivo es la combinación de una conexión serie-paralelo, con el fin de controlar no solo la potencia activa sino también la potencia reactiva. En la actualidad se han hecho una serie de estudios de estos dispositivos, respecto al impacto que estos podrían ocasionar en el sistema eléctrico de potencia (Mancilla F. D., 2008), (Ramirez, 2007), (Ramírez, 2007) y (Gonzalez, 2010). Los resultados obtenidos muestran una competitividad enorme de esta nueva generación respecto a los existentes.

Tabla 1 Revisión general de FACTS, (González J. M., 2010)



Hablando exclusivamente de la nueva generación de FACTS en el estado del arte se puede encontrar una serie de análisis respecto al dispositivo serie basado en un convertidor a.c/a.c que han dado solución a muchos de los problemas en la transmisión de la energía eléctrica, sin embargo no se ha abundado mucho sobre estrategias de control que tomen en cuenta la no linealidad de los interruptores. Las preguntas inminentes para este tipo de problema en los dispositivos FACTS son ¿Para qué es necesario diseñar e implementar una estrategia de control que tome en cuenta la no linealidad de los interruptores? y ¿qué sistema de control es el más adecuado para mejorar el rendimiento?

Este proyecto está enfocado en la búsqueda de las respuestas a estas dos preguntas, con la finalidad de encontrar la mejor estrategia de control que se adapte adecuadamente a este dispositivo para mejorar su comportamiento dentro del sistema eléctrico de potencia.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Diseñar de un algoritmo de control para el dispositivo FACTS SVeC conectado en serie con la línea de transmisión con el fin de controlar el flujo de potencia activa de una mejor forma bajo la estrategia de un control difuso, el cual puede mejorar el comportamiento con respecto a los analizados con anterioridad.

1.4.2 Objetivos específicos,

- Diseñar un prototipo de interruptores monofásicos bidireccionales para analizar su comportamiento
- Diseñar un prototipo de interruptores trifásicos bidireccionales para analizar su comportamiento
- Validar un modelo fasorial contra simulaciones del SVeC en gran detalle.
- En base a las simulaciones del control difuso, analizar su comportamiento dentro de una línea de transmisión.

1.5 Alcances

Se diseñaran y comprobaran en Simulink-Matlab interruptores bidireccionales de a.c. con la finalidad de estudiar su comportamiento, estos se realizaran en baja tensión y baja potencia, solo para analizar formas de onda, respuesta en el tiempo, distorsión armónica y caídas de tensión. Después de concluida la tesis, se realizará el análisis en baja tensión para posteriormente migrar a media tensión.

En la literatura se puede encontrar un análisis en forma fasorial del dispositivo SVeC dentro de un sistema eléctrico de potencia, este tipo de análisis tiene potencial enorme en el estudio de la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, ya que manejan cientos o miles de ecuaciones al mismo tiempo para representar a los dispositivos del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), en otras palabras se realiza un modelo equivalente a cientos o miles de dispositivos de un

SEP, con lo que se permite un paso de integración grande y rápida solución. Sin embargo el SVeC es también modelado en forma fasorial siendo también una representación equivalente, haciendo necesario la validación de este modelo contra el modelado en detalle de los dispositivos electrónicos y de esta forma pueda ser utilizado el modelo fasorial con toda la confianza dentro de software especializado para contingencias debido a la entrega de una solución rápida.

Una de las alternativas para la realización del control en forma segura y efectiva es el control difuso, éste ha demostrado ser una herramienta de control muy poderoso y además relativamente fácil de diseñar porque está basada en la forma de razonar del ser humano y se compone fundamentalmente de reglas IF THEN. Por lo consiguiente se plantea diseñar y aplicar esta estrategia de control al dispositivo SVeC.

1.6 Antecedentes

Recientemente nuevos controladores basados en convertidores basados en convertidos vectoriales a.c/a.c han sido propuestos demostrando con ellos que es posible alcanzar los objetivos basados en d.c. Hablado exclusivamente de la nueva generación de FACTS, (Lopes, 2001) diseñó el primer dispositivo FACTS serie basado en un convertidor a.c para controlar el flujo de potencia activa entre dos líneas de transmisión, donde describe el uso de un SVeC para el control de la potencia activa en una línea de transmisión con una estructura simple, inyectando una reactancia capacitiva serie que es ajustada automáticamente a través del ciclo de trabajo.

Una breve comparación del SVeC con respecto al TCSC es presentado en (Mancilla, F. D., 2005) dentro de un pequeño sistema de potencia radial que consta de tres subestaciones, un generador y una carga, mostrando que el SVeC presenta un control más suave que el Compensador Serie Controlado por Tiristor (TCSC) durante transitorios, ya que el TCSC se diseña para “brincar” de una

región operativa capacitiva hacia la inductiva en condiciones de transitorios para evitar la operación de circuito abierto y reducir armónicos.

En una evaluación comparativa entre el SVeC y el SSSC es presentada en (Mancilla F. D., 2008), esta comparación está basada en el modelado a gran detalle de los interruptores dentro de un sistema máquina-bus-infinito, mostrando que el Compensador Serie Estático Síncrono (SSSC) requiere almacenar energía capacitiva cerca del doble y aproximadamente 66% extra de semiconductores para la misma aplicación. En la práctica ningún SVeC ha sido construido o instalado en una línea de transmisión real, de cualquier forma una estimación comparativa del costo de los componentes para estos dos controladores también es presentada en (Mancilla F. D., 2008). En este artículo se muestra que el costo del SSSC es más alto que el SVeC.

(González J. M., 2007), (Gonzalez, 2010), (González, 2006) y (Ramírez, 2007) analizaron estos dispositivos desde el punto de vista del sistema eléctrico de potencia, realizando un análisis en estado estable y de estabilidad transitoria, mediante un análisis fasorial implementándolo en el método de Newton Raphson y Euler modificado, con un control PI, además realizó comparaciones de este dispositivo con el SSSC y el TCSC demostrando que es muy competitivo también en cuanto al desempeño dentro del sistema eléctrico de potencia.

Se presenta también por primera vez una evaluación completa de este dispositivo respecto a controladores similares, TCSC y SSSC en su aplicación para el control de oscilaciones de potencia, estabilidad de voltaje y análisis de pequeña señal con sus modelos y controles asociados para su análisis.

Los resultados obtenidos ilustran que con la aplicación del SVeC se mejoran las oscilaciones cuando se compara con el TCSC y con el SSSC, consecuentemente la construcción de este tipo de dispositivos puede ser una mejor alternativa respecto a los ya existentes para la compensación dinámica en serie de líneas de

transmisión, especialmente donde el espacio y el costo en la construcción son un problema (González J. M., 2010).

La rápida conmutación de los IGBT's ocasiona un comportamiento no lineal que aún no ha sido explorado en esta nueva topología de FACTS, mientras que en los convencionales se ha demostrado que se tiene un mejor comportamiento con el diseño de estrategias de control más complejos como por ejemplo la logia difusa, entre otros. Por lo que exististe una área de oportunidad por explorar en esta área, ya que la incógnita inminente es ¿Esta topología se desempeñará mejor con otras estrategias de control más complejas que tomen en cuenta la conmutación de los IGBT's?

De ahí que el presente proyecto de investigación este enfocado en el diseño de un algoritmo de control para el dispositivo FACTS basado en esta nueva generación conectado en serie con el fin de controlar el flujo de potencia activa de una mejor forma bajo la estrategia de un control difuso, ya que este tipo de control ha demostrado ser más eficiente en muchas de las aplicaciones, en donde el control clásico y moderno no han sido capaces de arrojar resultados eficientes; además de la facilidad de implementar los algoritmos y estrategias de control en dispositivos electrónicos.

CAPÍTULO II.-PARÁMETROS DE SINTONIZACIÓN PARA UN CONTROL PID APLICADO PARA UN SVeC.

2.1 Introducción a la sintonización

El término sintonización describe el proceso de selección de los mejores parámetros del controlador. En el controlador proporcional se refiere a la determinación del valor de k_p ; con el controlador PID hay que elegir las tres constantes k_p , k_d y k_i . (Bolton, 2012).

En todo sistema de control se requiere tener la mejor respuesta ante cualquier disturbio o condición anormal del proceso y variable que se está regulando; para ello es necesario buscar entre varios tipos de técnicas de control la más idónea, con la finalidad de obtener la mejor respuesta ante cualquier cambio en las variables del proceso, ya sean por un cambio en el punto de ajuste o por cambios externos.

En los controladores PID la sintonía de sus principales parámetros o ganancias proporcional, derivativa e integral, es el método para hallar los valores numéricos de cada parámetro que permitan tener una respuesta adecuada en el proceso a controlar. Generalmente la ecuación de lazo cerrado formada por la dinámica del proceso y el algoritmo de control representan una ecuación diferencial, por lo que el procedimiento de sintonía en sistemas lineales tales como Nyquist, Bode y lugar de las raíces son difíciles de aplicar o inclusive no es posible su aplicación.

La mayoría de los controladores PID se ajustan en campo, en muchos libros y artículos se pueden encontrar múltiples métodos y reglas de sintonía que logran una sintonización fina de los controladores PID en sitio. También se ha logrado el desarrollo de algunos métodos que consiguen la sintonización en forma automática en línea.

Cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analítico, es cuando los controladores PID resultan más útiles. En el campo de los sistemas para el control de procesos, es un hecho que los esquemas de control PID básicos y modificados han demostrado su utilidad para aportar un control satisfactorio, aunque en muchas situaciones no aporten un control óptimo. (Ogata, 2010).

2.2 Primer método de Ziegler-Nichols para la sintonía

En el primer método, se verifica en forma experimental la respuesta del proceso ante una señal tipo escalón unitario, para esto se abre entre el controlador y la unidad de corrección, con el fin de que no se genere ninguna acción de corrección, quedando el sistema de lazo cerrado de la figura 7 como el que se muestra en la figura 8 (Ogata, 2010).

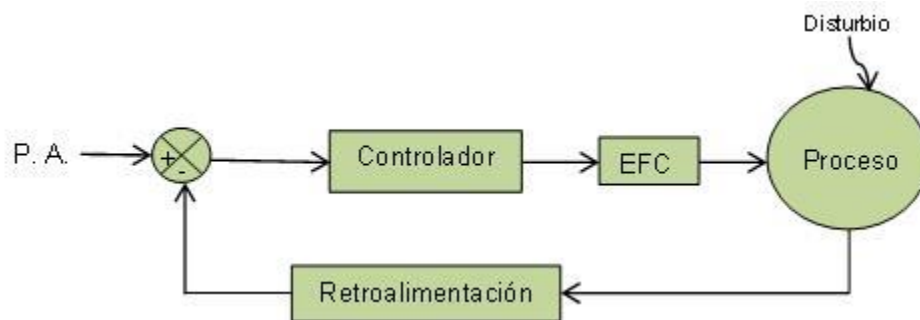


Figura 7 Sistema en lazo cerrado

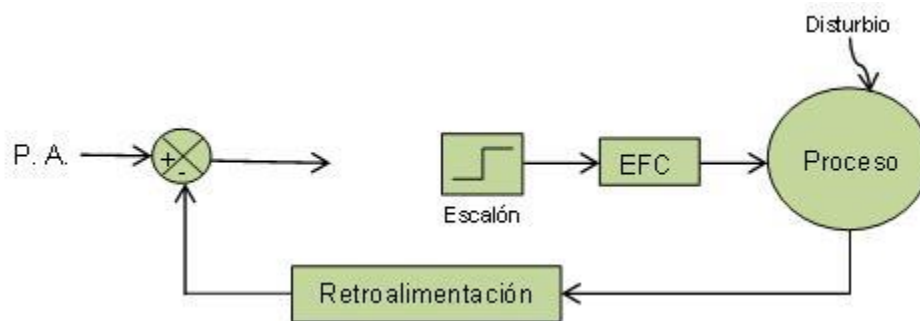


Figura 8 Sistema en lazo abierto con señal escalón

Se introduce una señal de prueba y se determina el comportamiento de la variable controlada, esta señal debe ser lo más pequeña posible, siempre y cuando las condiciones del proceso lo permitan (Bolton, 2012). La señal que se introduce debe ser tipo escalón, la curva de respuesta al escalón unitario puede ser en forma de “S” y este método solo se aplica, si existe la respuesta en esta forma. (Ogata, 2010).

La curva en forma de “S” contiene dos parámetros importantes para este método: el primero es el tiempo de retardo “L” y el segundo la constante de tiempo “T”. Estos dos parámetros se encuentran trazando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva y se verifica la intersección de esta tangente con el eje del tiempo y cuando la línea $c(t) = k$, esto se puede visualizar en la figura 9.

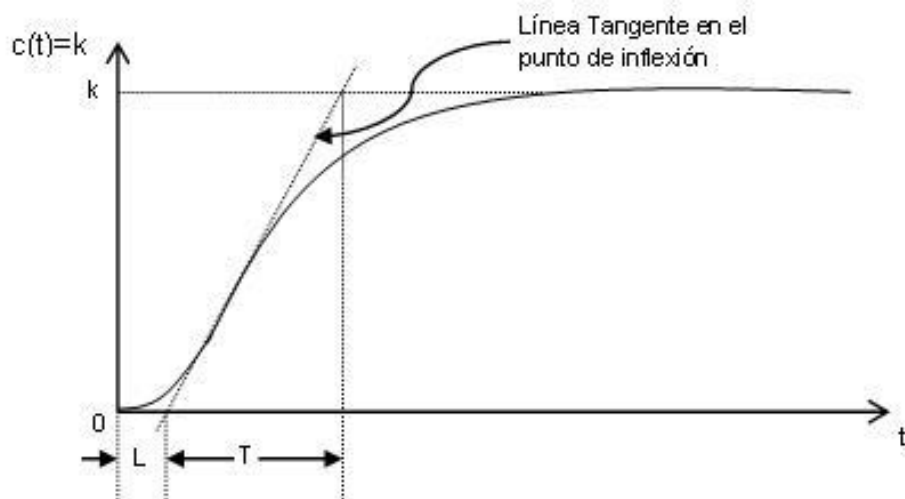


Figura 9 Respuesta característica en “S”

La tabla 2 muestra el criterio recomendado por Ziegler y Nichols para seleccionar los parámetros del controlador PID.

Tabla 2 Criterios del primer método

Tipo de controlador	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

2.3 Segundo método de Ziegler-Nichols para la sintonía.

En el segundo método en primer lugar se establecen los valores $T_i = \infty$ y $T_d = 0$ posteriormente se establece un valor muy pequeño de la constante proporcional y paulatinamente se va incrementando, al mismo tiempo se deben aplicar pequeñas perturbaciones al proceso. Se continúa hasta el punto que la variable controlada oscila continuamente; cuando sucede esto, se ha encontrado el valor crítico de la constante proporcional (Bolton, 2012). La aplicación de este método se muestra en la figura 10.

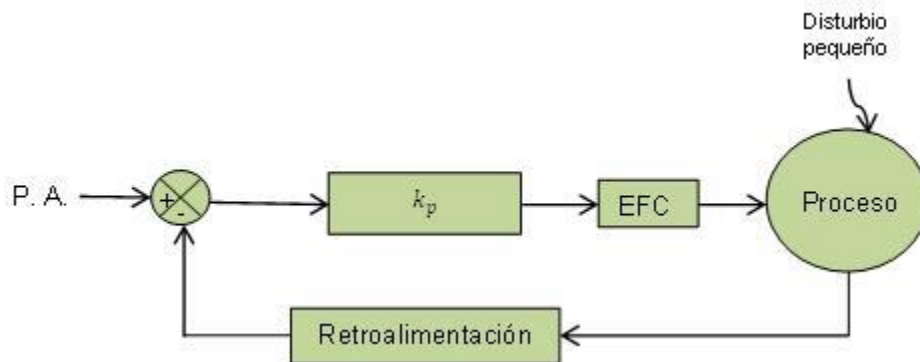


Figura 10 Sistema de lazo cerrado para el segundo método

Hallándose este parámetro se procede a la utilización de los valores de la tabla 3 y se calculan los restantes.

Tabla 3 Criterios del segundo método

Tipo de controlador	k_p	T_i	T_d
P	$0.5k_{cr}$	∞	0
PI	$0.45k_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6k_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Hay que tomar en cuenta que los dos métodos de sintonía de Ziegler-Nichols durante varios años se han empleado para la sintonización de controladores PID en procesos en que se conoce perfectamente la dinámica y modelo de la planta.

2.4 Cálculo de los parámetros del PID para un SVeC genérico balanceado.

El esquema del SVeC se muestra en la Figura 11, (Lopes, 2001). Este compensador serie consiste de: T_a, T_b, T_c – Transformador trifásico, S_a, S_b, S_c – S'_a, S'_b, S'_c Interruptores electrónicos C_a, C_b, C_c – Capacitores.

Transformador de inyección serie

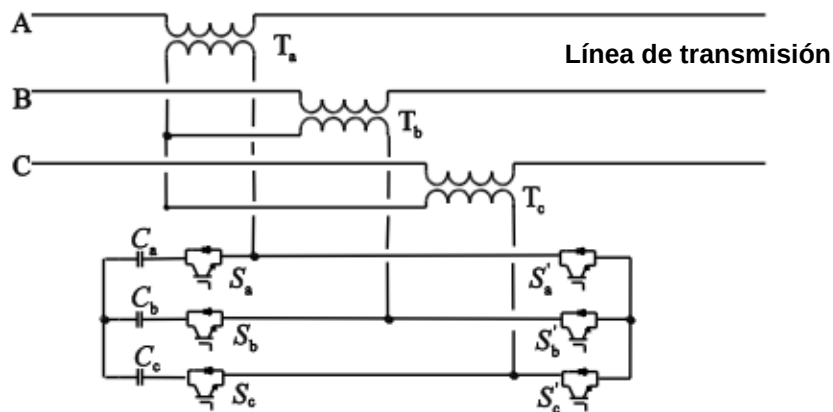


Figura 11 Línea de transmisión con SVeC

El compensador SVeC básicamente provee una reactancia capacitiva variable X , el cual se ajusta a través de las variaciones del ciclo de trabajo, implementados en los interruptores electrónicos. Por lo tanto se puede decir que este dispositivo controla el flujo de potencia variando la reactancia.

Si los voltajes de las tres fases del circuito son iguales en amplitud pero desfasados en el tiempo y también las tres corrientes del circuito son iguales en amplitud pero desfasadas en el tiempo 120° en un circuito trifásico balanceado solamente es necesario obtener los datos de una sola fase, para calcular los datos de las demás fases a partir de esta.

Para iniciar con el cálculo de los parámetros se debe tener un modelo del proceso o la función de transferencia del SVeC, para esto se toma como base el diagrama de la figura 12.

Donde se calculan las caídas de tensión en cada elemento como se representan en la ecuación 2.1.

