

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”
ZACATENCO

**“SIMULACIÓN DEL LAZO DE CONTROL DE UN
COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARS USANDO UN
CONTROLADOR PID”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTA

**HERNÁNDEZ REYES OSCAR
LIRA RODRÍGUEZ LIBRADO JUAN
SÁNCHEZ MÉNDEZ GERARDO**

ASESORES

**ING. CASTILLO JIMÉNEZ JOSÉ ANTONIO
ING. GARCÍA LÓPEZ MANUEL**

CIUDAD DE MÉXICO, FEBRERO 2019



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN
DEBERA (N) DESARROLLAR

INGENIERO ELECTRICISTA
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
C. GERARDO SANCHEZ MENDEZ
C. LIBRADO JUAN LIRA RODRIGUEZ
C. OSCAR HERNANDEZ REYES

“SIMULACIÓN DEL LAZO DE CONTROL DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARS USANDO UN CONTROLADOR PID”

DISEÑAR Y SIMULAR EL MODELO DEL LAZO DE CONTROL DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARS PARA EL ABATIMIENTO DE TENSIÓN EN UN BUS INFINITO UTILIZANDO UN CONTROLADOR TIPO PID EN UN SISTEMA DE PRUEBA.

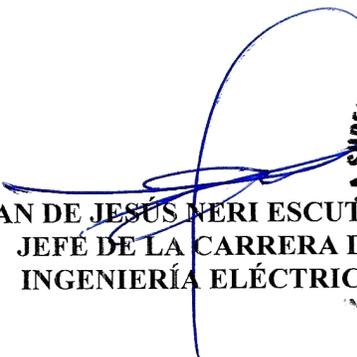
- ❖ INTRODUCCIÓN
- ❖ ANÁLISIS TEÓRICO
- ❖ SIMULACIÓN DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VARS
- ❖ ANÁLISIS ECONÓMICO

CIUDAD DE MÉXICO, A 18 DE FEBRERO DE 2019.

ASESORES


ING. JOSÉ ANTONIO
CASTILLO JIMÉNEZ


ING. MANUEL GARCÍA
LÓPEZ


ING. JUAN DE JESÚS NERI ESCUT
JEFÉ DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional
P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad los que suscriben **Oscar Hernández Reyes, Librado Juan Lira Rodríguez y Gerardo Sánchez Méndez**, manifestamos ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada **“Simulación del lazo de control de un compensador estático de vars usando un controlador PID”**, en adelante **“La Tesis”** y de la cual se adjunta copia, un impreso y un cd, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgamos a el **Instituto Politécnico Nacional**, en adelante **EI IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio **para apoyar futuros trabajos relacionados con el tema de “La Tesis”** por un periodo de **2 años** contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **EI IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior, **EI IPN** deberá reconocer en todo momento nuestra calidad de autor de **“La Tesis”**.

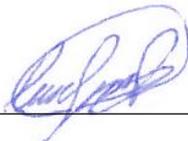
Adicionalmente, y en nuestra calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de **“La Tesis”**, manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de **“La Tesis”**, por lo que deslindamos de toda responsabilidad a **EI IPN** en caso de que el contenido de **“La Tesis”** o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumimos las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México., a 28 de Marzo de 2019.

Atentamente



**Oscar Hernández
Reyes**



**Librado Juan Lira
Rodríguez**



**Gerardo Sánchez
Méndez**

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A Dios.

Por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado salud para lograr nuestros objetivos, además de su infinita bondad y amor. Así como de darnos la paciencia necesaria para realizar esta tesis que aparte de estar llena de conocimientos tiene mucho sacrificio de parte de nosotros y de nuestros asesores.

A Nuestros padres.

Por habernos apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante en cada momento en que sentíamos que nos dábamos por vencidos y escuchar esas palabras de aliento para continuar siempre con el objetivo siempre buscando que seamos unas personas de bien, pero más que nada, por su amor incondicional y que no se compara con nada.

Que siempre serán nuestro ejemplo a seguir con perseverancia y constancia que nos han inculcado durante todo este tiempo para salir adelante y cumplir nuestros objetivos.

RESUMEN

“Simulación del lazo de control de un compensador estático de vars usando un controlador PID”

En México el sistema eléctrico de potencia está dividido por etapas por las que pasa la energía eléctrica que son desde la Generación, Transmisión, Distribución, Utilización y está compuesto por generadores, líneas de transmisión y subestaciones.