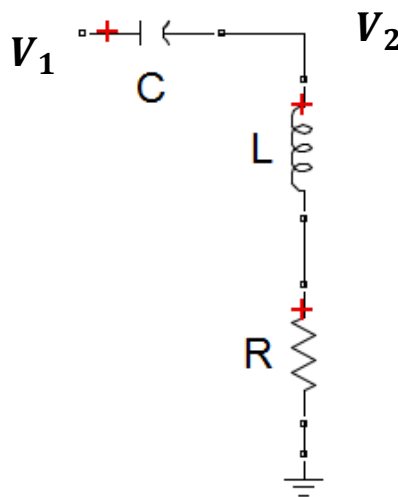


Figura 12 Circuito representativo del sistema

$$V_{1(t)} = \frac{1}{C} \int i_{(t)} + L \frac{di_{(t)}}{dt} + Ri_{(t)} \quad (2.1)$$

Posteriormente siguiendo con los dos pasos siguientes, se llega a obtener el voltaje V_1 en función de la frecuencia como se observa en la ecuación 2.2.

$$V_{1(s)} = \frac{I_{(s)}}{CS} + LSI_{(s)} + RI_{(s)} \quad \text{Paso 1}$$

$$V_{1(s)} = I_{(s)} \left[\frac{1}{CS} + LS + R \right] \quad \text{Paso 2}$$

$$V_{1(s)} = I_{(s)} \left[\frac{1 + LCS^2 + RCS}{CS} \right] \quad (2.2)$$

Ahora se continúa con el cálculo del voltaje V_2 en función del tiempo como en la ecuación 2.3.

$$V_{2(t)} = L \frac{di_{(t)}}{dt} + Ri_{(t)} \quad (2.3)$$

Después de transformar la ecuación 2.3 en función de la frecuencia se llega a la ecuación 2.4.

$$V_{2(s)} = LSI_{(s)} + RI_{(s)} \quad \text{Transformación}$$

$$V_{2(s)} = I_{(s)} [LS + R] \quad (2.4)$$

Posteriormente se realiza la función de transferencia dividiendo la salida entre la entrada, y después del paso uno se llega a la ecuación 2.5.

$$\frac{V_{2(s)}}{V_{1(s)}} = \frac{I_{(s)}[LS + R]}{I_{(s)}\left[\frac{1 + LCS^2 + RCS}{CS}\right]}$$

Paso 1

$$\frac{V_{2(s)}}{V_{1(s)}} = \frac{[LS + R]CS}{1 + LCS^2 + RCS} \quad (2.5)$$

La cual también se puede representar como se muestra en la ecuación 2.5a.

$$\frac{V_{2(s)}}{V_{1(s)}} = \frac{LCS^2 + RCS}{LCS^2 + RCS + 1} \quad (2.5a)$$

En seguida se utiliza el arreglo de Routh de la tabla 4.

Tabla 4 Arreglo de Routh

S^n	a_0	a_2	a_4	a_6	.	.	.
S^{n-1}	a_1	a_3	a_5	a_7	.	.	.
S^{n-2}	b_1	b_2	b_3	b_4	.	.	.
S^{n-3}	c_1	c_2	c_3	c_4	.	.	.
S^{n-4}	d_1	d_2	d_3	d_4	.	.	.
.	.	.					
.	.	.					
.	.	.					
S^2	e_1	e_2					
S^1	f_1						
S^0	g_1						

Para el cálculo de algunos términos se debe utilizar un subarreglo de Routh de la tabla 5:

Tabla 5 Subarreglo de Routh

$b_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1}$	$c_1 = \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1}$	$d_1 = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{c_1}$
$b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1}$	$c_2 = \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1}$	$d_2 = \frac{c_1 b_3 - b_1 c_3}{c_1}$
$b_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1}$	$c_3 = \frac{b_1 a_7 - a_1 b_4}{b_1}$	$d_3 = \frac{c_1 b_4 - b_1 c_4}{c_1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

A continuación se realiza el diagrama de bloques como se muestra en la figura 13.

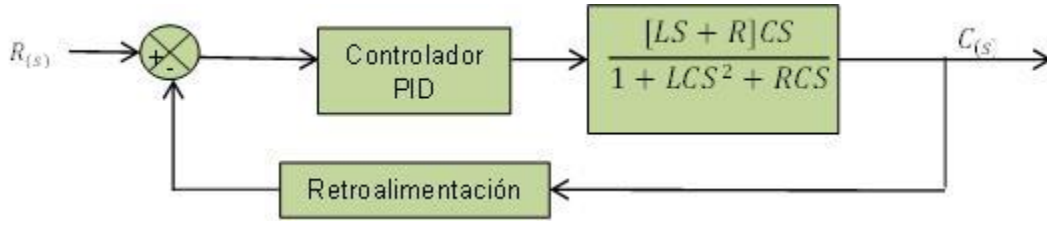


Figura 13 Diagrama a bloques del sistema

Empleando el segundo método de Ziegler-Nichols, se fija $T_i = \infty$ y $T_d = 0$ obteniéndose la función de transferencia de la ecuación 2.6.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{[LSS^2 + RCD]kp}{LCS^2 + RCS + 1 + [LCS^2 + RCS]kp} \quad (2.6)$$

Tomando el numerador y denominador se tiene lo siguiente:

$$kpLS^2 + kpRCD \quad \text{Numerador}$$

$$S^2[LC + CLkp] + S[RC + RCkp] + 1 \quad \text{Denominador}$$

Aplicando el arreglo de Routh se determinan cada uno de sus términos como se visualizan en las ecuaciones de la 2.7 a la 2.11.

$$a_0 = LC + LCkp \quad (2.7)$$

$$a_1 = RC + RCkp \quad (2.8)$$

$$a_2 = 1 \quad (2.9)$$

$$b_0 = kpLC \quad (2.10)$$

$$b_1 = kpRC \quad (2.11)$$

Con esto se llega al arreglo final de la tabla 6.

Tabla 6 Arreglo final

S^2	$LC + LCkp$	1
S	$RC + RCkp$	0
S^0	1	0

Tomando los cálculos para un capacitor de $55\mu f$ con bobina de $65mH$ y una resistencia de $R = 1.83\Omega$, (González J. M., 2010), haciendo la sustitución en S^2 .

$$LC + LCkp + 1 = 0$$

$$(65m)(55\mu) + (65m)(55\mu)kp_{cr} + 1 = 0$$

Se determina que:

$$kp_{cr} = -279721.2797$$

Ahora sustituyendo en:

$$S^2[LC + CLkp] + S[RC + RCkp] + 1 = 0$$

Solo cambiando un término queda así:

$$S^2[LC + CLkp_{cr}] + S[RC + RCCLkp_{cr}] + 1 = 0$$

$$S^2[3.575 \times 10^{-6} - 1.000003575] + S[1.0065 \times 10^{-4} - 28.15394] + 1 = 0$$

Efectuando operaciones resulta:

$$S^2 + 28.15383935S - 1 = 0$$

Realizando el cambio de $S = j\omega$ se tiene:

$$(j\omega)^2 + 28.15383935j\omega - 1 = 0$$

Ejecutando una operación:

$$-\omega^2 + 28.15383935j\omega - 1 = 0$$

Se llega a:

$$(\omega^2 + 1) - 28.15383935j\omega = 0$$

Considerando los otros términos:

$$RC + RCkp = 0$$

Cambiando a:

$$RC + RCkp_{cr} = 0$$

También se obtiene:

$$kp_{cr} = -1$$

Sustituyendo en el denominador:

$$LCS^2 + RCS + 1 + [LCS^2 + RCS] + kp$$

Se consigue:

$$\omega = 28.1538$$

Con esto se calcula el término siguiente:

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{28.1538} = 0.2231$$

Obteniéndose la tabla 7.

Tabla 7 Parámetros PID

PID		
kp	T_i	T_D
-1	0.111	0.02788

Para el cálculo del controlador sólo se sustituyen los parámetros en la ecuación 2.12.

$$G_{c(s)} = kp[1 + \frac{1}{T_i S} + T_D S]$$

CAPÍTULO III.- MODELADO DE UN COMPENSADOR VECTORIAL SERIE EN MATLAB-SIMULINK.

3.1 Descripción general del circuito

En la figura 14 se presenta el diagrama general del circuito en Simulink de Matlab; el cual está conformado por varias etapas y algunos subcircuitos, que posteriormente se describirán en forma detallada. Contiene dos fuentes de voltaje trifásicas; la primera de 138kv y la segunda del mismo valor, ambas con una frecuencia de 60Hz con un desfase de 120 grados entre cada una de las fases, cargas idénticas en cada una de sus fases y entrelazadas. El circuito equivalente se puede representar como una línea de transmisión estable y balanceada, conformado por una resistencia y una inductancia en serie.

Posteriormente se acopla el voltaje por medio de un transformador a la etapa de electrónica de potencia; además se agrega un subsistema de control diseñado para realizar pruebas con dos tipos de controladores PID y el difuso.

Uno de los subcircuitos contiene un comparador de voltaje para mandar un pulso de salida dependiente de la señal que proviene del control de Matlab; ya sea PID o difuso, el resultado de la comparación de este subcircuito determina el instante de la conmutación de los IGBT's que se encuentran en la siguiente etapa. La salida de la siguiente etapa que es la de potencia, hace el enlace para la compensación serie del capacitor con la línea de transmisión, para lograr el control de la potencia activa.

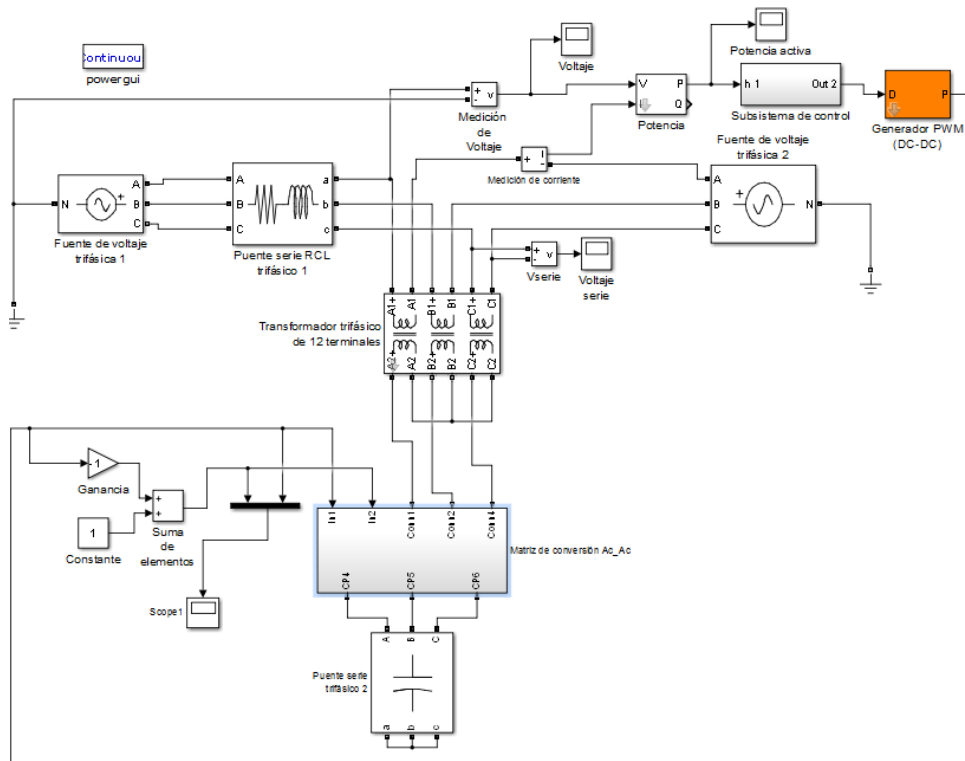


Figura 14 Diagrama general

3.2 Interruptores bidireccionales

Los nuevos circuitos que se están utilizando en los circuitos de control para aplicaciones en la electrónica de potencia son los IGBT's (sus siglas en inglés Insulated Gate Bipolar Transistor) que tiene una alta capacidad de flujo de corriente y muy baja caída de tensión estando en conducción; además facilita el control de encendido y pagado con una poco cantidad de voltaje. (Pérez, 2008). Aunque presenta la principal desventaja es que su operación depende de la temperatura y arrastra una pequeña cantidad de corriente durante el apagado; esto último puede provocar en la práctica un corto y dañar el dispositivo al emplearlo como interruptor bidireccional, no obstante se puede evitar esta situación con una estrategia adecuada para el manejo de los tiempos de encendido y apagado.

Las cuatro principales configuraciones de IGBT's son: Puente de diodos, paralelo, emisor común y colector común; de las cuales se seleccionó para trabajar la de *emisor común* que se muestra en la siguiente figura 15.

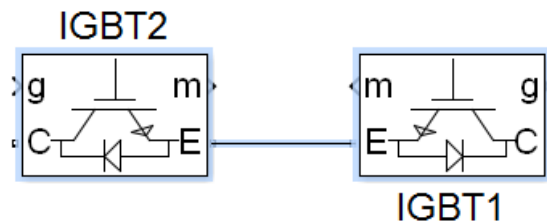


Figura 15 IGBT's en emisor común

Como está configuración tiene la capacidad de bloquear voltajes negativos por medio del diodo, esto permite controlar la dirección de la corriente en forma independiente de acuerdo a como convenga en las aplicaciones que se use. Para el caso particular del SVeC; se requiere controlar en diferentes instantes de tiempo, tanto el simiciclo positivo como el negativo del voltaje de la línea de transmisión con la finalidad de introducir en periodos muy cortos de tiempo el condensador. Además este tipo de arreglo es recomendado para *potencias mayores a 15kw*, por su buen desempeño en potencias elevadas y además las señales empleadas para control no requieren de aislamiento. (Pérez, 2008).

Otro tipo de arreglo muy similar al de emisor común es el *colector común*, las pérdidas en conducción son prácticamente las mismas; sin embargo el colector común es empleado en potencias *menores a 15Kw*, que para el caso particular del SVeC sería bastante útil para la construcción de un prototipo a escala. Esta configuración se muestra en la figura 16.

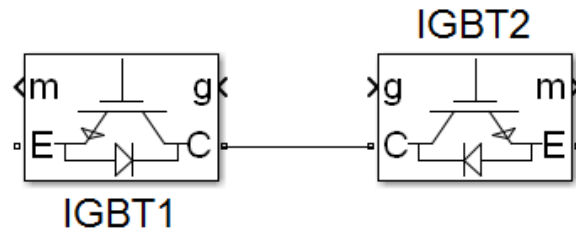


Figura 16 IGBT's en colector común

La finalidad primordial de un Compensador Vectorial Serie es controlar el flujo de potencia activa en cada una de las cargas de las líneas trifásicas desde las fuentes de a. c. (González, 2006). Esto se logra agregando capacitores en paralelo o inductores en serie, según sea el caso o la aplicación en particular. Para este proceso se incorporó solamente condensadores en paralelo para lograr la compensación, por ser la situación más común en la práctica de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) y las pruebas se efectuaron en un circuito balanceado.

Fue necesaria la realización de un interruptor bidireccional en Simulink para comprobar su funcionamiento y buen desempeño; puesto que es necesaria la incorporación correcta de la compensación al entregar energía a la carga con buena calidad; sin afectarse por la frecuencia del interruptor bidireccional, se manejó una frecuencia de 2000khz.

Un prototipo desarrollado en la universidad de Wisconsin se probó con frecuencias de conmutación menores a 5Khz y se demostró que no había resonancia con valores de frecuencia menores a este valor (Mancilla F. , 2007). En el interruptor que se diseñó para utilizarse en el SVeC y se realizaron pruebas con diferentes valores de frecuencia para asegurarse el buen desempeño del interruptor. En la figura 17 se muestra el circuito un interruptor bidireccional y en la figura 18 la curva de respuesta en la conmutación para un disparo del cincuenta por ciento del valor de compensación.

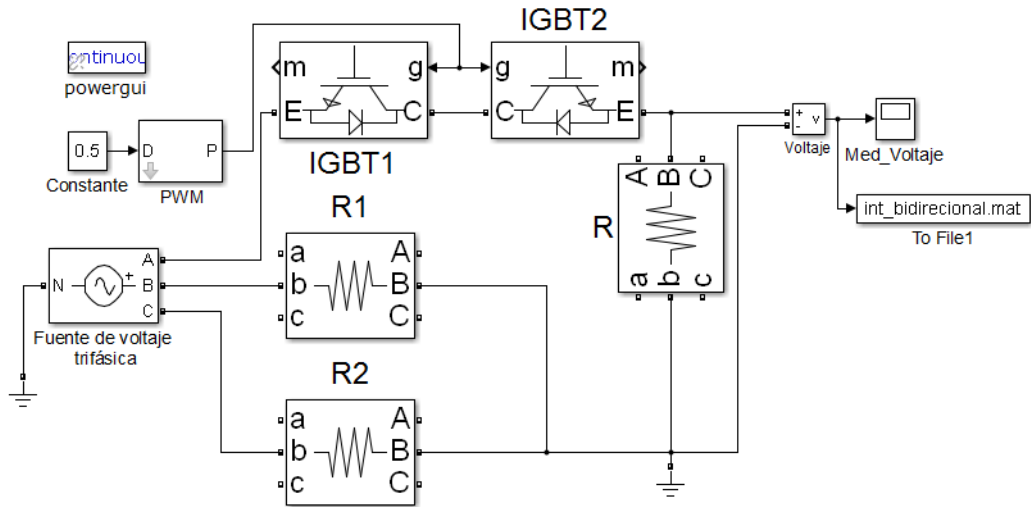


Figura 17 Interruptor bidireccional en colector común

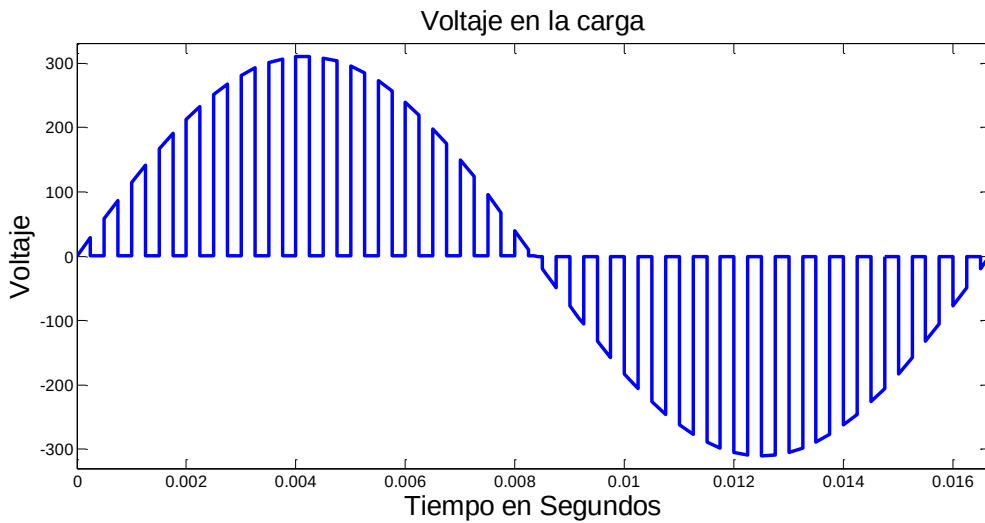


Figura 18 Respuesta del interruptor bidireccional en colector común

Cuando se realiza la modulación por ancho de pulso en forma discreta la base para el control y la realización de la conmutación en forma automática es un comparador de voltaje simple; el cual forma parte del elemento final de control para el manejo de la variable manipulada (ancho del pulso) para llevar a la variable controlada (potencia activa) al punto de ajuste valor deseado.

Un comparador de voltaje con amplificadores operacionales; es un circuito que comúnmente se usa para tomar una decisión y su estructura consiste en un amplificador operacional en lazo abierto (sin retroalimentación entre su entrada y salida), que por lo general suele usarse para comparar una tensión fija con una variable. En la figura 19 se muestra el comparador utilizado en forma discreta para lograr la modulación.

3.3 Comparador de voltaje

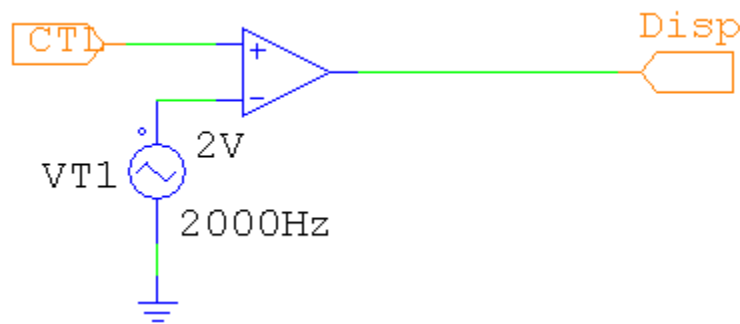


Figura 19 Comparador de voltaje

La señal CTL entra a la terminal no inversora del amplificador operacional, esta señal debe cambiar entre un nivel de voltaje de 0 y 1V; además es comparada con la señal de la fuente de onda triangular con un nivel de voltaje de pico de 1V, la lógica de operación se muestra en la tabla 8. El voltaje de saturación es equivalente al voltaje de alimentación del amplificador operacional, en la práctica puede disminuir hasta en un diez por ciento.

Tabla 8 Lógica de operación

Comparación	Voltaje de salida
Sí, $CTL > VT1$	Saturación positiva
Sí, $CTL < VT1$	Saturación Negativa

El porcentaje de conmutación del voltaje de control que está determinado por la señal CTL contra la comparación de la señal triangular de la fuente de voltaje CTL, puede variar de desde cero hasta noventa por ciento el nivel alto o bajo del voltaje de salida, con el objetivo de mantener de igual forma en corte o en conducción los IGBT's. En las figuras 20, 21 y 22 se visualizan estos porcentajes del voltaje de salida; además de un ciclo simétrico de igual porcentaje en alto y en bajo.



Figura 20 Voltaje de salida con el 90% en alto



Figura 21 Voltaje de salida con el 10% en alto



Figura 22 Voltaje de salida con el 50%

En la figura 23 muestra claramente los puntos exactos donde se realiza la conmutación debido a la comparación de los voltajes de la señal CTL proveniente, que está conectada a la entrada no inversora del amplificador operacional y de la fuente triangular en la entrada inversora del comparador de voltaje. Para este caso se tomó con la conmutación del cincuenta por ciento.

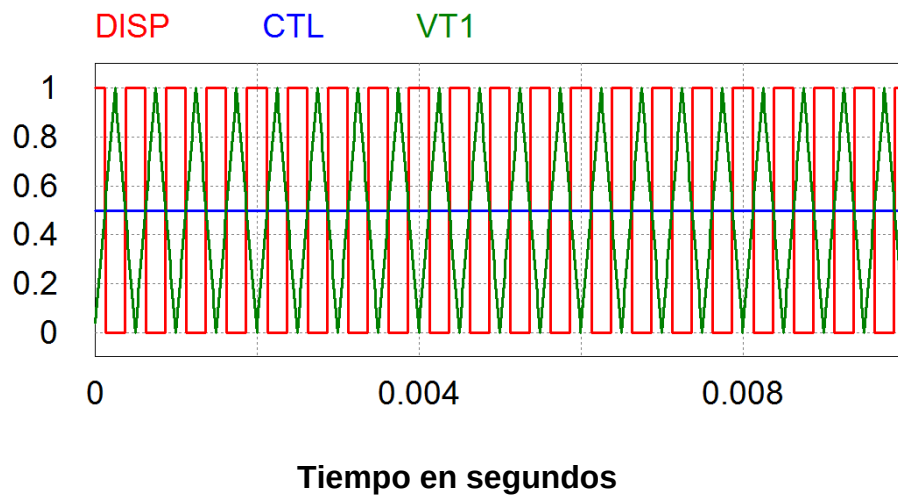


Figura 23 Comparación para la conmutación de voltajes

3.4 Circuito de conmutación con IGBT's

Después de tener las señales de salida del Generador PWM son introducidas a las compuertas del **IGBT1** hasta el **IGBT6** a través de los puntos con los nombres **In1** y **In2** como se muestra en la figura 24.

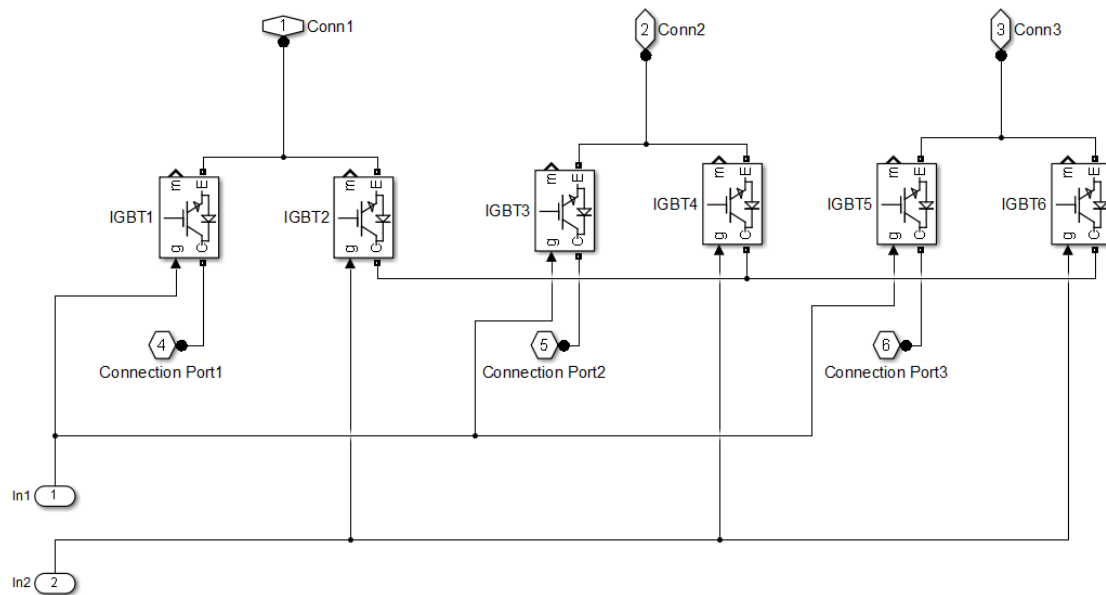


Figura 24 Conmutación con IGBT's.

Aunque la señal de disparo sea la apropiada para la corriente control, los IGBT's tienen la función principal de realizar el enlace entre la etapa de control y la de potencia para poder introducir la compensación dinámica a la línea de transmisión. Esta compensación se realiza introduciendo en diferentes instantes de tiempo un capacitor a la línea de transmisión.

Una de las precauciones principales que se debe tener al manejar este tipo de circuitos de potencias es cuidar la situación de corto circuito; en este circuito se realiza la compensación cuando se conmutan elementos **IGBT1**, **IGBT3** e **IGBT5** a los que se les aplica directamente la señal de **In1**.

La otra parte del circuito que está conformada por los **IGBT2**, **IGBT4** e **IGBT6**, se les conecta la señal de **In2**, solamente a través de un arreglo para generar la inversión de la señal voltaje para evitar el escenario del corto circuito. En palabras

más simples mientras los **IGBT1**, **IGBT3** e **IGBT5** están en conducción, los **IGBT2**, **IGBT4** e **IGBT6** se encuentran en corto y viceversa logrando la correcta compensación a la línea de transmisión.

En las figuras de la 25 a la 30 se muestran los pulsos a la entrada de las compuertas de cada uno de los IGBT's. Para ello fue necesario agregar instrumentos para archivar los datos para cada punto de ajuste de variable controlada como se puede ver en la figura 31.

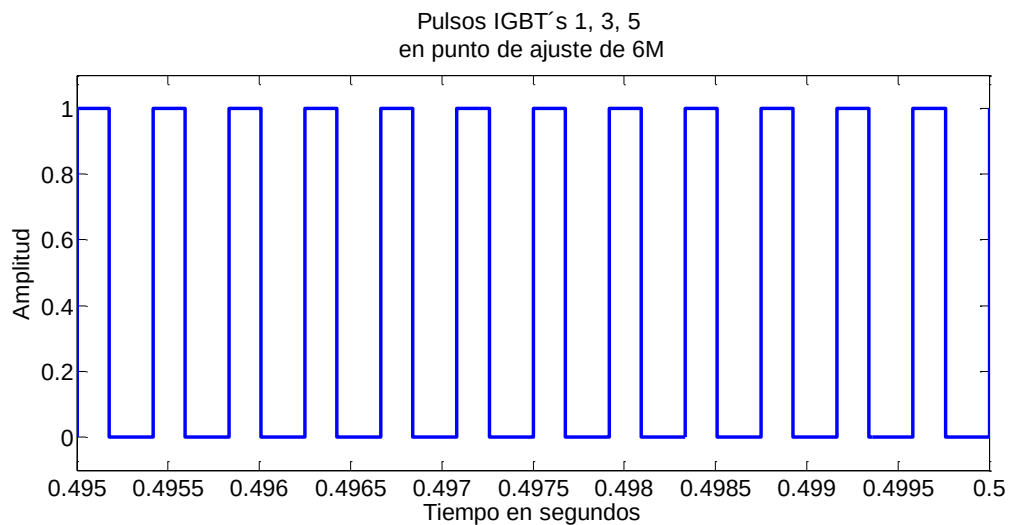


Figura 25 Pulsos en IGBT's 1, 3 y 5 con 6M

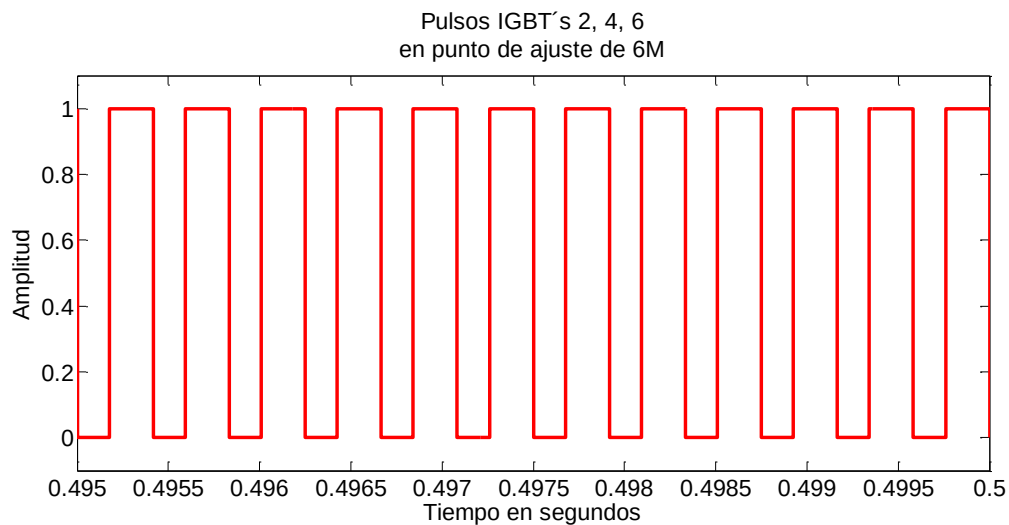


Figura 26 Pulsos en IGBT's 2, 4 y 6 con 6M

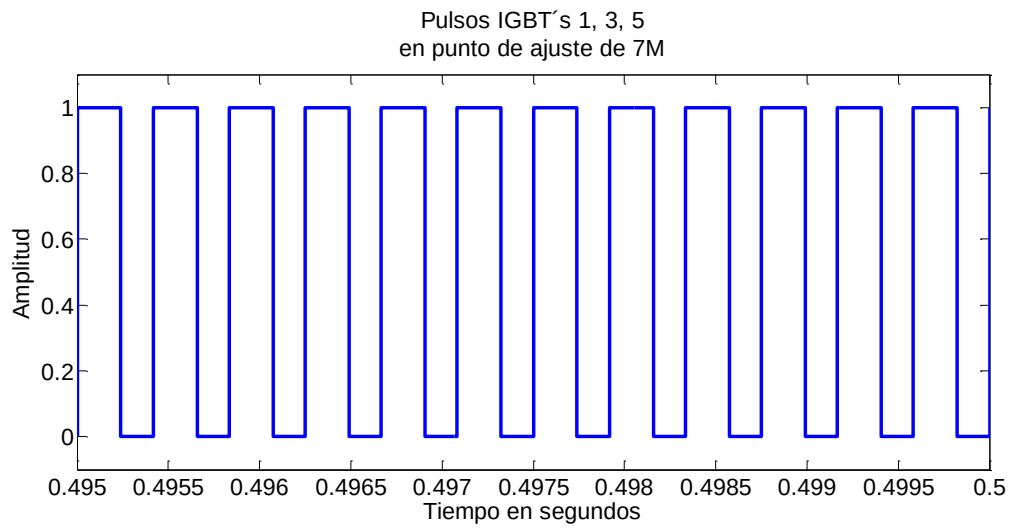


Figura 27 Pulsos en IGBT's 1, 3 y 5 con 7M

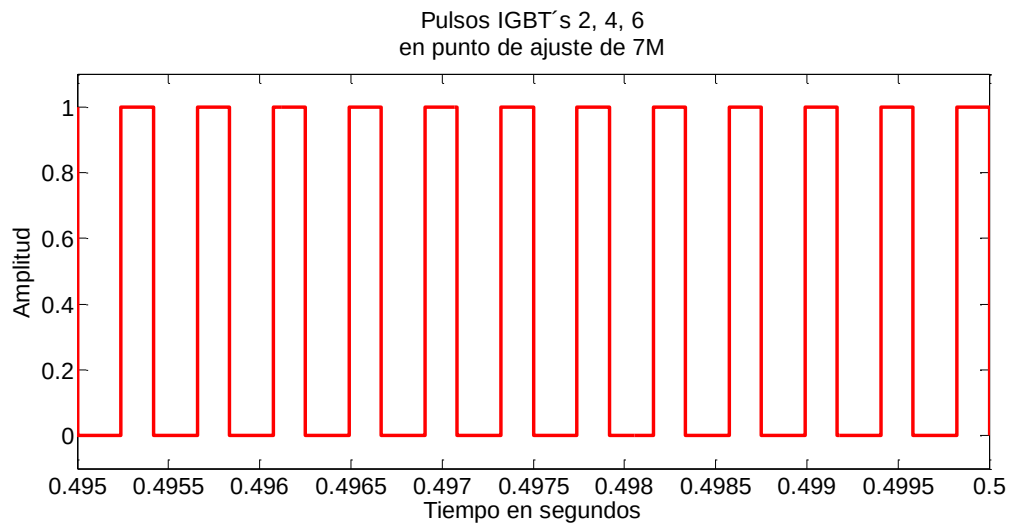


Figura 28 Pulsos en IGBT's 2, 4 y 6 con 7M

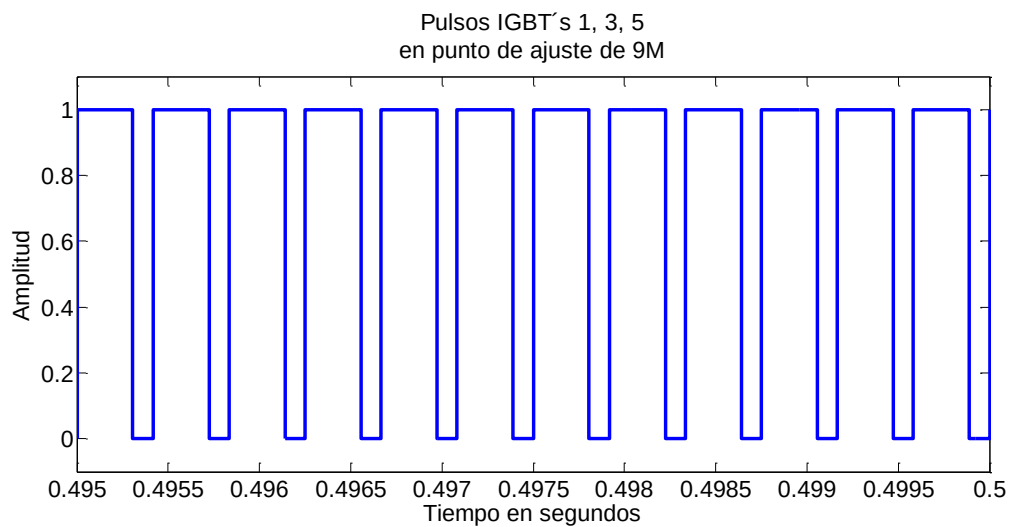


Figura 29 Pulsos en IGBT's 1, 3 y 5 con 9M

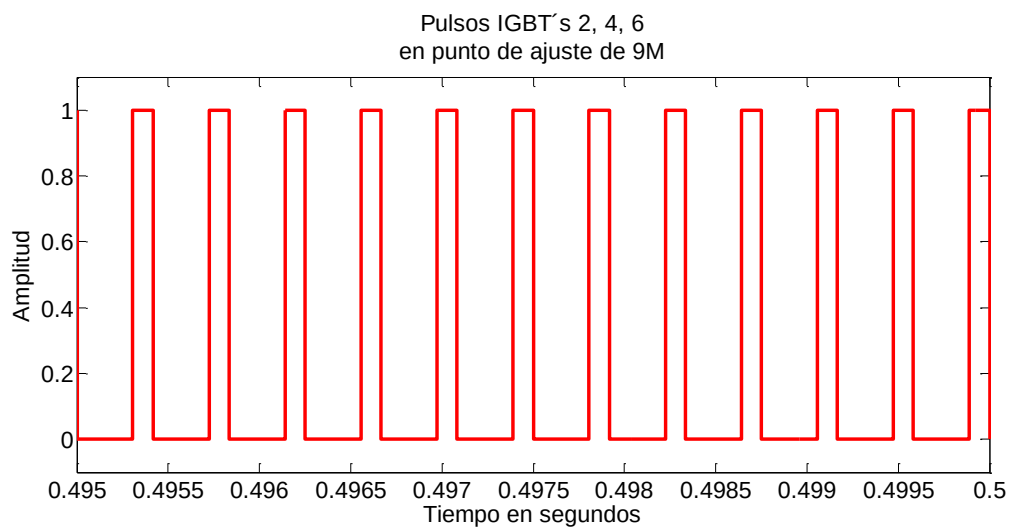


Figura 30 Pulsos en IGBT's 2, 4 y 6 con 9M

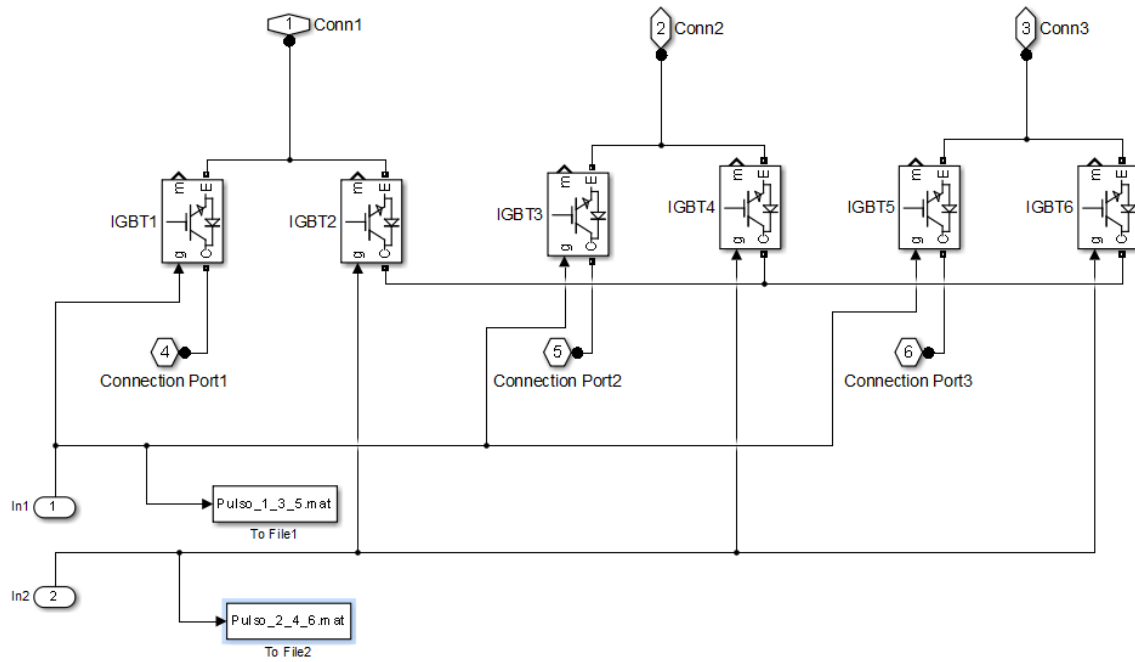


Figura 31 Conmutación con IGBT's con medidores de voltaje

El compensador SVec entrega una reactancia capacitiva dinámica con respecto del tiempo denominada como X_{SVec} , la que se ajusta en forma automática por medio de la variación del ciclo de trabajo D , en otras palabras se logra la regulación de la potencia activa a través del cambio dinámico de la reactancia. Esto se puede visualizar en forma matemática en las ecuaciones de la 3.1 a la 3.3.