Durante el proceso de transmisión y distribución se pueden ocasionar diversas fallas ocasionadas por sobretensiones o caídas de tensión las cuales pueden ocasionar el mal funcionamiento de instrumentos de medición así como de transformadores.

Para evitar o reparar en caso de que ocurra esto se han desarrollado dispositivos que utilizan o trabajan mediante la electrónica de potencia como son los FACTS, de los cuales se mencionan y se estudia su funcionamiento en este trabajo.

El enfoque que se da es específicamente al Compensador Estático de vars (CEV) que es el encargado de entrar en funcionamiento después de que haya terminado de ocurrir la falla dentro del sistema y mediante inyección de potencia reactiva compensa los niveles de tensión.

Se realizaron pruebas en el simulador PSCAD para observar y conocer el funcionamiento y comportamiento del CEV en el sistema para después implementar el modelo matemático del controlador tipo PID y observar las ventajas y mejoras que se obtuvieron en el CEV.

Los resultados que se obtuvieron fueron que pudimos comparar e implementar el controlador tipo PID a un controlador ya existente que era el PI, mostramos mediante gráficas las ventajas y mejoras que obtuvimos.

ABSTRACT

"Simulation of the control loop of a static vars compensator using PID controller"

In Mexico, the power electric system is divided by stages through which the electric power passes, which are from Generation, Transmission, Distribution, Utilization and is composed of generators, transmission lines and substations. During the process of transmission and distribution can cause various failures caused by overvoltages or voltage drops which can cause the malfunction of measuring instruments and transformers.

To avoid or repair if this occurs, devices have been developed that use or work with power electronics such as the FACTS, of which they are mentioned and their operation is studied in this work.

The approach that is given is specifically to the Var Static Compensator (CEV) which is in charge of entering into operation after the fault has finished occurring within the system and by injection of reactive power compensates the voltage levels.

Tests were performed in the PSCAD simulator to observe and know the performance and behavior of the CEV in the system and then implement the mathematical model of the PID controller and observe the advantages and improvements that were obtained in the CEV.

The results that were obtained were that we could compare and implement the PID controller to an existing controller that was the PI, we showed by graphs the advantages and improvements that we obtained.

Contenido

Índice de figuras	IV
Indice de Tablas	VI
Abreviaturas	VII
Glosario	VIII
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivo	3
1.5 Estado del Arte.....	4
Capítulo 2 Análisis Teórico.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Antecedentes	7
2.3 Sistemas flexibles de transmisión de C.A. (FACTS)	8
2.3.1 Características de los dispositivos FACTS en un sistema de transmisión.....	9
2.3.2 Tipos de FACTS	11
2.3.2.1 FACTS Tipo A.....	11
2.3.2.2 FACTS Tipo B.....	12
2.3.2.3 FACTS Tipo C.....	14
2.4 Sistemas de control	14
2.4.1 Sistemas de control en lazo cerrado	15
2.4.2 Sistemas de control en lazo abierto	16
2.4.3 Diseño de los sistemas de control.....	16
2.5 Aplicación de los controladores a los FACTS.....	17
2.6 Elementos que intervienen en la conexión del CEV	18
2.7 Líneas de transmisión	18
2.7.1 Modelos de líneas	19
2.7.1.1 Modelo de línea corta	19
2.7.1.2 Modelo de línea media	24
2.7.1.3 Modelo de línea larga.....	26