$$t_{XCSVec} = (1 - D) \frac{1}{f_{triangular}} \quad (3.1)$$

$$X_{SVec} = \frac{t_{XCSVec}}{2\pi C} \quad (3.2)$$

$$V = X_{SVec} I \quad (3.3)$$

Esto significa que la cantidad de impedancia que se introduce en serie depende directamente del ciclo de trabajo D , que se determina directamente por el control que se implemente para su determinación.

Asimismo, a medida que disminuye el ciclo de trabajo aumenta la compensación y se tiene el valor máximo cuando este es igual a cero; cuando va aumentando el valor de D hasta alcanzar la cantidad de “1” la compensación se hace nula.

La frecuencia que se utilizó en la onda triangular es de 2400Hz, esto es aproximadamente 40 veces mayor que la frecuencia del sistema, lográndose un perfecto control en la comparación de las señales. Los voltajes de los IGBT's se observan en la figura 32 que corresponden a los voltajes de los IGBT's 1, 3 y 5.

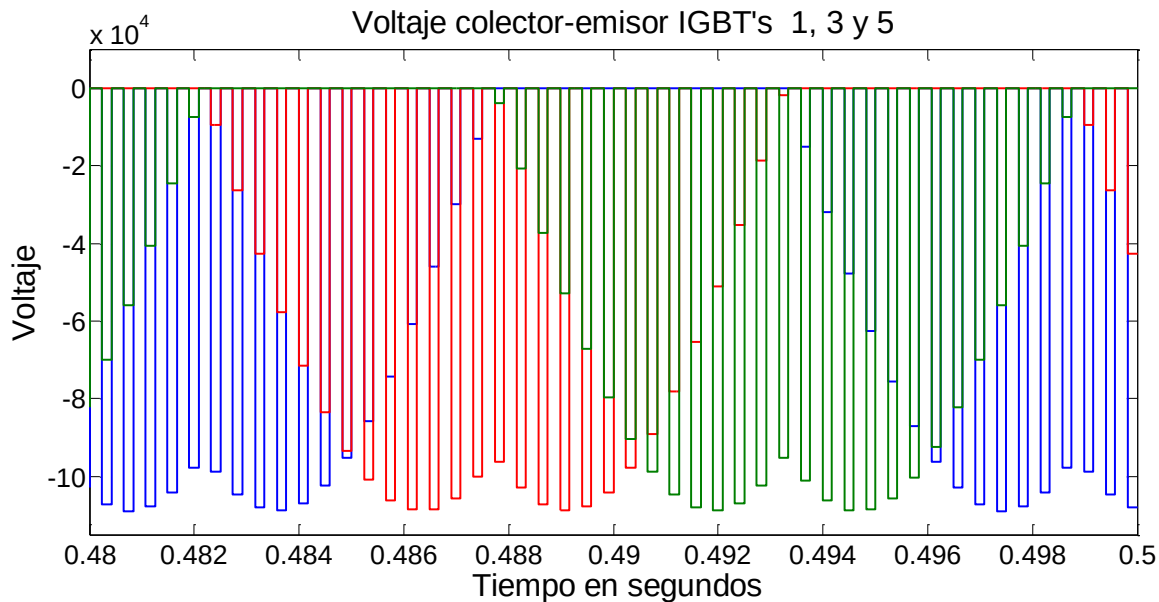


Figura 32 Voltaje en los IGBT's sin inversor

En la figura 33 se muestra el voltaje serie inyectado a una línea de transmisión, donde se visualiza que está en base al ancho de pulso proporcionado por un controlador y además está en función de otros dos factores el valor del capacitor y la relación de transformación del capacitor.

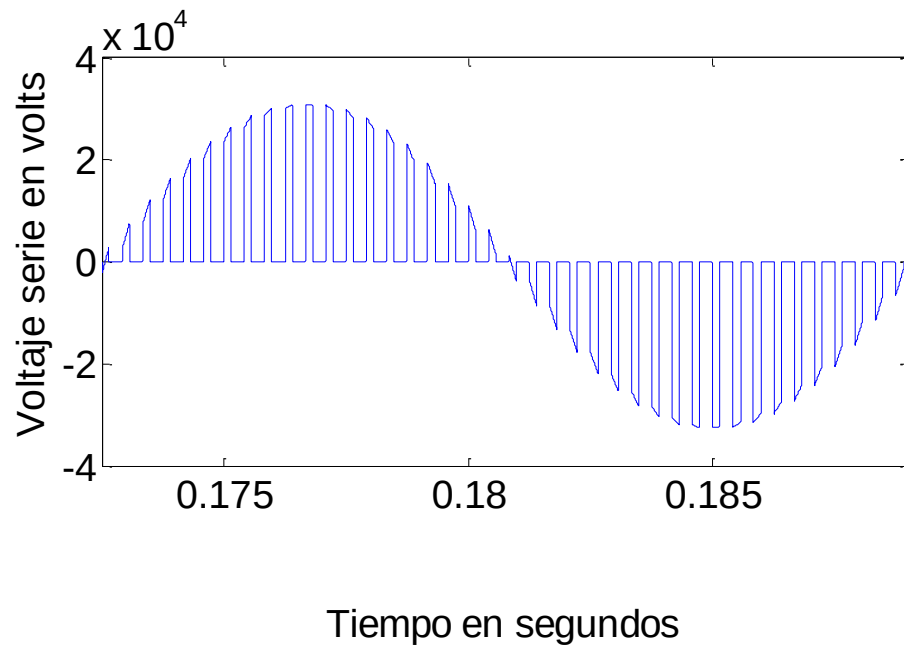


Figura 33 Voltaje serie inyectado en la línea de transmisión de una fase.

CAPÍTULO IV.- MODELADO DE CONTROLADORES PID Y DIFUSO PARA UN S_{Ve}C EN SIMULINK- MATLAB.

4.1 Descripción general del diagrama en Simulink-Matlab con controlador PID.

Uno de los controladores que tiene múltiples aplicaciones desde hace varias décadas en la industria es el PID, en la actualidad se sigue utilizando en los procesos de la generación de energía para el control de las variables de presión, nivel, temperatura, flujo, nivel, velocidad, aceleración entre otras. En los procesos de la industria refresquera, química, cementera, metalúrgica por mencionar algunos, que aún siguen tomando como base este tipo de controladores para lograr sus objetivos de calidad en la producción.

Como este tipo de controlador ha tenido mucho éxito en todo este tipo de aplicaciones, es importante partir del mismo para mejorar o tener una referencia al diseñar nuevos algoritmos de control para los mismos fines y aplicaciones. Por tal motivo en este trabajo se partió de un controlador tipo PID para el control de la potencia activa como se muestra en la figura 34.

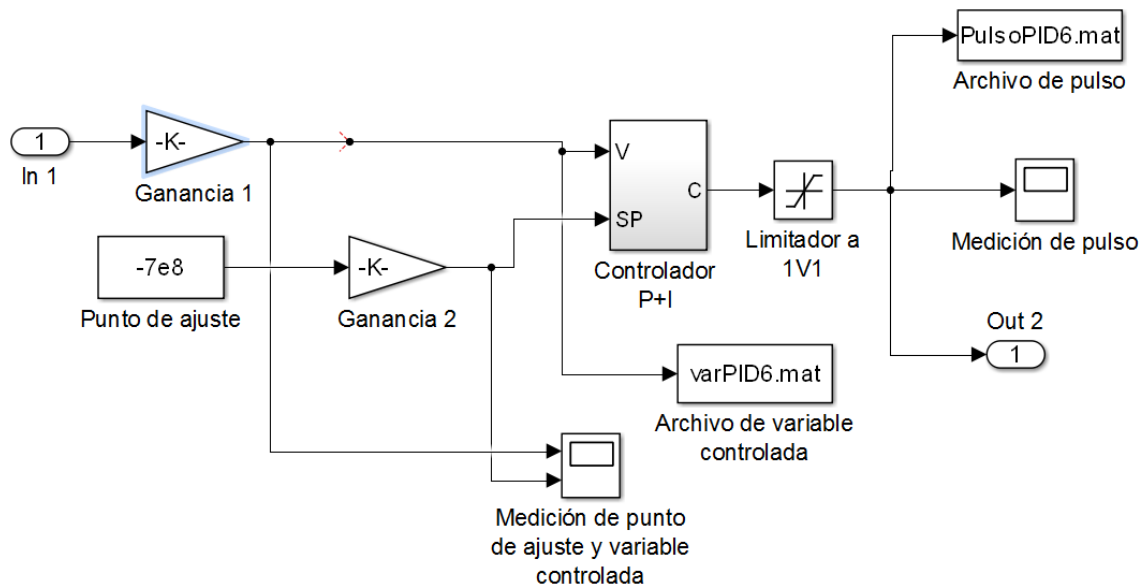


Figura 34 Controlador PI en Simulink-Matlab

La figura 34 ejemplifica en primer la entrada de la variable controlada del proceso **In 1**, que para este caso es la potencia activa, a continuación se encuentra el módulo de **Ganancia 1** con el objetivo de reducir la señal de la variable controlada a nivel de control; puesto que todos los dispositivos electrónicos, aunque sean industriales no son para muy altos niveles de voltaje y de corriente. Después está el bloque de **Punto de ajuste** para ajustar o colocar el valor, al cual se requiere controlar la variable controlada. Seguidamente se ubica el dispositivo de **Ganancia 2**, que tiene su función es la misma que el de **Ganancia 1**.

También contiene el **Limitador a 1V1**, para proteger al elemento final de control (EFC) en el momento que la señal de corrección llegue a sobrepasar los rangos máximos de trabajo de este, que viene siendo el pulso de control que llega a las compuertas de los IGBT. Además se integra con instrumentos de medición para los diferentes puntos de interés, considerados importantes para la calidad del proceso.

Aunque el módulo más importante de este diagrama es el **Controlador P+I**, que se describirá el siguiente tema. Finalmente la parte de **Out 2**, que envía la señal de corrección generada por el controlador **PI**.

4.2 Diagrama interno del módulo Controlador P+I.

Este diagrama se visualiza claramente en la figura 35.

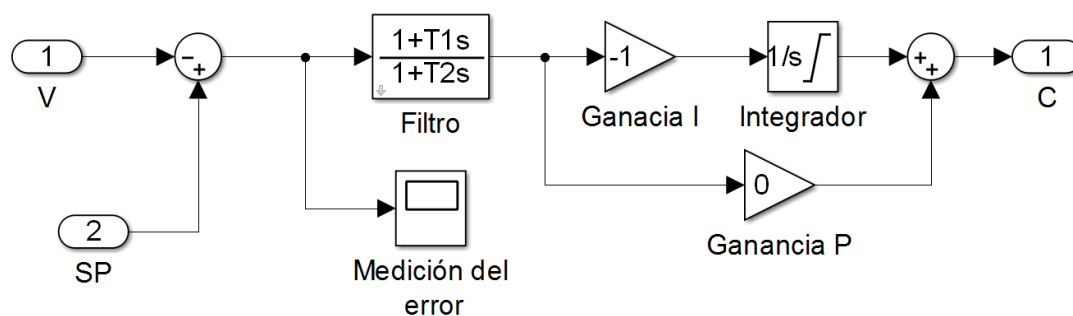


Figura 35 Controlador P+I

El diagrama de la figura 35 recibe en el punto de suma la variable **V** (variable controlada) la señal del punto de ajuste **SP**, de la diferencia de ambas se genera la señal de error.

En todos los procesos industriales de todo tipo, por diversas causas se va induciendo ruido por perturbación, desgaste de componentes mecánicos o eléctricos, vibraciones, entre otras causas y este fenómeno no es deseable; ya que perjudica a la estabilidad de las variables como la controlada, la medida, la anticipatoria entre otras. Es fenómeno es conveniente reducirlo; aunque no se elimina por completo con alguna o varias etapas de filtrado, para este control se utiliza un filtro como se visualiza en el conjunto con el nombre **Filtro**.

Una vez que se tiene la señal limpia de ruido, se transmite a los dos elementos de **Ganancia I** y **Ganancia P**, cada uno de ellos determinan la ganancia de los controladores integrales y proporcionales respectivamente; incorporándose al punto de suma para generar la señal de corrección después de aplicarse los algoritmos de control correspondientes. La cual se entrega por medio de la salida **C**.

4.3 Estado del arte de controladores difusos

Uno de los propósitos en la industria metalúrgica, cementera, refresquera, automotriz, eléctrica, entre otras; es la optimización de los controladores dentro de todos sus procesos para el aumento en la calidad de sus productos y con ello lograr la reducción de los costos de producción con la finalidad de obtener mejores ganancias. En la industria desde hace varias décadas era muy común encontrar diversos tipos de controladores PID; en su inicio fueron mecánicos y neumáticos, posteriormente con la evolución de los semiconductores principalmente con la generación de los amplificadores operacionales fueron migrando a los controladores electrónicos discretos y por último a los embebidos en los controladores lógicos programables (PLC) y en los circuitos electrónicos programables (PIC's).

Desde la década de los sesenta **Lotfi Asker Zadeh** introdujo al control la lógica difusa. Las primeras aplicaciones para el control industrial se realizaron en una fábrica de cemento en esta misma década. En 1974 Mamdani encuentra una forma de aplicar la lógica difusa al control de un motor de vapor basado en reglas difusas. Posteriormente en 1984, Sugeno realiza un proyecto para estacionar un automóvil en el cual, el control difuso tiene como consecuente fundamentado en ecuaciones diferenciales de primer orden (Ponce, 2010). Pero una de las aplicaciones que impactó más fue en el control del tráfico de trenes en Japón. (Villalvazo, 2003).

Cuando los matemáticos necesitan de algoritmos que establezcan como un sistema debe funcionar a determinadas entradas, la lógica difusa puede controlar o detallar el sistema usando reglas de sentido común o de la forma de actuar del ser humano que se refieren a cantidades indefinidas. Los sistemas difusos frecuentemente tienen reglas tomadas de expertos, pero cuando no hay expertos los sistemas difusos aprenden observando cómo la gente manipula los sistemas reales (Ponce, 2010).

Hoy en día hay múltiples aplicaciones para el ámbito principalmente doméstico como el control de los ciclos de las lavadoras automáticas, en el control de temperatura de los aires acondicionados, para el control de mecanismos en los reproductores de DVD's, en los auxiliares del control de manejo en curvas, entre otras aplicaciones.

La compensación serie de las líneas de transmisión conectadas en los turbo generadores pueden provocar la resonancia sub-síncrona (SSR) que conducen a oscilaciones torsionales adversas. El uso de los FACTS incrementan el mejoramiento de la capacidad de transferencia de potencia, el soporte de voltaje y el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia en la red.

(Ajammi, Naser y Mostaga, 2009) diseñaron un controlador difuso híbrido/LQR (regulador cuadrático lineal), el cual es un método de control para un STATCOM de tres niveles que se aplica para el amortiguamiento de las oscilaciones causadas por la SSR. En este trabajo se resalta la importancia de la utilización de este control, ya que logra amortiguar significativamente las oscilaciones torsionales causadas por la SSR, este control fue probado en un sistema máquina bus infinito con dos líneas de transmisión.

En otro trabajo (Lium y Wang, 2009) describe la interconexión de los sistemas de potencia en China. La carencia de un método efectivo de control para la potencia reactiva y la debilidad de algunas redes de potencia, es una amenaza seria de seguridad. Por esto, la necesidad urgente de nuevos tipos de tecnologías que proporcionen alta capacidad y estabilidad a la red de potencia.

Por lo anterior los autores propusieron un nuevo método para la coordinación de varios FACTS conectados al mismo tiempo a la red, esta coordinación se realiza con un control difuso en conjunto con un algoritmo co-evolutivo, que tenía como objetivo controlar los FACTS. En este mismo artículo se realiza una comparación de esta estrategia contra la estrategia de control con algoritmos genéticos, este algoritmo **reduce el tiempo computacional** y tiene mejores propiedades de convergencia. Dos controladores FACTS el SSSC y el STATCOM se utilizaron para probar esta estrategia de control. El algoritmo mantiene buen rendimiento en el amortiguamiento de las oscilaciones con diferentes tipos de condiciones de disturbio aportando estabilidad transitoria al sistema.

En el mismo año otros investigadores (Khatami, Nasser y Razavi, 2009) desarrollaron un artículo sobre las oscilaciones de baja frecuencia (LFO) que se producen en un sistema de potencia que no tiene un torque de amortiguamiento para superar los disturbios ocasionados por cambios en la potencia mecánica. Tradicionalmente, los estabilizadores de sistemas de potencia (PPS) iniciaron para la disminución de esas oscilaciones. Los TCSC también conocidos como dispositivos FACTS pueden controlar el flujo de potencia en las líneas de

transmisión. Estos pueden también reemplazar a los PPS para amortiguar efectivamente las oscilaciones en baja frecuencia para la cancelación de una porción de la reactancia en la impedancia de la línea y de este modo incrementar la capacidad de transmisión de potencia, (Khatami, Nasser y Razavi, 2009) desarrollaron un modelo linealizado Heffron-Philips de una máquina con bus infinito con un TCSC. El diseño de un controlador basado en lógica difusa para el TCSC controla apropiadamente dando un eficiente amortiguamiento. Los resultados de la simulación mostraron que el grupo TCSC con controlador difuso es más efectivo para el amortiguamiento que el compensador de adelanto-atraso TCSC.

El SSSC es un FACTS que puede ser controlado por tiristores, el control también tiene la capacidad ajustarse con rapidez y una alta frecuencia de operación. A través de la compensación de impedancia, es capaz de controlar la magnitud y dirección del flujo de potencia en el sistema de transmisión. Para lograr una respuesta rápida para el control de la estabilidad en el sistema de potencia, (Kai-Hung, Whei-Min, Chih-Ming, Wen-Cha y Yuan-Hui, 2009) proponen un controlador inteligente, el cual consiste en una red neurodifusa (FNN) y un algoritmo genético para el SSSC para conseguir mejores características para el control de la potencia real en las operaciones dinámicas del sistema de potencia. Los resultados de la simulación del controlador propuesto fueron comparados con el controlador convencional PI demostrando la superioridad y efectividad del controlador inteligente.

Algunas aplicaciones de lógica difusa se han implementado en energías alternativas como las plantas eólicas para proporcionar la calidad de potencia requerida para asegurar la estabilidad y confiabilidad del sistema de potencia. Mientras se conecta un generador eólico a la red es importante comprender que es una fuente de perturbación que afecta la calidad del sistema eléctrico de potencia. En general el voltaje y la frecuencia deben mantenerse lo más estables posibles. Esta estabilidad puede lograrse utilizando dispositivos FACTS para asegurar continuidad en la carga y amortiguamiento de las oscilaciones en el

sistema de potencia. Algunos de esos dispositivos son también usados para asegurar la estabilidad dinámica y transitoria de los sistemas de generación eólica (WPGS).

(Thakare, Dalvi y Joshi, 2009) propusieron un STATCOM basado sobre una fuente convertidora de voltaje (VSC) controlada por modulación por ancho de pulso, utilizando esta estrategia como técnica para estabilizar la conexión en la red del sistema de generación eólica. Un controlador difuso es usado como una metodología de control del STATCOM, mejorando la respuesta que el controlador convencional PI puede otorgar.

(Sinha, Patel y Prasad, 2011) Plantearon la aplicación de un dispositivo FACTS para el control automático de generación (AGC) para mejorar el rendimiento del amortiguamiento en las oscilaciones de la respuesta transitoria del sistema de potencia ante situaciones irregulares. Las oscilaciones en frecuencia, lazo de potencia, potencia de generación, etc. se compararon con un controlador convencional tipo integral y un control difuso en dispositivo FACTS. Las respuestas mejoraron usando un controlador difuso en lugar del integral, con los dispositivos FACTS SSSC y el TCPS (intercambiador de fase controlado por tiristores) conectados al sistema.

La oscilación en baja frecuencia, está en un rango de 0.2 a 3Hz, este es un fenómeno que también se presenta en la interconexión de sistemas de potencia. La solución inmediata a este problema es la instalación de sistema estabilizador de potencia o algún regulador automático de voltaje. Pero a causa de la simplicidad, linealidad y control local no son muy efectivos en sistemas de multivariable y de alta no linealidad.

(Rabiah y Laiq , 2012) Realizaron una comparación entre un control para esas oscilaciones por medio de un SSSC basado en electrónica de potencia de la familia de los FACTS. Controla el flujo de potencia sobre una sola línea y puede ser usado para el amortiguamiento de la oscilación empleando un control complementario basado en **controlador PID, pero este control es de naturaleza**

lineal y no provee un buen control sobre un rango amplio de operación. Por esta razón buscaron un sistema que incluyera técnicas matemáticas de control no lineal y que se adaptara a los cambios del sistema de manera instantánea. **Finalmente consiguieron un sistema de control óptimo** para sistemas locales y de inter-área para el control de las oscilaciones de frecuencia baja **basado en un Neuro-difuso** como complemento para el control en el amortiguamiento de oscilaciones, usaron una técnica de gradiente descendente para la optimización de los parámetros, **la velocidad y la simplicidad computacional; además el costo sería complejo al usarlo para el control de otros parámetros, aunque para esta aplicación se logró que fuera económico.**

Siguiendo en el estudio de otros científicos (Chun-Feng, Chia-Hung y Chia-Feng, 2013) Propusieron un control difuso avanzado creado para conducir los retardos de la corriente eléctrica de los FACTS en un sistema de potencia multimáquina. En este estudio se utilizaron el TCSC y SVC, **ambos se proveyeron con un controlador difuso** para transportar los retardos de la corriente eléctrica **para mejorar la estabilidad dinámica de los sistemas de potencia.** El controlador difuso (FC) determina la velocidad del rotor del generador eléctrico, acorde a los retardos en la conducción de la corriente eléctrica. Plantearon un algoritmo de optimización para todos los parámetros en el control difuso, disminuyendo el tiempo en la selección de los parámetros. La efectividad y eficiencia del novedoso control fue verificado en un sistema eléctrico de potencia multimáquina y comparado con otros controladores basados en varios algoritmos de optimización conocidos. **El diseño de este controlador mejora el rendimiento del control comparado con otros, cuando se realizaron pruebas en diferentes condiciones como: Incrementos diferentes en la amplitud, con perturbaciones tipo Random en los generadores, fallas en las líneas de transmisión entre dos buses.**

4.4 Descripción general del diagrama en Simulink-Matlab con un controlador difuso.

En base a todo lo anterior que demuestra que el control difuso ha sido efectivo desde hace más de cincuenta años para solucionar algunos problemas de control, se determinó utilizar este al diseño del control del diagrama de la figura 36 que prácticamente es el mismo que el de la figura 34, excepto el módulo **Controlador difuso** que se visualiza su diagrama interno en la figura 37.

Se inició con el diseño de un controlador difuso simple basado solamente en reglas y conjuntos difusos; además de la experiencia del operador, debido a su simplicidad; así como sus múltiples ventajas, principalmente el tiempo computacional y su respuesta efectiva en sistemas de naturaleza no lineal. Esto con la finalidad de aplicar este diseño a un prototipo a escala con parámetros reales (no ideales), en un corto plazo.

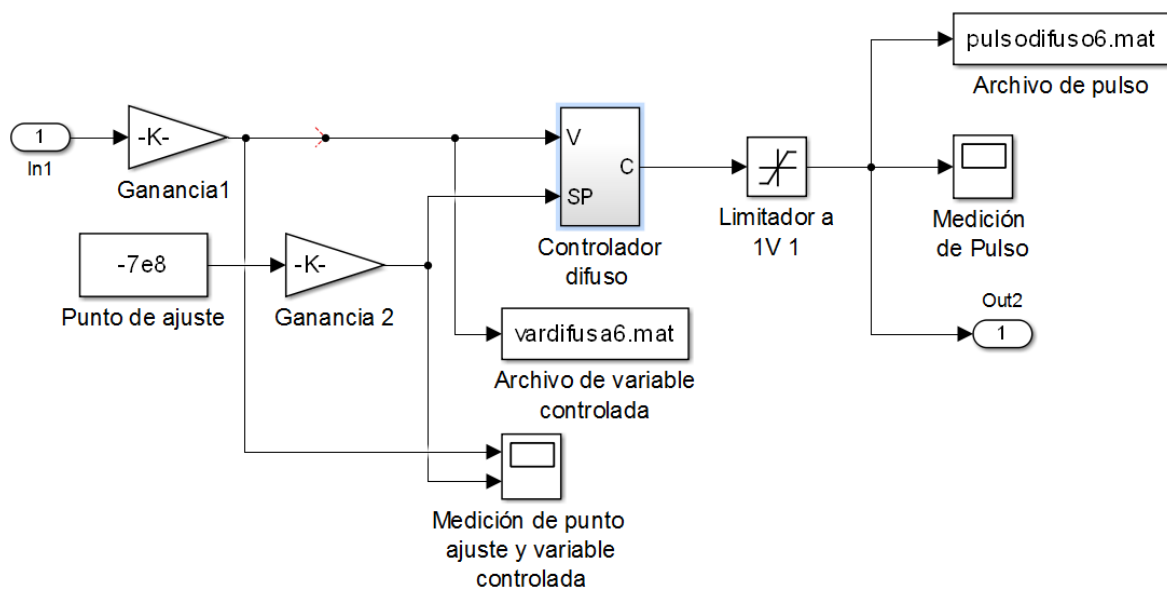


Figura 36 Controlador difuso en Simulink-Matlab

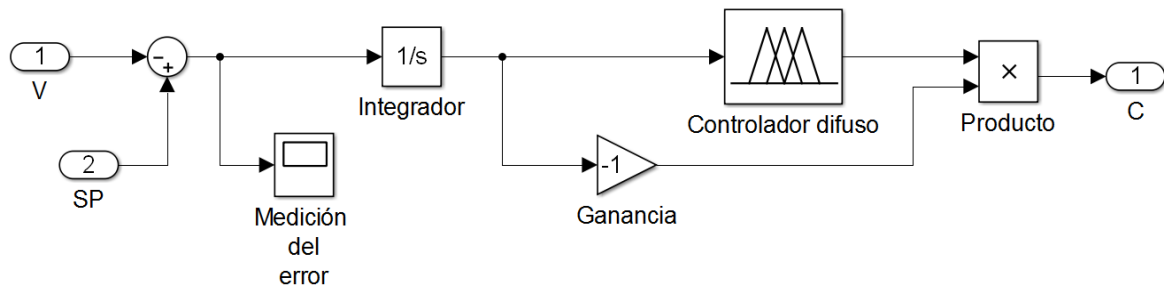


Figura 37 Controlador difuso

4.5 Funciones de membresía en Matlab.

En primer lugar en el **Command Window** de **Matlab** se teclea **fuzzy** y aparece la ventana de la figura 38 Posteriormente se realiza la selección de nuevo, conjuntamente con el tipo de controlador como se indica en la figura 39.

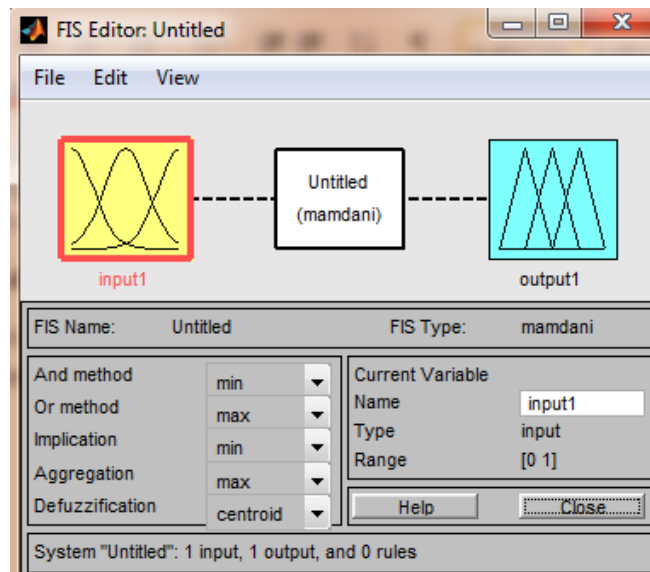


Figura 38 Editor FIS

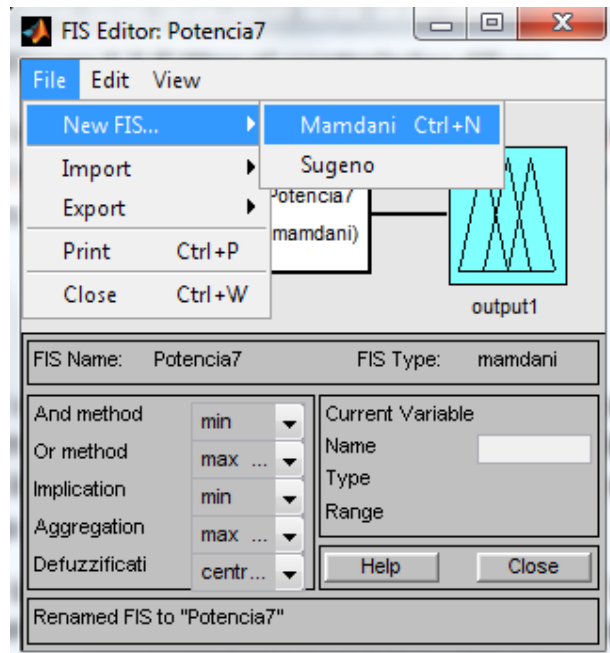


Figura 39 Selección del tipo de controlador

Continuando con el proceso se debe entrar a la parte del módulo de **Input**, donde primero se remueven todas las entradas que proporciona el editor por default y posteriormente se agregan las entradas que se necesitan para el diseño de cada controlador en particular. Mientras más entradas y salidas se tengan habrá una mayor calidad del controlador; sólo con el inconveniente que se incrementa el tiempo computacional, haciendo más lento el proceso para obtener los resultados de las simulaciones. La forma donde se diseñan las funciones de membresía de entrada o de salida se puede visualizar en la figura 40.

De igual forma que en el módulo de entrada, primero se realiza la eliminación de las funciones existentes y enseguida se cargan las que se requieran para el diseño. La forma de agregar o remover funciones se puede visualizar en la figura 41.

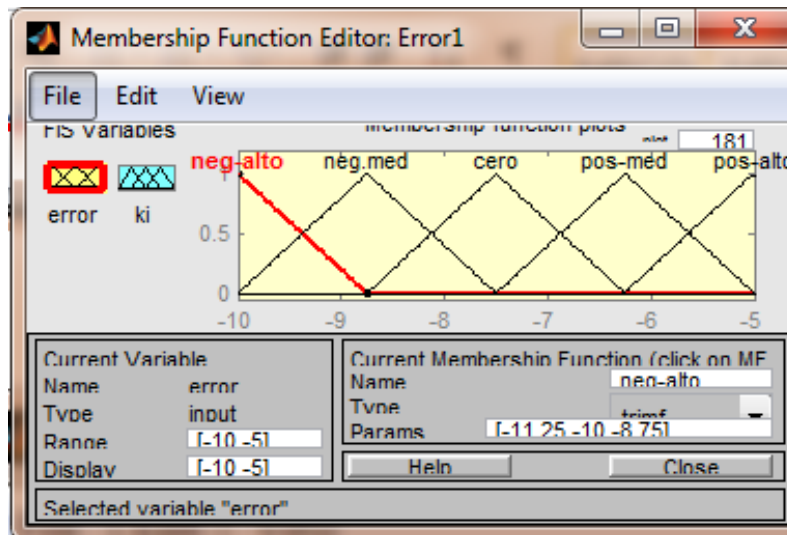


Figura 40 Diseño de funciones de membresía

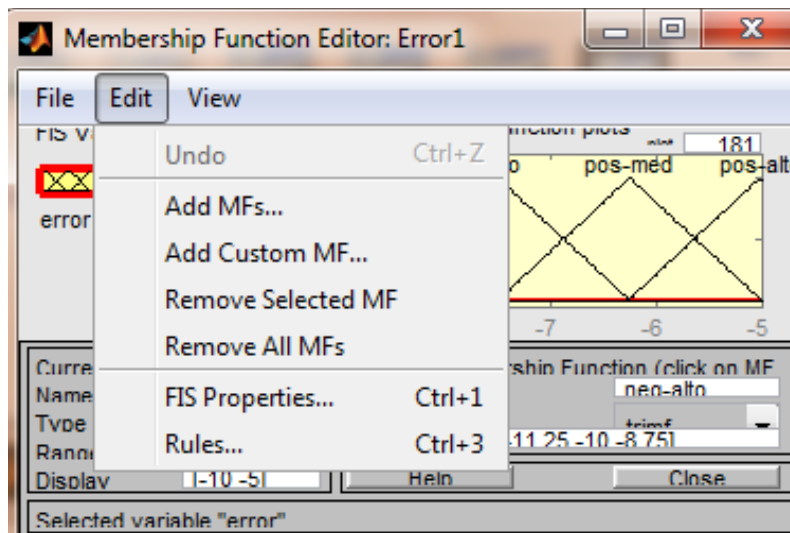


Figura 41 Remover y agregar funciones de membresía

4.6 Establecimiento de reglas difusas en Matlab.

Haciendo uso de la lógica del razonamiento humano en forma análoga de acuerdo a las necesidades y características del proceso; así como de las variables a controlar, se determinan los rangos de actuación de las diversas reglas difusas.

Para ello se entra a las opciones de **Edit** y **Rules** dentro de la ventana este procedimiento se ilustra claramente en las figuras 42. y 43.

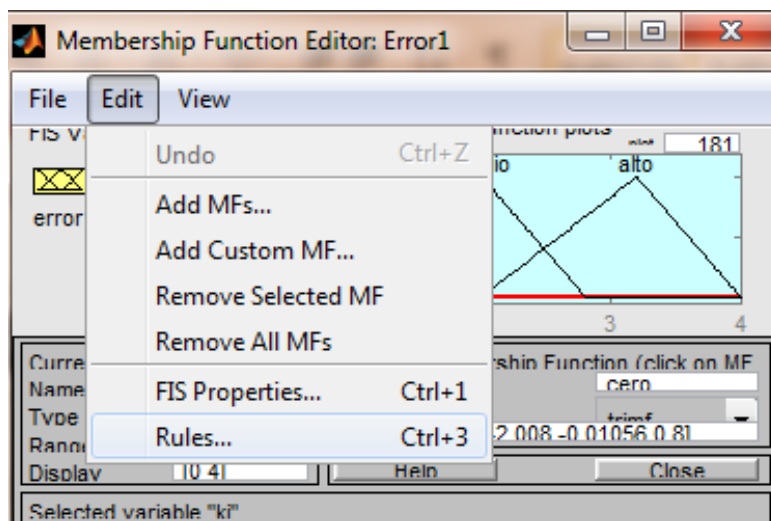


Figura 42 Entrada a la edición de reglas difusas

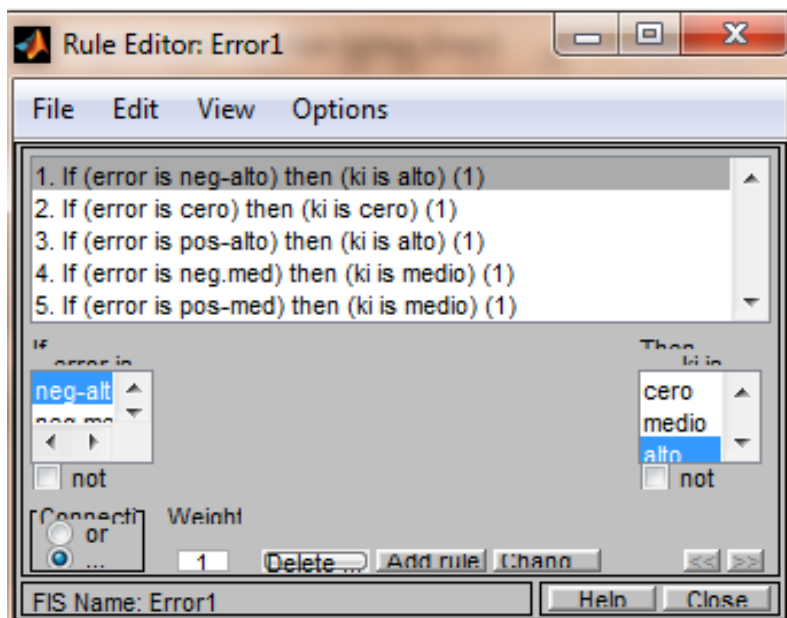


Figura 43 Edición de reglas difusas

Una vez establecidas las reglas difusas es posible realizar su verificación de cada una de ellas, comparando la entrada contra la salida para cualquier tipo de valor entrando a las opciones de **View** y **Rules** como se representa en la figura 44 y 45.