2.7.2 Control del flujo de potencia en una línea de CA.....	27
2.8 Compensador Estático de VARS (CEV).....	29
2.8.1 Elementos del Compensador Estático de VARS (CEV)	32
2.8.1.1 Reactor Controlado por Tiristores (TCR)	33
2.8.1.2 Capacitores Conmutados por Tiristores (TSC).....	34
2.8.2 Aplicaciones del CEV	37
2.8.3 Configuración del CEV	37
2.8.4 Control de tensión mediante CEV	39
2.8.5 Corrección del factor de potencia mediante CEV	39
2.9 Controladores.....	40
2.9.1 Control proporcional	40
2.9.2 Control integral	43
2.9.3 Control proporcional integral (PI)	44
2.9.4 Control Proporcional integral Derivativo (PID)	46
2.9.5 Ajuste de las ganancias del controlador	48
2.9.6 Realimentación de velocidad	50
2.9.7 Compensación	53
2.9.8 Implantación de las leyes de control.....	54
Capítulo 3 Simulación del CEV con control tipo PID	60
3.1 Introducción.....	60
3.2 Descripción de la simulación del control PI del CEV en el software PSCAD.....	60
3.3 Calculo de las variables de sintonización K_p , K_d y K_i por el método de Ziegler-Nichols.	72
3.3.1 Respuesta al escalón (Lazo abierto).....	72
3.3.2 Fórmulas de Ziegler-Nichols para “respuesta al escalón” Para aplicar Ziegler-Nichols.....	73
3.3.3 Cálculo de las constantes.	75
Capítulo 4 Análisis Económico	78
4.1 Introducción.....	78
4.2 Alcances.....	78
4.4 Costos	78
4.7 Consideraciones Económicas en la Aplicación del CEV	79
4.8 Costos de los elementos del CEV.	80
4.8.1 Evaluación de las pérdidas económicas debido al uso de un Compensador Estático de VARS	82

4.9 Justificación Económica	83
Conclusiones.....	88
Referencias	90
Anexos	92

Índice de figuras

Capítulo 2	Página
Figura 2.1 FACTS controladores de flujo de potencia (activa y reactiva). (Narain G Hingorani, 2000).....	12
Figura 2.2 FACTS controladores de potencia activa (Narain G Hingorani, 2000)	13
Figura 2.3 FACTS controladores de reactivos.....	14
Figura 2.4 Diagrama del CEV en el simulador PSCAD.	18
Figura 2.5 Líneas de transmisión. (Jr.).....	19
Figura 2.6 Modelo de línea corta.....	20
Figura 2.7 Diagrama fasorial para una línea corta.	22
Figura 2.8 Representación para una carga con factor de potencia unitario.	23
Figura 2.9 Representación para una carga con factor de potencia en adelanto. (John J. Grainger)	23
Figura 2.10 Modelo de línea media.	24
Figura 2.11 Diagrama fasorial de una línea media.....	25
Figura 2.12 Modelo de una línea larga. (John J. Grainger).	27
Figura 2.13 Control de flujo de potencia de una línea de C.A. (Woodford)	28
Figura 2.14 Compensador Estático de VARS y su relación con otros dispositivos de compensación reactiva en un SEP (Adaptado de [CIGRE, 1986]).....	30
Figura 2.15 Dispositivos en derivación para compensación reactiva controlada (Adaptado de [CIGRE, 1986]).	31
Figura 2.16 Esquema simplificado de un CEV. (Narain G Hingorani, 2000)	32
Figura 2.17 Reactor controlado por tiristor, b) Control de ángulo de disparo, c) Formas de onda de operación. (Narain G Hingorani, 2000).....	33
Figura 2.18 Configuración de un TCR.....	34
Figura 2.19 a)Configuración básica del capacitor conmutado por tiristores (TSC), b) Formas de onda (Narain G Hingorani, 2000).	35
Figura 2.20 Configuración de un TSC.	36
Figura 2.21 Esquema equivalente de un TSC.....	36
Figura 2.22 Composición por fase de un CEV. (Narain G Hingorani, 2000)	37
Figura 2.23 Evolución de la Potencia reactiva generada por un CEV formado por un TSC y un TCR.....	38
Figura 2.24 Control proporcional.	41
Figura 2.25 Sistema con control proporcional.	42
Figura 2.26 Sistema con control proporcional. (bolton)	42
Figura 2.27 Control proporcional integral.	44
Figura 2.28 Control PID. (bolton).....	47
Figura 2.29 Curva de reacción de proceso.	48
Figura 2.30 Sistema con realimentación de velocidad y posición. (bolton)	51
Figura 2.31 El efecto de la realimentación de velocidad: a)sin, b)con realimentación de velocidad.	53

Figura 2.32 Amplificador operacional en configuración inversora.	55
Figura 2.33 Controlador proporcional.	56
Figura 2.34 Controlador integral.	57
Figura 2.35 Controlador PI.	58
Figura 2.36 Controlador derivativo.	59