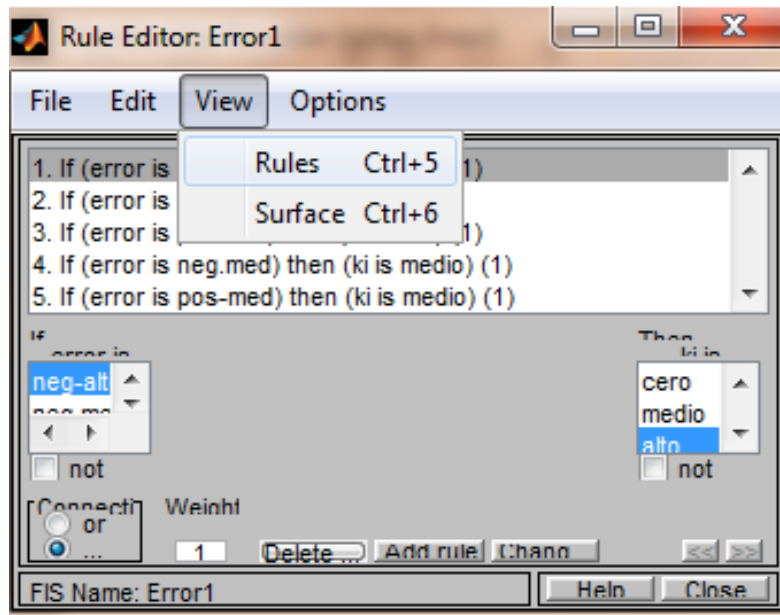


Figura 44 Entrada a la comprobación de reglas difusas

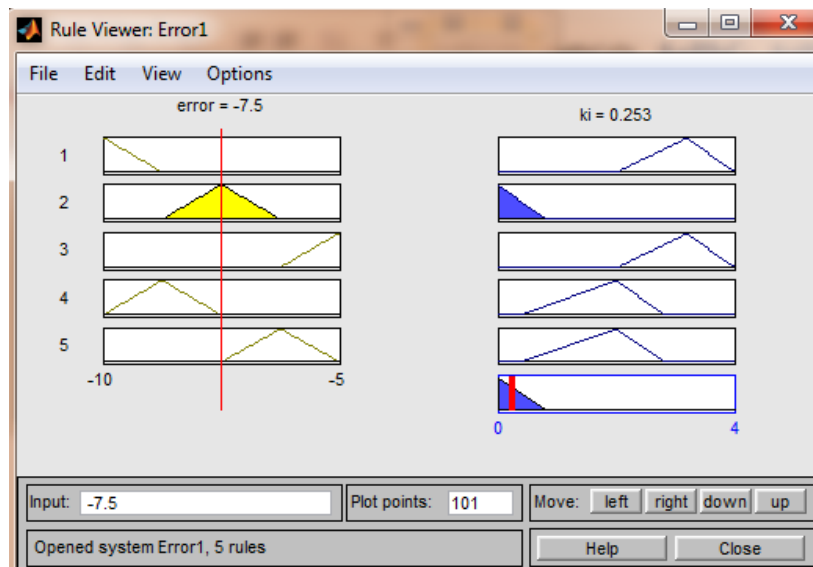


Figura 45 Comprobación de reglas difusas.

4.7 Programa de control difuso.

Para realizar las funciones de control es necesaria la programación de todas las reglas difusas y la actuación de cada una de ellas dependiendo del tipo de error; así como, de su magnitud para la generación de la señal de corrección con la finalidad de llevar a la variable controlada al punto deseado. Este programa se puede generar en forma automática siguiendo los pasos del auxiliar del **FIS Editor** de **Matlab** o en forma manual.

El código del programa se puede visualizar en la tabla 9, la cual presenta los rangos de actuación de las funciones de membresía de entrada y de salida, el método empleado, entre algunos otros parámetros.

Tabla 9 Código del programa

Línea	Código
1	[[System]
2	Name='Error1'
3	Type='mamdani'
4	Version=2.0
5	NumInputs=1
6	NumOutputs=1
7	NumRules=5
8	AndMethod='min'
9	OrMethod='max'
10	ImpMethod='min'
11	AggMethod='max'
12	DefuzzMethod='centroid'
13	
14	[Input1]
15	Name='error'
16	Range=[-10 -5]
17	NumMFs=5
18	MF1='neg-alto': 'trimf', [-11.25 -10 -8.75]
19	MF2='neg.med': 'trimf', [-10 -8.75 -7.5]
20	MF3='cero': 'trimf', [-8.75 -7.5 -6.25]
21	MF4='pos-med': 'trimf', [-7.5 -6.25 -5]
22	MF5='pos-alto': 'trimf', [-6.263 -5.013 -3.763]
23	
24	[Output1]
25	Name='ki'
26	Range=[0 4]
27	NumMFs=3
28	MF1='cero': 'trimf', [-2.008 -0.01056 0.8]
29	MF2='medio': 'trimf', [0.4 2 2.8]
30	MF3='alto': 'trimf', [2 3.2 4]
31	
32	[Rules]
33	1, 3 (1) : 1
34	3, 1 (1) : 1
35	5, 3 (1) : 1
36	2, 2 (1) : 1
37	4, 2 (1) : 1
38	

CAPÍTULO V.- RESULTADOS DE SIMULACIÓN COMPENSADOR VECTORIAL SERIE CON CONTROLADOR DIFUSO.

5.1 Introducción

Tomando en cuenta que los controladores **PID** han sido empleados desde hace varias décadas en la industria para el control de procesos y hoy en día siguen siendo utilizados para el control de diversos tipos de variables.

El control **P (proporcional)** es un control que siempre presenta el error de estado estable; esto significa que en la práctica la variable nunca se iguala con el punto de ajuste y además dependiendo de la ganancia se puede volver inestable o con demasiadas oscilaciones.

Por otra parte el control **I (integral)** ayuda a eliminar el error de estado estable y generalmente se aprovecha esta característica para unirlo en la práctica con el proporcional.

Por último el control **D (derivativo)** es el control que se dice que se adelanta al error; debido a la velocidad con la que actúa, sin embargo este no se utiliza sólo, porque al existir un error constante la salida del controlador sería igual a cero.

Además el control **PID** podría no ser tan eficiente cuando las características de las variables controladas sean no lineales en ciertos puntos de operación. En la práctica para obtener mejores resultados se recomienda emplear este tipo de controladores en forma conjunta.

Hoy en día se han estado empleando los controladores difusos con mejores resultados que los controladores **PID**, aunque desde la década de los setenta Mamdani diseñó un controlador difuso para el control de un motor de vapor (Ponce, 2010).

Los controladores difusos están diseñados en base a la forma de pensar del ser humano y su forma de operación es basada en el tipo de razonamiento humano. Los controladores difusos se forman de cuatro partes: interfaz de difusificación, base de conocimiento, lógica de decisiones e interfaz de desdifusificación que se visualizan en la figura 46.



Figura 46 Diagrama a bloques de un controlador difuso

La difusificación realiza una conversión de los valores de entrada de la variable controlada en valores lingüísticos que se convierten en etiquetas de las funciones de membresía o de pertenencia.

Enseguida se encuentra la lógica de decisiones que se base en el universo de conocimientos y las entradas difusificadas para formular la parte de las estrategias de control basado en sentencias tipo **IF THEN**.

Por último se localiza la interfaz de desdifusificación convierte de los valores en una estrategia clara de control a partir de una acción difusa.

5.2 Diseño del control difuso.

Para la desdifusificación del controlador se realizó mediante la selección de cinco conjuntos difusos, de forma análoga para la difusificación. Como se representa en las figuras 47 y 48.

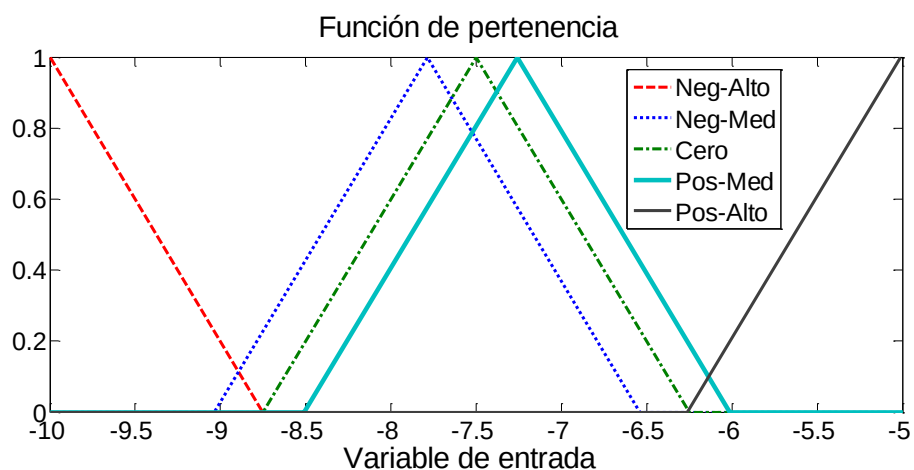


Figura 47 Función de pertenencia de entrada

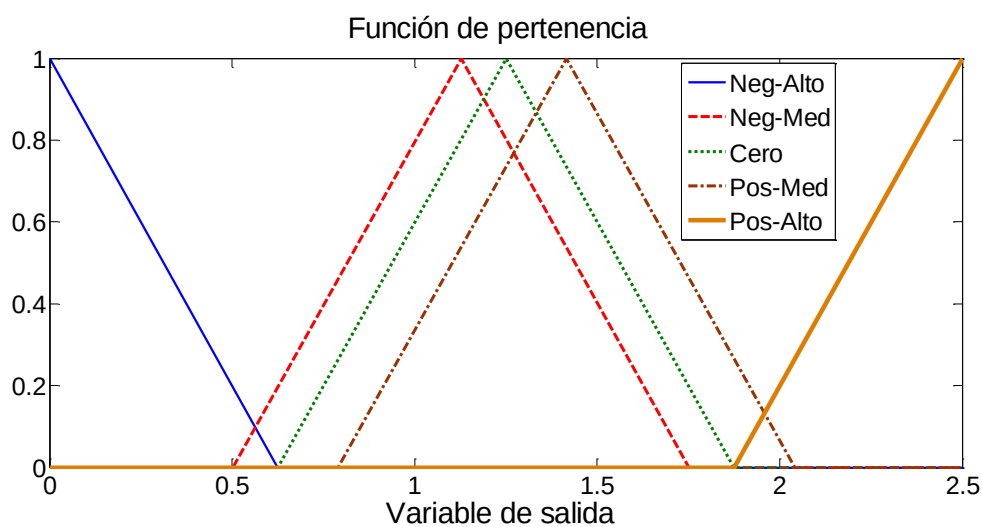


Figura 48 Función de pertenencia de salida

Asimismo se diseñó la siguiente matriz de relación difusa para cada una de las reglas de la entrada (señal de error) y salida (señal de corrección), como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10 Matriz de reglas difusas

Entrada (error)	Neg-Alto	Neg-Med	Cero	Pos-Med	Pos-Alto
Salida (corrección)	Pos-Alto	Pos-Med	Cero	Neg-Med	Neg-Alto

Por último se procedió a realizar la comprobación del desempeño del controlador haciendo su comparación con el control PID. Para esto primero se inyectaron tres escalones cada 1.5 segundos en el punto de ajuste iniciando con una referencia de 550 MW de la forma mostrada en las figuras 49 y 50.

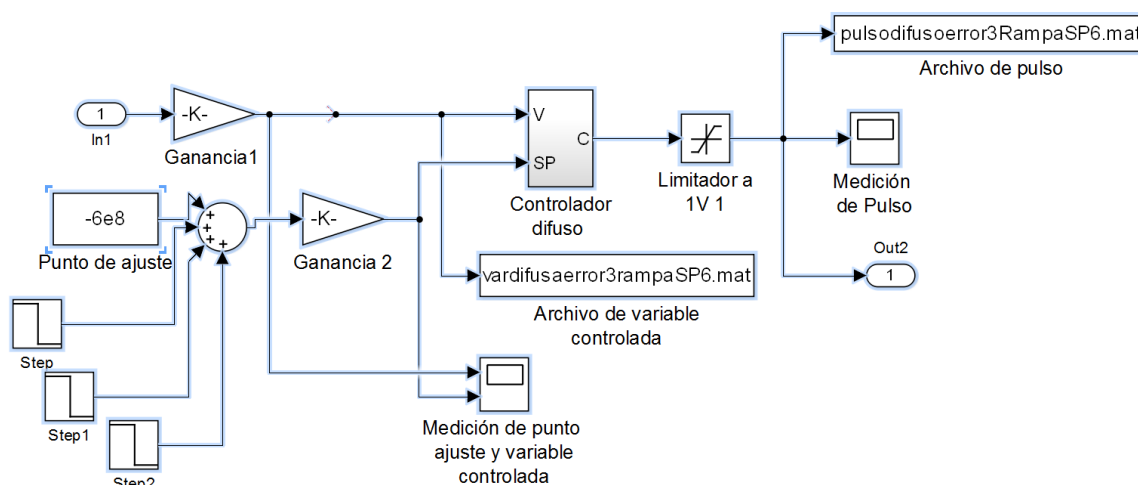


Figura 49 Introducción de señal escalón al control difuso

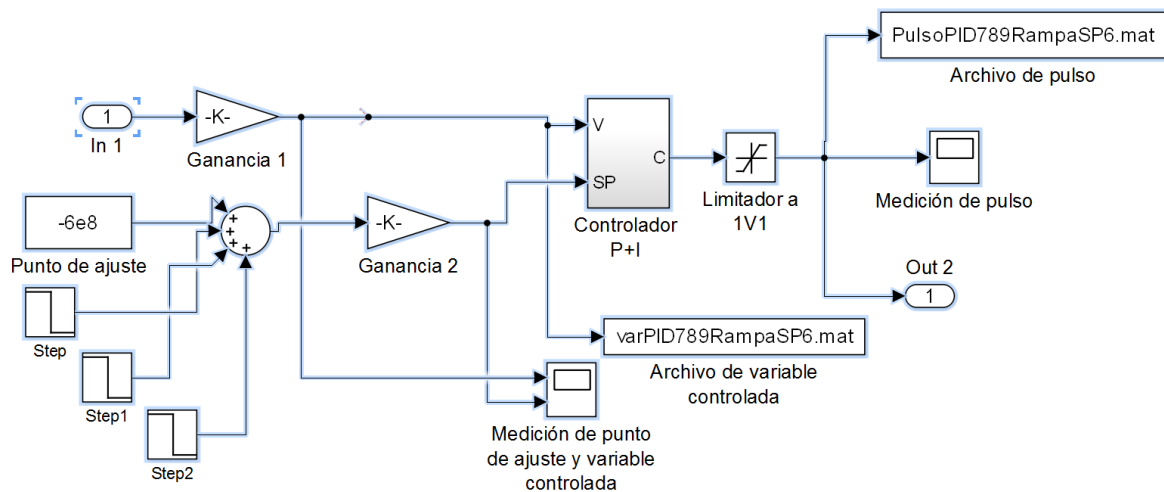


Figura 50 Introducción de señal escalón al control PID

Los primeros resultados de las comparaciones de ambos controladores es la variable controlada y se logran cotejar en la figura 51. Observe como al aplicar un impulso al punto de ajuste de 750MW a 850MW, la respuesta del controlador difuso es más rápido que el controlador PID; además no presenta oscilación para llegar al punto de ajuste.

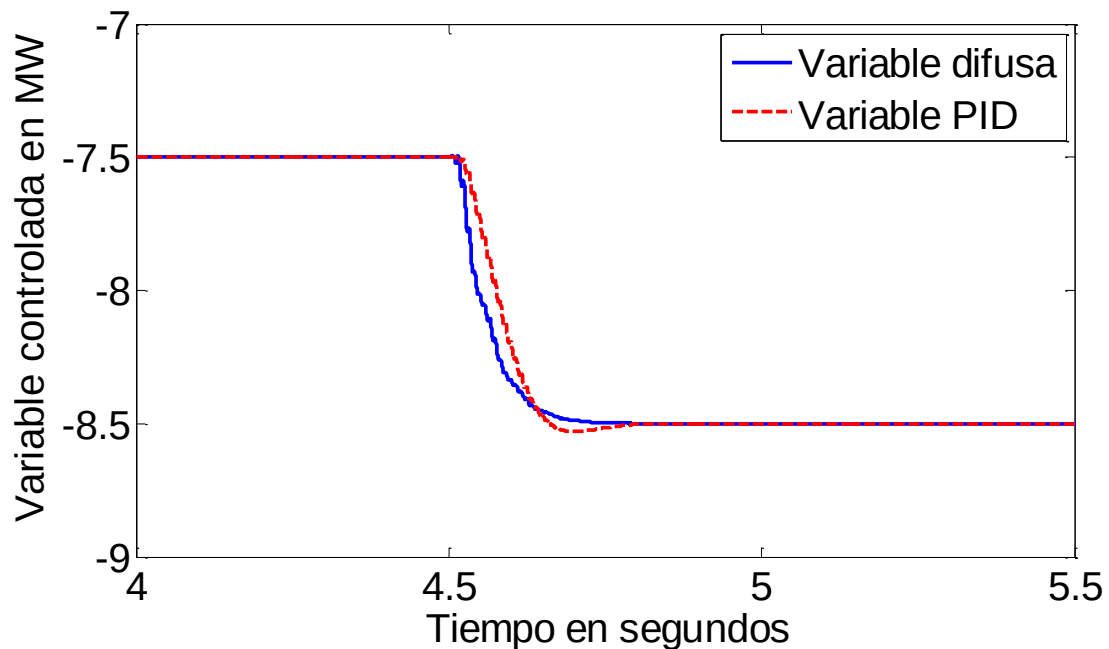


Figura 51 Variable controlada iniciando en 750MW

Además de la variable controlada se comprobó la respuesta del pulso de disparo hacia los IGBT's en un rango muy amplio de la variable controlada empleando diferentes impulsos para el punto de ajuste y se demostró que tarda menos tiempo para alcanzar el punto de ajuste que el controlador clásico PID obteniendo los resultados de la figura 52.

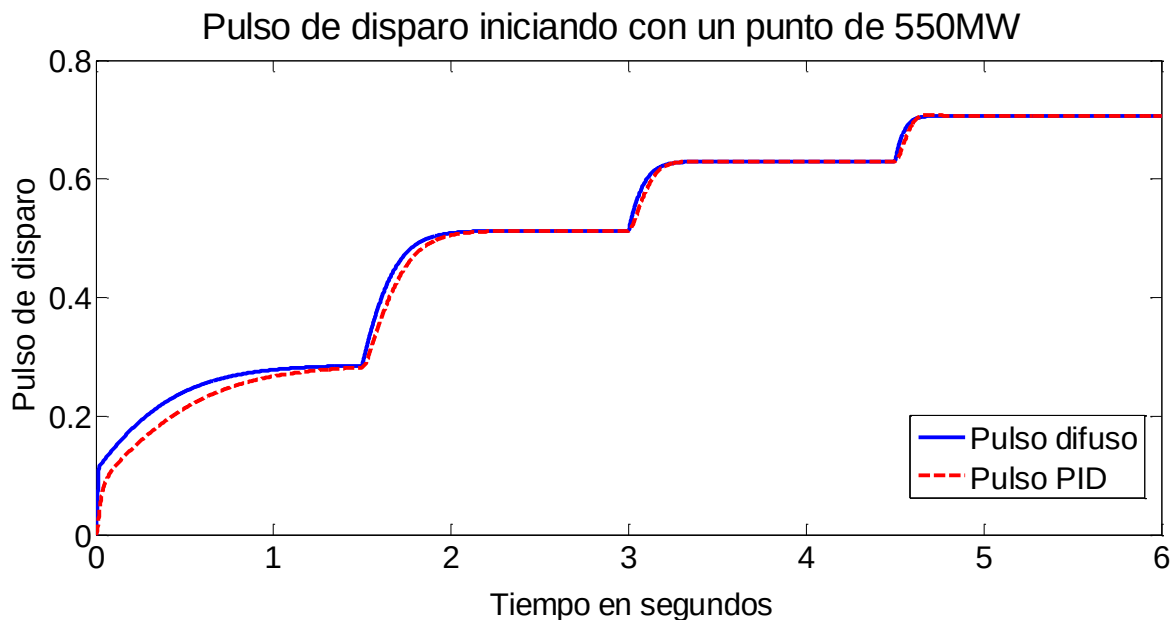


Figura 52 Pulso de disparo iniciando en 550MW

También se probó el desempeño de los dos controladores, partiendo de un punto de ajuste de 600MW, de igual forma se aplicaron tres escalones al punto de ajuste para posteriormente hacer la comparación de ambos controladores, demostrándose siempre el mejor desempeño del controlador difuso comparado con el PID, que los resultados están plasmados en las figuras 53 y 54. En la figura se visualiza con el punto de ajuste está en 800MW y se aplica un impulso al punto de ajuste para hacerlo llegar a 900MW, con lo finalidad de tener un análisis más amplio de la respuesta y asegurarse que siempre responde mejor el control difuso.

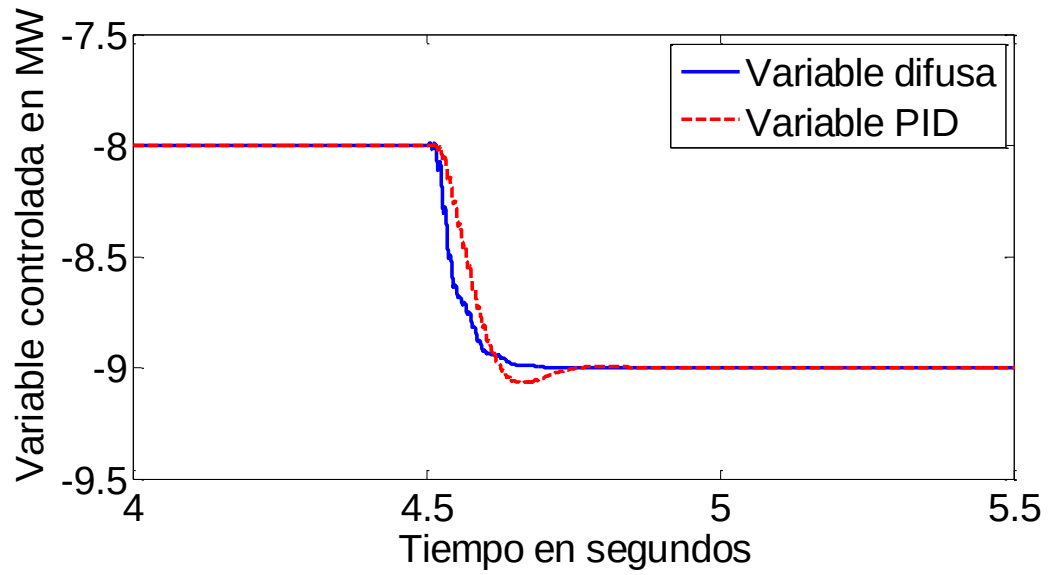


Figura 53 Variable controlada iniciando en 800MW

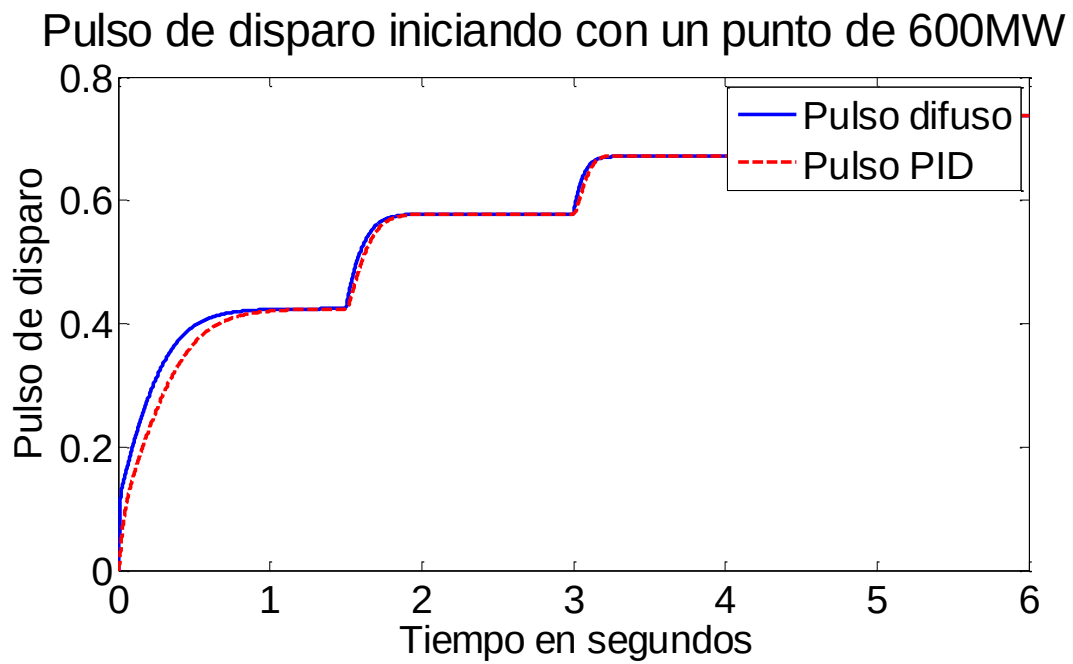


Figura 54 Pulso de disparo iniciando en 600MW

5.3 Comparación de resultados.

El método que se utilizó para realizar la comparación cuantitativa del amortiguamiento de las oscilaciones de la variable controlada de ambos controladores fue el de Prony, el cual se basa en la medición de una señal $y(t)$ representada en tiempo continuo o discreto, como una suma de n amortiguaciones complejas sinusoidales como se visualiza en las ecuaciones 5.1 y 5.2.

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \bar{R}_i \exp^{\lambda_i t} \sum_{i=1}^{n/2} A_i = \exp^{\alpha_i t} \cos(\beta_i t + \phi_i) \quad (5.1)$$

$$y[t] = \sum_{i=1}^n \bar{R}_i Z_i^k \quad (5.2)$$

Donde $\bar{R}_i$ es un residuo de salida correspondiente a la modalidad $\lambda_i = \alpha_i + j\beta_i$; $Z_i = \exp^{\lambda_i T_s}$; T_s es el tiempo simple; $A_i = 2|\bar{R}_i|$; y k es el tiempo total.

El método original de Prony calcula λ_i y $\bar{R}_i$ como se muestra a continuación:

- 1) Considera que 5.3 es la solución para una ecuación diferencial con orden n :

$$y[k] = -a_1 y[k-1] - a_2 y[k-2] - \dots - a_n y[k-n] \quad (5.3)$$

Está puede ser escrita en una matriz de la forma de 5.4.

$$Y = D\theta \quad (5.4)$$

Donde conduce a la serie de ecuaciones de la 5.5 hasta la 5.6.

$$Y = [y_{k+n} y_{k+n+1} y_{k+n+2} \dots y_{k+N}]_{N-n+1}^T \quad (5.5)$$

$$\theta = [-a_1 - a_2 \dots - a_n]^T \quad (5.6)$$

Además de la matriz 5.7.

$$D = \begin{pmatrix} y_{k+n-1} & y_{k+n-2} & \cdots & y_k \\ y_{k+n} & y_{k+n-1} & \cdots & y_{k+1} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{k+N-1} & y_{k+N-2} & \cdots & y_{k+N-n} \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

de $(N - n + 1) \times n$, donde N es el número de muestras, El método de mínimos cuadrados se puede utilizar para calcular θ .

- 2) El vector θ conduce a los valores propios de Z'_{i_s} del sistema, los cuales son las raíces características de la ecuación del sistema como se denota en la ecuación 5.8.

$$Z^n + a_1 Z^{n-1} + a_2 Z^{n-2} + \dots + a_n = 0 \quad (5.8)$$

La matriz se puede escribir en una forma similar al punto 2) usando el cálculo de Z'_{i_s} y resolviendo los residuos $Ri's$.

El orden del sistema n es usualmente desconocido. En (Ghasemi, 2006), la “regla de oro” de una estimación inicial $n = \frac{N}{6}$ se propone. Una vez que se obtienen las raíces de la ecuación característica del sistema, los polos correspondientes a altas frecuencias, que son conocidos por no estar presente en los sistemas de potencia, son descartados. El orden de la subestimación pueden ser resultados inexactos; por otra parte, el orden más alto puede conducir a la estimación de polos extraños, ya que el modelo trata de detectar el ruido que perturba la señal. Una mejor técnica para escoger n es propuesta en (Ghasemi, 2006) para sistemas de comunicación. Este método está basado sobre el monitoreo de los valores singulares de la matriz D por $n = \frac{N}{2}$. Aunque el máximo orden posibles, el cual puede ser escogido para el sistema, es $\frac{N}{2}$, el orden práctico de una matriz es igual al para el número de sus valores singulares más grandes.

Un ejemplo para visualizar claramente la aplicación del método de Prony se presenta a continuación.

Dadas cuatro muestras:

- $y(0) = 0.3902$
- $y(1) = 0.7998$
- $y(2) = 0.6967$
- $y(3) = 0.4377$

Encontrar el segundo orden de la señal $x(t) = e^{-\sigma t} \text{sen}(\omega t - \phi)$ que coincide con estas muestras.

Se tiene que $k = 3$ y $n = 2$, sustituyendo los valores en las ecuaciones:

$$y[2] = -a_1 y[1] - a_2 y[0]$$

$$y[3] = -a_1 y[2] - a_2 y[1]$$

Dando el siguiente paso se llega a:

$$0.6967 = -a_1 0.7998 - a_2 0.3902$$

$$0.4377 = -a_1 0.6967 - a_2 0.7998$$

Esto se puede escribir en una matriz de forma:

$$\begin{bmatrix} 0.6967 \\ 0.4377 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7998 & 0.3902 \\ 0.6967 & 0.7998 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \end{bmatrix}$$

Resolviendo la ecuación anterior se llega a:

$$\begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7998 & 0.3902 \\ 0.6967 & 0.7998 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0.6967 \\ 0.4377 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0505 \\ -0.3679 \end{bmatrix}$$

La ecuación característica que se obtiene es:

$$1 - 1.0505Z^{-1} + 0.3679Z^{-2}$$

Las raíces son:

$polos_{1,2} = 0.5253 \pm 0.3033j$ con radio $0.6065 < 1$ lo que significa que el sistema es estable.

La amplitud, fase, frecuencia de oscilación y el coeficiente de amortiguamiento se definen como se observa en las igualdades de la 5.9 a la 5.12.

$$Amplitude = \sqrt{real^2 + imag^2} \quad (5.9)$$

$$fase = \tan^{-1} \left(\frac{imaginaria}{real} \right) \quad (5.10)$$

$$f_{oscilación} Hz = \frac{imaginaria}{2\pi} \quad (5.11)$$

$$Amortiguamiento = \frac{-parte\ imaginario}{amplitud} \quad (5.12)$$

El método se utilizó empleando un programa realizado en Matlab y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11, que corresponden a la figura 53. Nótese que el control difuso siempre supera al control PID de alrededor de un 4 hasta un 7 por ciento de amortiguamiento en las oscilaciones del sistema, estos valores fueron obtenidos con la ecuación 5.12.

Tabla 11 Resultados con el método de Prony

Comparación de los controladores por medio del método de Prony		
Tiempo en segundos	Porcentaje de amortiguamiento del control difuso	Porcentaje de amortiguamiento del control PID
1.5 a 2	69.4	65.6
3 a 3.5	72.24	66.41
4.5 a 5	76.13	69.29%

5.4 Conclusiones.

- Después de realizar un análisis detallado de los dispositivos FACTS; además de los sistemas y tipos de controladores que se han utilizado para la regulación de los principales parámetros de las líneas de transmisión en los sistemas eléctricos de potencias de algunos países, incluyendo el nacional; se observó que la mayoría los algoritmos diseñados para la regulación de diferentes dispositivos, fueron comparados con los controladores clásicos PID o alguno de ellos.
- En este mismo análisis se detectó que hasta la fecha no se tienen publicaciones sobre la aplicación de controladores difusos a los compensadores vectoriales serie.
- Los controladores clásicos bien sintonizados son eficientes para el control de los FACTS; sin embargos por las características no lineales de las variables que controlan estos dispositivos, sólo son efectivos en el rango que las variables muestran una respuesta lineal y en la otra parte disminuye su efectividad, así como su rendimiento.
- Los controladores PID tienen un sustento matemático muy sólido; sin embargo en la práctica las condiciones físicas cambian en forma dinámica y complica el ajuste de los parámetros en campo para un excelente desempeño.

- Hay algoritmos de control muy efectivos como los neurodifusos; no obstante hasta la fecha consumen demasiado tiempo computacional y limita su aplicación en sistemas eléctricos de potencia reales.
- La aplicación de un sistema de control empleando la lógica difusa aplicado a un compensador vectorial serie, incrementa la eficiencia en un amplio rango de trabajo de las variables controladas; comparado contra el controlador PID, es más eficiente y se comprobó en forma matemática el porcentaje de amortiguamiento empleando el método Prony con diferentes cargas e instantes de tiempo, aplicando señales tipo escalón al punto de ajuste. Los resultados se visualizan en la tabla 11.
- La respuesta en el tiempo de estabilización del controlador difuso es superior al controlador PID. El resultado se muestra en la figura 54.
- El controlador difuso es simple de aplicar y requiere la transferencia del conocimiento; además de la experiencia de un operador experto a reglas y conjuntos difuso; debido a que está basado en la forma de razonar y actuar del ser humano. Para la aplicación en el compensador vectorial serie se emplearon cinco reglas difusas y conjuntos difusos para lograr la correcta regulación de la potencia activa.

5.5 Aportaciones

- Publicación en el Congreso Internacional de Mantenimiento Industrial COINMI 2013 de la Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas del estado de Nayarit, con el tema **“Control de Potencia Activa Mediante un Compensador Vectorial Serie en una línea de transmisión”** . Con un valor de tres puntos.
- Publicación en el Coloquio Interdisciplinario de Doctorado 2013 en el área de Ingeniería Mecatrónica y Biomédica de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla 2013 con el título **“Análisis de un Compensador Vectorial Serie Incrustado en un Sistema Eléctrico de Potencia para el Control de Flujos de Potencia”**. Con un valor de siete puntos.

- Publicación en el Congreso Internacional de Energías Renovables y Mantenimiento Industrial CIERMI 2015 de la Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas del estado de Nayarit, con el tema **“Controlador PI en un SVeC para el Control de Potencia Reactiva en Líneas de Transmisión”** . Con un valor de tres puntos.
- Publicación en el Congreso Internacional de Energías Renovables y Mantenimiento Industrial CIERMI 2015 de la Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas del estado de Nayarit, con el tema **“Diseño de un Controlador Difuso para un Compensador Vectorial Serie Utilizado para el Control de Potencia en Líneas de Transmisión”** . Con un valor de tres puntos.

5.6 Trabajo futuro

Ya obtenidos los resultados de este trabajo **“Diseño de un control difuso para un compensador vectorial serie para el control de flujos de potencia en una línea de transmisión”** se continuará con la implementación en un prototipo a escala para realizar diversas pruebas de laboratorio, aprovechando parte de los recursos que fueron otorgados por PROMEP en la beca de nuevo PTC de la Universidad Tecnológica de Manzanillo para este proyecto.

También se someterá en el corto plazo un artículo en una revista de alto impacto y posteriormente un segundo artículo, del primero se anexa la primera versión..

5.7 Bibliografía

- Acha, E. F. (2004). *FACTS: Modelling and simulation in power network*. England: John Wiley & Sons.
- Ajammi, Naser y Mostaga. (2009). A novel hybrid fuzzy/LQR damping oscillations controller using STATCOM. *IEEE second international conference on computer and electrical engineering*, 348-342.
- Arriaga, J. a. (2001). *Computer modelling of electrical power system*. England: John Wiley & Sons.
- Bolton, W. (2012). *Mecatrónica sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. México: Alfaomega.
- Chun-Feng, Chia-Hung y Chia-Feng. (2013). Coordinated control of flexible AC transmission system devices using evolutionary fuzzy lead lag with advanced continuous ant colony optimization. *IEEE Transactions on power systems*, 385-392.
- Expósito, G. (2002). *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. España: McGraw Hill.
- Ghasemi, H. (2006). *On-line monitoring and oscillatory stability margin prediction in power systems based on systems identification*. Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo.
- González. (2006). *Dispositivos FACTS basados en fuentes convertidoras de ac-ac*. Guadalajara, Jalisco, México: CINVESTAV.
- González, J. M. (2007). AC/AC series converter in transient stability,. *Proceedings on north american power system, New Mexico*, 7.
- Gonzalez, J. M. (2010). Modeling and comparative study of serie vectorial compensators. *IEEE Transaction on power delivery*, 11.
- González, J. M. (2010). *Steady state and transient stability analysis of electrical grids with AC/AC based FACTS devices embedded*. Guadalajara, Jalisco, México: CINVESTAV.
- Grainger, J. J. (1994). *Power system analysis*. Singapore: McGraw Hill.
- Gyugyi, L. S. (1995). The unified power flow controller: A new approach to power transmission control. *IEEE Transaction on power delivery*, 13.
- Hingorani, N. G. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission*. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers.