Capítulo 3

Página

Figura 3.1 Esquematización de un CEV de la conexión eléctrica del CEV y del sistema de control con la línea. (Woodford)	61
Figura 3.2 Diagrama eléctrico de la línea de transmisión en paralelo con la falla provocada.....	62
Figura 3. 3 Lectura del comportamiento de la tensión: antes, durante y después de la falla.....	62
Figura 3.4 Gráfica de los valores de salida del sistema de control para controlar la planta. (Woodford).....	63
Figura 3.5 Entrada del lazo de control del controlador PI.....	64
Figura 3.6 Conexión de los filtros pasa altos y pasa bandas.....	65
Figura 3. 7 Monitoreo de la señal antes y después de entrar al filtro con el fin de eliminar armónicos.	65
Figura 3.8 Entrada del controlador PI.....	66
Figura 3.9 Accionamiento del TCR/TSC con las salidas en los tres escalones principales.	67
Figura 3.10 Valores del CEV en el Simulador PSCAD.....	68
Figura 3. 11 valores de las Potencias del TSC/TCR en MVA.	69
Figura 3.12 Voltaje del Modelo 1 del simulador PSCAD.	70
Figura 3.13 valores del CEV en el simulador PSCAD.	71
Figura 3.14 valores del CEV en el simulador PSCAD.	71
Figura 3.15 Curva utilizada para la Sintonización. (R. Mohan Mathur)	73
<i>Figura 3. 16 Esquema de la obtención de las variables para el cálculo de la sintonización.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3. 17 ajuste de sintonización por el método de ziegler-nichols.</i>	<i>77</i>

Capítulo 4

Página

Figura 4.1 Costos de los Elementos del CEV. (IEEE, 1996)	81
Figura 4. 2 Costo en Pérdidas.....	83
Figura 4. 3 Activación de los dos bancos de capacitores.....	84
Figura 4. 4 Activación de un solo banco de capacitores con controlador PID.....	85
Figura 4. 5 Comparación de tiempo de restablecimiento de los controles PID contra PI.....	86

Indice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de los dispositivos FACTS.....	11
Tabla 2 Criterios de Ziegler y Nichols para la curva de reacción del proceso.	49
Tabla 3 Criterios de Ziegler y Nichols para la última ganancia.....	50
Tabla 4 Costo de equipo para un CEV	79

Abreviaturas

C.A: Corriente Alterna

C.C: Corriente Continua

VAR: Volts Amperes Reactivos

SEP: Sistema Eléctrico de potencia.

FACTS por sus siglas en inglés: Sistema Flexible de Transmisión de C.A

CEV: Compensador Estático de VAR

TCR por sus siglas en inglés: Reactor controlado por tiristores

TSC por sus siglas en inglés: Capacitor conmutado por tiristores

PI: Proporcional Integral

PID: Proporcional Integral Derivativo

Glosario

R: Resistencia

L: Inductancia

C: Capacitancia

Z: Impedancia

V: Voltaje

I: Corriente

F: Frecuencia

P: Potencia activa

Q: Potencia reactiva

X: Reactancia

Θ : Posición angular

ω : Velocidad angular

\underline{X} : Vector de estado del sistema

\underline{X}_{t_0} : Punto de operación inicial

[A] y [B]: Matrices se obtienen de los modelos dinámicos individuales de los diferentes elementos del SEP.

L: Longitud de la línea

F.P.: Factor de Potencia

I_e : Corriente de emisión

I_r : Corriente de recepción

G: Conductancia

K_{se} : Cantidad en por unidad de potencia

X_c : Reactancia en serie

e : señal de error

Kp: Ganancia proporcional

Gp: Función de transferencia

Ki: Ganancia integral

Kd: Ganancia derivativa

Kv: Ganancia de realimentación

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción

El Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) está compuesto básicamente por Generadores, Líneas de Transmisión y Subestaciones Eléctricas de Potencia, estas últimas tienen un papel muy importante ya que son los nodos de recepción y envío de gran cantidad de energía la cual es regulada y distribuida en algunos casos a grandes distancias. Esto debido a la problemática crecimiento exponencial, la complejidad de la interconexión de la red y los requerimientos de confiabilidad, se hace necesario lograr transmitir la energía con las menores pérdidas y al mismo tiempo mejorar la estabilidad en líneas de gran longitud, para así utilizar el sistema a su mayor capacidad.

Una de las alternativas más importantes es el desarrollo de dispositivos que emplean la electrónica de potencia para respaldar las variables del sistema a nivel de la red, conocidos como Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS, por sus siglas en inglés: "Flexible AC Transmission Systems"). Los FACTS tienen toda la capacidad para apoyar al SEP ante cualquier perturbación. El CEV es un elemento de la familia FACTS que puede ser utilizado para la regulación de tensión y mejora de la estabilidad de los nodos adyacentes.

El propósito de este trabajo es de analizar el comportamiento de un CEV ante una falla con el tipo del controlador tipo Proporcional Integral (PI) propuesto en el simulador PSCAD y realizar una implementación al controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), ya que este tipo de controlador es más eficiente y ayuda a que el CEV tenga un tiempo de respuesta más corto ante una falla, esto para reestablecer el sistema.

1.2. Planteamiento del problema

Transmitir potencia eléctrica desde los centros de generación a los centros de consumo es un problema complejo. Esto ha llevado a desarrollar investigaciones e implementar acciones que permiten reducir el problema del envío de energía eléctrica. Una consecuencia de estas implementaciones en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) es la experimentación de una gran variedad de fallas las cuales son excitadas de maneras diversas. Particularmente las fallas por abatimientos de tensión en los nodos débiles o de interconexión son un problema grave que justifica la instalación de dispositivos que permitan respaldar el nivel de tensión ante cualquier perturbación en el sistema.

Dentro del sistema eléctrico de potencia siempre se corre el peligro que se presenten sobretensiones de cualquier tipo; Las más comunes son descargas atmosféricas, conmutación en las líneas, entrada y salida de carga en el sistema, sobrecarga.

Estas sobretensiones pueden alcanzar hasta el 1.8 veces del valor por unidad de la tensión nominal, esto pone en peligro a muchos elementos del sistema tal como el transformador, los aislamientos y los equipos de medición; por lo que, es importante reducirlas, para esto es requerido una inyección de potencia reactiva al sistema en forma de corriente.

Como ya es bien sabido, los efectos capacitivos en estos tipos de circuitos transitorios se oponen a los cambios bruscos de tensión por lo que al detectarlos lo regresará casi a su nivel de referencia.

Ante esta problemática se propone el uso de dispositivos FACTS en el sistema eléctrico de potencia; ésta tesis implementará el lazo de control de un compensador estático de VARS eficiente y funcional; con ayuda de la electrónica de potencia y apoyándonos en un software se simulará el lazo de control de este CEV.

En México sólo se han instalado 26 compensadores estáticos de VARS, esto no es suficiente para abatir los cambios bruscos de tensión en las líneas ya que hay muchos dispositivos que aún están desprotegidos , lo que se propone es implementar un nuevo sistema de control para instalarlo en un punto débil (nodo de cambio de tensión),se probara primero en un sistema generador-compensador-falla-carga; esto nos dará pauta para instalarlo en un punto específico de los propuestos (cerro gordo, Texcoco, Topilejo, san Bernabé, Teotihuacán, La paz).

(Ruiz, 2017)

1.3. Justificación

Con la realización de este proyecto se obtendrá un sistema de control del CEV mucho más efectivo, confiable, flexible y más manejable en comparación con otros controladores.

Los sistemas FACTS otorgan al sistema eléctrico de potencia una mayor confiabilidad, hacen a este sistema más eficiente en cuanto a flujos de potencia, estabilidad en las líneas de transmisión, una mayor cargabilidad en el sistema, una pérdida menor de potencia activa, una flexibilidad mucho mayor y una seguridad para personal, usuarios e instrumentos que integran el sistema.

El compensador estático de VARS es un elemento perteneciente a la familia de los dispositivos FACTS que por sus características es el dispositivo más utilizado en México para garantizar una estabilidad de tensión en las líneas de transmisión, para garantizar el buen funcionamiento del compensador hay que tener un control muy preciso sobre la forma de accionamiento de los tiristores que son los encargados de la inyección de la energía reactiva hacia las líneas.

El control PID (Proporcional Integral Derivativo) es un tipo de controlador más eficiente por sus características de operación, ya que lo que nosotros pretendemos es un mejor funcionamiento del CEV con este tipo de control y dar a conocer las ventajas de éste controlador.

1.4. Objetivo

Diseñar y simular el modelo del lazo de control de un compensador estático de VARS para el abatimiento de tensión en un bus infinito utilizando un controlador tipo PID en un sistema de prueba.