- Kai-Hung, Whei-Min, Chih-Ming, Wen-Cha y Yuan-Hui. (2009). Real power control design for SSSC via fuzzy neural network based on genetic algorithms. *IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics*, 1769-1774.
- Khatami, Nasser y Razavi. (2009). Fuzzy c-means clustering damping controller design for a power system installed with TCSC. *IEEE Third international conference on power systems*, 1-6.
- Kundur, P. (1994). *Power systems stability and control*. New York: McGraw Hill.
- Lehn, P. W. (1998). Experimental evaluation of STATCOM closed loop. *IEEE Transaction on power delivery*, 4.
- Lium y Wang. (2009). Coordinated desing of multiple FACTS controllers base on fuzzy immune co-evolutionary algorithm. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 1-6.
- Lopes, L. A. (2001). Pulse width modulated capacitor for series compensation. *IEEE Transaction on power electronics* , 8.
- Mancilla, F. (2007). *AC Link load flow cotrol in electric power systems*. Madison, Wisconsin, USA: University of Wisconsin-Madison.
- Mancilla, F. D. (2005). A pulse width modulated AC link unified power flow controller. *IEEE PES power engineering society general meeting*, 8.
- Mancilla, F. D. (2008). A comparative evaluation of series power flow controllers using DC and Ac link converters. *IEEE Transaction on power delivery*, 12.
- Mansour, Y. (1990). *Voltage stability of power system: concepts, analytical tools and industry experience*. IEEE/PES.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderno*. México: Pearson.
- Pérez, S. (2008). *Desarrollo de un circuito de pruebas para la caracterización del interruptor bidereccional*. Cuernavaca, Morelos, México: CENIDET.
- Ponce, C. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. México: Alfaomega.
- Pranesh, R. C. (2000). STATCOM control for power system voltage control applications. *IEEE Transaction on power delivery*, 7.
- Rabiah y Laiq . (2012). Adaptive neuro-fuzzy wavelet based SSSC damping control paradigm. *IEEE 10th international conference on frontiers on information technology*, 101-105.

- Ramirez, J. M. (2007). *Steady state and transient stability with an AC/AC PWM series compensator*. Florida: IEEE PES summer meeting.
- Ramírez, J. M. (2007). Steady state formulation of FACTS devices based on AC-AC converters. *IEEE proceedings on electric power applications*, 13.
- Sen, K. K. (1998). Static synchronous series compensator: Theory, modeling and application. *IEEE Transaction on power delivery* , 6.
- Sinha, Patel y Prasad. (2011). Applications of FACTS devices with fuzzy controller for oscillation damping in AGC. *IEEE International conference on recent advancements in electrical and control engineering*, 314-318.
- Song, Y. H. (1999). *Flexible AC Transmission System (FACTS)*. United Kingdom: Institution of Electrical Engineers.
- Taylor, C. W. (1994). *Power system voltage stability*. New York: McGraw Hill.
- Thakare, Dalvi y Joshi. (2009). Statcom based fuzzy controller for grid connected wind generator. *Second international conference on emerging trends in engineering and technology ICETET*, 35-39.
- Uzunovic, E. (2001). *Transient stability and power flow models of VSC FACTS controllers* . Waterloo, ON Canada: Ph. D. dissertation.
- Van Cutsem, T. &. (1998). *Voltage stability of electric power system*. Springer.
- Venkataramanan, G. (2004). Three-phase vector switching converters for power flow control. *IEEE proceedings electric power applications*, 13.
- Venkataramanan, G. a. (2002). Pulse width series compensator. *IEEE proceedings generation transmission and distribution*, 5.
- Villalvazo, E. (2003). *Control de temperatura con lógica difusa*. Manzanillo, Colima, México: Universidad de Colima.

5.7 Anexos



Control de Potencia Activa Mediante un Compensador Vectorial Serie en una Línea de Transmisión

Efrain Villalvazo Laureano¹, Juan Miguel González López², Francisco Javier Hernández Peña³

¹Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla – 21 Sur 1103 Barrio Santiago, Puebla, México efrainhazur@hotmail.com¹

²Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Electromecánica – Km 20 Carretera Manzanillo-Cihuatlan, Manzanillo, Colima, México. juangol7906@hotmail.com²

³Universidad Tecnológica de Manzanillo – Camino hacia las humedades S/N, Salagua, Manzanillo, Colima, México. javier_thebig90@hotmail.com³

Resumen

Un Compensador Vectorial Serie (SVeC) es estudiado en esta investigación dentro de la tecnología conocida como Sistemas Flexibles de Transmisión de AC (FACTS), este convertidor electrónico está basado en una fuente AC-AC y es capaz de operar entre dos subestaciones eléctricas para controlar el flujo de potencia que circula por la línea de transmisión. Además puede ser utilizado en parques eólicos, o fotovoltaicos para controlar la potencia que se inyectará a la red eléctrica. Las simulaciones de este dispositivo se realizan mediante la ayuda del software EMTDC/PSCAD y se utiliza un sistema de potencia de 2 generadores y 3 subestaciones como sistema de prueba para mostrar la capacidad de este dispositivo electrónico.

Palabras claves

Electrónica de potencia, Interruptores bidireccionales AC, FACTS, estabilidad de sistemas eléctricos de potencia, flujos de potencia.

1. Introducción

La generación de energía eléctrica se produce en las centrales eléctricas, posteriormente se transporta por la red de transmisión que consta principalmente de subestaciones eléctricas y líneas de transmisión para entregar la energía a los centros

H. Puebla de Z. a 29 de Mayo de 2013.

Efraín Villalvazo Laureano:
Autor para correspondencia

Por medio de la presente se da constancia de que el artículo

**"Análisis de un Compensador Vectorial Serie Incrustado en un Sistema Eléctrico de
Potencia para el Control de Flujos de Potencia"**

ha sido aceptado para ser presentado en el Sexto Coloquio Interdisciplinario de Doctorado 2013, en el área de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Biomédica, y en la modalidad de

PONENCIA

Favor de realizar las modificaciones que resuelvan las siguientes observaciones que los evaluadores han realizado a su artículo:

- 1) Ninguna.

Y enviar el artículo debidamente corregido –si aplica– a más tardar el 03 de Junio.

También le invitamos a preparar su presentación en el formato de Power Point para tal efecto y enviarla a más tardar el 10 de Junio.

Por favor considere que es indispensable que realice su registro y pago a más tardar el 03 de Junio para que su artículo aparezca en las memorias con ISBN. Para mayor información visite la página <http://cecip.upaep.mx/coloquio2013/>

Se extiende la presente a los fines que al interesado convengan.

ATTE.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rubi Salazar Amador', is written over a circular stamp.

Dra. Rubi Salazar Amador, POSGRADO EN
MECATRÓNICA
Coordinadora del Posgrado en Mecatrónica, UPAEP.
Tel: +52 222 2299400 Ext. 7126
Correo-e: rubi.salazar@upaep.mx

Análisis de un compensador vectorial serie incrustado en un sistema eléctrico de potencia para el control de flujos de potencia

Efrain Villalvazo Laureano¹, Juan Miguel González López¹, Julio C. Rosas Caro²

¹ Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, efrainhazur@hotmail.com

¹ Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, juangol7906@hotmail.com

² Instituto Tecnológico de ciudad Madero, rosascarojc@hotmail.com

Resumen

Este trabajo analiza un Compensador Vectorial Serie (SVC) en el contexto de Sistemas Flexibles de Transmisión de AC (FACTS), este convertidor electrónico de potencia está basado en una fuente AC-AC y es capaz de operar entre dos subestaciones eléctricas con el fin de controlar el flujo de potencia que circula por la línea de transmisión. Las simulaciones de este modelo se realizan mediante la ayuda del software EMTDC/PSCAD y se utiliza un sistema de potencia de 2 generadores y 3 subestaciones como sistema de prueba en la cual los resultados obtenidos muestran con claridad la capacidad de este dispositivo para controlar el flujo de potencia en las líneas de transmisión, haciéndolo muy competitivo con los hasta ahora propuestos.

Palabras Clave

Electrónica de potencia, Interruptores bidireccionales AC, FACTS, estabilidad de sistemas eléctricos de potencia, flujos de potencia.

1. Introducción.

La Figura 1 muestra un sistema eléctrico de potencia, el cual está compuesto en términos generales, por los tres subsistemas: Generación de energía, transmisión, y centros de carga. (Expósito, 2002). La generación de energía se realiza en las centrales eléctricas, ésta se transporta por el sistema de transmisión que consta principalmente de subestaciones eléctricas y líneas de transmisión con el fin de entregar la energía a los centros de carga en las normas específicas de calidad y fiabilidad para ser utilizada por los consumidores (Grainger, 1994).

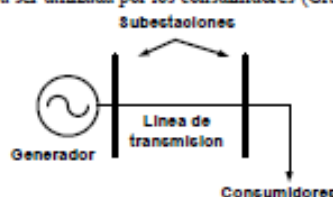


Figura 1. Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

En los últimos años los centros de carga han aumentado el consumo de energía eléctrica debido al rápido crecimiento de la población y de la industria lo que provoca un aumento en la generación que se debe transportar desde los centros de generación hasta los consumidores provocando que algunas líneas de transmisión se saturen o congestionen la red de transmisión y estén trabajando cerca de sus límites físicos. Una solución a éste problema es la de construir nuevas líneas de transmisión, pero generan un costo muy elevado. Además, debido a las presiones sobre el cuidado y conservación del medio ambiente y del derecho de vía, hace cada vez es más difícil, si no imposible, la construcción de nuevas líneas de transmisión, (Arriaga, 2001). Este hecho ha dado la oportunidad a la electrónica de potencia mediante el diseño de dispositivos conocidos como FACTS que de acuerdo con (Hingorani, 2000) "son sistemas de transmisión de corriente alterna que incorporan controladores estáticos basados en electrónica de



La Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

A: Efrain Villalvazo Laureano

Por haber presentado la ponencia titulada “Diseño de un Control Difuso para un Compensador Vectorial Serie Utilizado para el Control de Potencia en Líneas de Transmisión” en el Congreso Internacional de Energías Renovables y Mantenimiento Industrial 2015.

Nuevo Vallarta, Nayarit, a 4 de junio del 2015.

Dr. Omar Reynoso Gallegos
RECTOR

Nuevo Vallarta, Nayarit, México.

Diseño de un Control Difuso para un Compensador Vectorial Serie Utilizado para el Control de Potencia en Líneas de Transmisión

Efraín Villalvazo Laureano,¹ Juan Miguel González López,² Luis Javier Velázquez
Chávez,³

Universidad Tecnológica de Manzanillo – Camino hacia las humedades S/N, Las
humedades, Manzanillo, Colima, 28869, México.

efrainhazur@hotmail.com, jimgonzalez@utmanzanillo.edu.mx, luisjvch@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se diseña un control difuso para un Compensador Vectorial Serie (SVC) en el contexto de Sistemas Flexibles de Transmisión de AC (FACTS), este convertidor electrónico de potencia está basado en una fuente AC-AC y es capaz de controlar el flujo de potencia que circula por la línea de transmisión. Las simulaciones de este modelo se realizan mediante la ayuda del software SIMULINK-Matlab, se utiliza un sistema de potencia de 2 generadores como sistema de prueba en la cual los resultados obtenidos muestran con claridad la capacidad del controlador difuso diseñado haciéndolo muy competitivo con los hasta ahora propuestos para este dispositivo FACTS.

Palabras claves

Control difuso, FACTS, Flujos de Potencia.

1. Introducción

Un sistema eléctrico está compuesto, en términos generales, por los tres subsistemas (Expósito, 2002): Generación de energía, Transmisión y Centros de carga. La energía se transporta generalmente a grandes distancias desde las centrales eléctricas a los puntos de consumo y esto se logra mediante una red de transporte encargada de enlazarlos, la red consiste en una configuración de líneas de transmisión de energía debidamente Interconectadas.



2015
CIERMI Congreso Internacional de Energías
Renovables y Mantenimiento Industrial

La Universidad Tecnológica de Bahía de Banderas

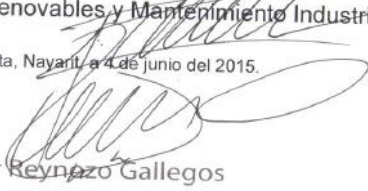
Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

A: Villalvazo Laureano Efrain

Por haber presentado la ponencia titulada “Controlador PID en un SVeC para el Control de Potencia Reactiva en Líneas de Transmisión” en el Congreso Internacional de Energías Renovables y Mantenimiento Industrial 2015.

Nuevo Vallarta, Nayarit, a 4 de junio del 2015.


Dr. Omar Reynoso Gallegos
RECTOR

Nuevo Vallarta, Nayarit, México.

Controlador PID en un S_{VeC} para el Control de Potencia Reactiva en Líneas de Transmisión

Villalvazo Laureano Efraín,¹ Velázquez Chávez Luis J.,¹ González López Juan M.¹

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla – Calle 21 Sur No.1103, Barrio

Santiago, Heroica Puebla de Zaragoza, Puebla, 74410, México.

efrainhazur@hotmail.com, luisjvch@hotmail.com, jmgonzalez@utmanzanillo.edu.mx,

Resumen

El artículo muestra el diseño un controlador proporcional integral (PI) para el control de la potencia reactiva en líneas de transmisión eléctrica como parte de un Sistema de Transmisión Flexible de AC (FACTS), tomando como base un convertidor electrónico de AC-AC y orientado a incrementar la eficiencia de la potencia reactiva en una línea de transmisión de un sistema eléctrico de potencia (SEP). Las pruebas pertinentes del diseño del controlador PI fueron efectuadas en el software SIMULINK-Matlab, empleando un sistema de dos máquinas de fuerza de generación eléctrica como sistema de prueba, demostrando la eficiencia del controlador PI para el control de la potencia reactiva en los dispositivos basados en electrónica de potencia FACTS.

Palabras claves

Control PI, FACTS, Potencia Reactiva.

1. Introducción

Los FACTS son dispositivos de estado sólido, donde la electrónica de potencia es la base para su diseño con la finalidad de conseguir el control de ciertos parámetros eléctricos, estos se emplean para incrementar la capacidad de una línea de transmisión y proporcionan un amortiguamiento adicional para mejorar las características dinámicas de los sistemas de potencia (Kai-Hung, Whei-Min, Chih-Ming, Wen-Cha y Yuan-Hui, 2009).

Validation of a SVeC Transient Stability Model Through Small-Disturbance Stability Studies

Efrain Villalvazo Laureano, Member, IEEE, Juan Miguel Gonzalez Member, IEEE, Claudio A. Canizares, Fellow, IEEE, Juan Manuel Ramirez Arredondo, Member, IEEE, and Julio Cesar Rosas Caro, Member, IEEE

Abstract—This paper analyzes and validates a mathematical model of Series Vectorial Compensator (SVeC) with purposes of both power flow and Transient Stability (TS) studies. The SVeC device is in the context of a Flexible AC Transmission System (FACTS) based on AC-AC converter able to operate into power grids as well as micro grids. TS models have been developed to reduce computational and analysis burdens when analysis of large interconnected power systems are required. Similarly the TS SVeC model need to be validated so it can be used on different computational toolboxes utilized on power systems analysis such the case of PSAT software. The SVeC TS model is first validated with the help of EMTDC/PSCAD-based on time domain simulations where the controller is detailed (DT) simulated embedded into a multimachine power system. Then the proposed TS model is implemented in PSAT software and compared with DT model, thus validating the proposed TS model. Furthermore, a system identification technique, i.e., Prony method, is applied to the time domain signals to attain significant electromechanical mode information comparing and validating both models, illustrating that SVeC TS model can yield too optimistic results indicating the closeness of the approximation.

Index Terms—FACTS, small-disturbance stability, oscillatory stability, system identification, modeling, damping controls.

I. ACRONYMS

PSCAD	Power System Computer Aided Design
PSAT	Power System Analysis Toolbox
DAE	Differential Algebraic Equation
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
ODE	Ordinary Differential Algebraic Equation
PWM	Pulse Width Modulation
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
SSSC	Series Static Synchronous Compensator
SIT	Series Injected Transformer

II. INTRODUCTION

IN recent years, there has been growing interest in the use of FACTS controllers in power transmission networks. The stability of power networks has been improved with the application of these controllers [1], [2]. Many studies have been carried out and reported in the literature on the use of existing FACTS controllers in variety applications to represent

the static and dynamic analysis [3]. The stability performance analysis of power system utilizes simplified models for power flow and transient stability studies; since their analysis presents significant computational challenges due to complexity and size. Therefore, simplified power flow and transient stability (TS) models are developed to decrease computational effort without effectiveness loss considering an appropriated integration time steps and smaller state matrices.

These 'reduced' models are the ones usually utilized in power system analysis toolbox packages; they are based on DAEs equations models, and have been frequently validated by comparison of time domain signals obtained from both simplified and detailed models. TS models for a series of FACTS controllers were validated by inspection of the time domain simulation results on [4]. An STATCOM TS model was validated from the point of view of their effect on the system electromechanical modes [7]. It is important to validate TS models from the point of view of their effect on the system electromechanical modes, since these models are considered important when FACTS controllers are used to enhance both large- and small-disturbance stability [5] [6].

Recently, new controllers based on ac-ac vectorial converters have been proposed, presenting some detail on the switching and electronic elements [8]- [13]. They are proposed for active power control, using a variable series capacitive reactance embedded in series with a transmission line. On the literature has been demonstrated that the SVeC is a competitive controller, with ability and capability for power flow control [], additionally exhibiting some advantages against conventional FACTS based on dc links, especially in maintenance, simpler control, cost and volume, and therefore may be a better alternative. Some studies of the SVeC's behavior on power system stability are presented in [14]- [16], based on a somewhat complex steady state and TS model approach for active power regulation.

The implementation of the SVeC DT models in a multi machine power system will show the real impact in the system. These models need small step integration to adequately simulate the semiconductors' switching and their responses have to match with the TS models to be used on power system stability software. Thus, it is clearly an evident validation requirement on the implementation and use between SVeC's DT and TS models. Hence, this paper concentrates on describing in detail the simulation of SVeC in a multi machine power system, compared with a better and simpler proposed stability model. The TS model validation is obtained by the EMTDC/PSCAD and PSAT programs, [17], [18] respectively. PSCAD software

This work is supported by SEPa Canadian Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) Strategic Grant.
Efrain Villalvazo and J.M. Gonzalez are with Universidad Tecnológica de Manzanillo, Colima, CP 28869, Mexico (email: juangol7906@hotmail.com).
Claudio Canizares is with University of Waterloo.
J.M. Ramirez is with CINVESTAV Guadalajara.
J.C. Rosas is with Universidad Panamericana Guadalajara).