1.5 Estado del Arte

En 1992 Murtaza Farsadi, Farzad Mohammadzadeh Shahir y Ebrahim Babaei miembros estudiantes de IEEE realizaron su artículo “Aplicando Redes Neuronales Recurrentes al Compensador Estático de VAR’s” en el cual mencionan que utilizar neuronas recurrentes redes (RNN) para controlar y ajustar la conmutación de tiristor en un Compensador Estático de VAR’s (CEV) para ajustar el voltaje. En el nuevo esquema de control, en lugar de simplemente usar un bus de retroalimentación, al igual que la red neuronal varios bus de retroalimentación recurrente convencional se emplean. En la propuesta modelo de controlador RNN proporciona una muestra de los conectados en el sistema, y su salida proporciona parte de la entrada para el RNN controlador, luego envía las señales de control al sistema CEV. Se seleccionaron tres tipos de modos no lineales para probar nueva operación del sistema de control para regulación de voltaje en IEEE. La prueba consiste en una falla del sistema de energía trifásica que abre una de las líneas de transmisión en un twotrack de transición en el sistema y de repente cambia la demanda de carga. Los resultados muestran que el sistema de control propuesto es capaz de ajustar el voltaje en el rango deseado. (Murtaza Farsadi1)

Posteriormente en el año de 1993 Klaus Bergmann, Keith Stump y William H. Elliott realizaron un artículo en el cual describen los resultados obtenidos. Un compensador estático de VAR’s, se instaló en la Subestación Eddy County cerca de Artesia, Nuevo México. Esta se puso en funcionamiento comercial en abril de 1992. Antes del período de puesta en marcha, una fase de pruebas exhaustivas y se llevó a cabo el análisis del control digital de circuito cerrado. Este trabajo se realizó utilizando el hardware de control real y software en conjunto con un TNA analógico y con digital modelos de simulación de control y sistemas de potencia. Los resultados de este trabajo fueron verificados con el sistema de potencia durante el campo puesta en servicio del CEV. Este artículo ofrece una visión general del diseño de control de lazo cerrado. Presenta algunos resultados de las pruebas TNA, simulación digital y puesta en marcha pruebas de campo de la operación CEV. (Murtaza Farsadi1)

Después de un gran periodo de tiempo en el que los controladores de los CEV no fueran investigados tan a fondo, Yeong-Chan Chang del departamento de ingeniería eléctrica de la universidad de Taiwán escribió en el año 2013 el artículo “Robusto control basado en redes neuronales de un compensador estático de VAR’s”. Este estudio aborda el problema de diseñar un control de estabilización robusto para una gran clase de máquina única incierta sistemas de energía eléctrica de bus infinito con compensador estático VAR’s (CEV). Esta clase de sistemas puede ser perturbada por la planta incertidumbres, perturbaciones no modeladas y disturbios externos. Una retroalimentación dinámica adaptativa basada en redes neuronales. (Rehtanz-B, 2006)

El controlador se desarrolla de manera que todos los estados y señales del sistema de circuito cerrado estén acotados y el error de estabilización se puede hacer lo más

pequeño posible. Los sistemas de aproximación de red neuronal adaptativa están diseñados para aprender los comportamientos de las funciones desconocidas, y a su vez se propone un procedimiento modificado tal que el número de la base de la red neural las funciones se pueden reducir significativamente. En consecuencia, el esquema de control robusto inteligente desarrollado aquí posee las propiedades de simplicidad computacional y fácil implementación desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas.

Más recientemente en el 2015 Bhavin J Shah, G N Pillai y Pramod Agarwal del departamento de ingeniería eléctrica del Instituto Indio de Tecnología realizaron el artículo llamado “Técnica de modelado de bucle basado en el diseño de control robusto del controlador CEV para la amortiguación de las oscilaciones de potencia considerando la señal global”. Este documento presenta un robusto diseño de controlador para la amortiguación de las oscilaciones de modo entre áreas en tres sistemas de prueba usando señal global. La señal de estabilización es obtenida a partir de unidades de medida fasorial (PMU) ubicadas en todas las áreas del sistema de energía de prueba. El análisis de residuos es llevado a cabo para decidir las mejores señales de control para la amortiguación.

El documento “Control Inteligente del Condensador Fijo Controlado por Tiristores Reactor para la mejora de la calidad energética” escrito por Mohammed Ali Khan, K.V. Satya Bharath, Sachin Mishra y Amit Kumar Singh proporciona una revisión exhaustiva sobre el uso de CEV junto con técnicas inteligentes.

Con altas cargas inductivas como la máquina y el uso del arco siendo utilizado en industrias, la variación del factor de potencia y mantener un equilibrio constante entre activo y reactivo

el poder es un gran desafío. El documento trata sobre el poder mejora de la calidad mediante el uso del compensador FC-TCR y para verificar los filtros de efectividad que son esenciales para eliminando los armónicos son diseñados y simulados usando MATLAB. Para la implementación en línea de potencia trifásica modelo CEV fue diseñado. Para probar la función con respecto al funcionamiento de CEV y algoritmo de control propuesto.

Es mencionado y descrito de manera más específica el controlador PI en el artículo “Tensión del generador de inducción autoexcitado trifásico acoplado turbina de viento al esquema de regulación con el compensador de estático controlado por el controlador PI” escrito por Tarek Abed, Osamu Noro, Kazuya Matsuo, Yuji Shindo y Mutsuo Nakaoka de la universidad de Yamaguchi en Japón explica un circuito cerrado de retroalimentación controlado por PI.

El esquema de regulación de tensión del rotor trifásico de jaula de ardilla como generador de inducción autoexcitado la fuerza motriz de velocidad variable como una turbina eólica es diseñado sobre la base del compensador estático de VAR's.

El artículo “Control del Compensador Estático de VAR (CEV) con regulación de voltaje CC y dinámica rápida” de los autores Feedforward y Feedback Loop. Proponen un

nuevo método de control del compensador estático de VAR's (CEV) con inversor de tres niveles para controlar potencia reactiva con dinámica rápida mientras se mantiene el voltaje del condensador del lado de CC constante. En primer lugar, utilizando el circuito DQ-transformación en general y se obtiene un modelo simple de CEV con inversor de tres niveles, y se llevan a cabo análisis de CC y CA para caracterizar el bus abierto en el sistema. En función de la matriz de función de transferencia del sistema, el control de índice de modulación para compensación de potencia reactiva y fase control de ángulo para la regulación de voltaje del lado de CC. (Juanjuan Wang, Abril 2008)

Capítulo 2 Análisis Teórico

2.1 Introducción

En este capítulo se habla acerca de los dispositivos FACTS, líneas de transmisión, CEV y los tipos de control, todo esto se hace con el objetivo de conocer acerca de estos elementos que es necesario, se hace una descripción detallada de cada uno de estos elementos mencionados anteriormente como lo son: sus características, su operación y aplicaciones. Se describe el controlador PI y posteriormente el PID ya que en el siguiente capítulo se hará la implementación del controlador PID al controlador PI en el CEV.

2.2 Antecedentes

Desde el momento en que la demanda de energía eléctrica aumentó en el sistema eléctrico nacional, la necesidad de mantenerlo estable y confiable incrementó, lo que representa tratar de transmitir la misma cantidad de energía que se genera, ya que en la transmisión y distribución de la energía eléctrica se producen pérdidas de potencia reactiva debido a la inductancia en serie de los transformadores, líneas aéreas y cables subterráneos. Las líneas y cables también producen potencia reactiva debido a su capacitancia en paralelo; no obstante, ésta generación de potencia reactiva solo cobra importancia a elevadas tensiones del sistema.

En los primeros sistemas de energía eléctrica de corriente alterna no se empleaban dispositivos de compensación reactiva especiales, debido a que los generadores se encontraban a cortas distancias de la carga. Al extenderse más las redes, se utilizaron motores síncronos, pequeños compensadores síncronos y capacitores estáticos en paralelo para la corrección del factor de potencia. Pasaron entonces a instalarse compensadores síncronos cada vez de mayor capacidad en los sistemas de transmisión. Junto con el desarrollo de capacitores más eficaces y económicos, se ha producido un aumento fundamental en el empleo de capacitores en paralelo para proveer potencia reactiva, particularmente en los sistemas de distribución. (ABB Power Systems, 1999)

Con la introducción de las líneas de extra alta tensión cobró importancia el empleo de reactores en paralelo y capacitores en serie como dispositivos de compensación.

Los primeros sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna que se desarrollaron fueron los compensadores estáticos de VAR's (CEV), que utilizan tiristores para formar componentes como el capacitor o el inductor controlado por tiristores. Los modelos de estos elementos comenzaron a desarrollarse a mediados de

1970 y un resumen de ellos se presentó en el reporte CIGRE . Uno de los pioneros que propuso el uso de los sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna fue Hingorani, cuando por primera vez en 1970 presentó la idea de aplicar la electrónica de potencia a la compensación en sistemas de potencia. A partir de entonces, varias investigaciones condujeron a la aplicación de varios semiconductores de alta potencia a sistemas de transmisión. Así el compensador estático de VAR's usando interruptores en estado sólido y dispositivos conectados en derivación eran propuestos en aplicaciones de sistemas de transmisión en corriente alterna. Fue hasta 1988, cuando Hingorani definió el concepto de FACTS y describió también los amplios prospectos que se llegarían a tener en su aplicación. Actualmente la tecnología FACTS está en operación en varios países del mundo. En tanto que, se han hecho y se siguen haciendo investigaciones hoy en día con respecto a los FACTS. (Jr.)

2.3 Sistemas flexibles de transmisión de C.A. (FACTS)

Los sistemas FACTS tienen un papel muy importante hoy en día dentro de las líneas de transmisión ya que permite transferir mayor potencia en los sistemas de transmisión de potencia que a la fecha tiene restricciones por capacidad física de la línea de transmisión, estos sistemas llamados FACTS tienen la capacidad de manejar las potencias activa (Watts) y reactiva (Var) y así poder transportarlas mediante el sistema de transmisión, todo esto tiene una ventaja muy importante que es el reducir los costos en el suministro de la energía eléctrica, lo que hoy en día tiene un gran auge pues la sociedad demanda que se disminuyan los costos de energía eléctrica además de poder recibir energía de calidad. (Narain G Hingorani, 2000).

Los FACTS ofrecen muchas ventajas al ser colocados en una línea de transmisión como por ejemplo la mencionada en el párrafo anterior que es la de permitir transportar mayor potencia y de manera más sencilla lo que conlleva a que se pueden reducir las reservas de generación, además no sólo eso sino también poder tener un mayor control de esta y permiten cargar las líneas de transmisión a niveles cercanos a sus límites térmicos.

Los dispositivos FACTS nos demuestran ser eficientes para elevar o minimizar el amortiguamiento de algunos modos de oscilación que pueden variar dependiendo de algunas condiciones de operación. De otra manera y gracias a que muchos sistemas FACTS se pueden colocar en el sistema de transmisión, para lograr que se desempeñen de mejor manera, se requiere que estén integrados y coordinados centralmente, con el fin de prevenir interacciones no esperadas entre las operaciones de control diversas áreas del SEP. También es importante tomar en cuenta el que estos sistemas provocan ciertos cambios en los modelos matemáticos ya que en

épocas pasadas no se incluían estos dispositivos, lo que tiene como consecuencia que a la hora de estudiar y analizar los sistemas de potencia se producen modificaciones. (Narain G Hingorani, 2000).

Si bien es importante mencionar que existen demasiados dispositivos FACTS que se pueden colocar en un Sistema Eléctrico de Potencia, pero en este trabajo solamente se mencionan algunos de ellos, pues el trabajo solo se centra en un dispositivo que es el CEV que se estudiara y se le harán diversas pruebas para observar su comportamiento ante una falla. En la actualidad se hace un tanto difícil el poder tener acceso a un software que permita diferenciar las opciones de operación que afectan la dinámica del SEP ya que estos software son difíciles de conseguir ya que tienen muy elevado para las instituciones o que también son exclusivos de alguna empresa y no se cuenta con el acceso. (Narain G Hingorani, 2000).

Los dispositivos FACTS se han ayudado de manera muy pronunciada gracias a que la electrónica de potencia ha tenido una gran evolución, ya que se hace menos costoso en cuanto a producción así como también en capacidad, para así pasar a manejar el control de los flujos de potencia, ya que anteriormente este control se realizaba mediante la regulación de tensión mediante transformadores desfasadores o con cambiador de taps, y la compensación reactiva se ha realizado mediante conexión y desconexión de bancos de reactores o capacitores. (Rehtanz-B, 2006).

2.3.1 Características de los dispositivos FACTS en un sistema de transmisión

Como se sabe los FACTS tienen influencia en el control del flujo de potencia, a continuación se presentan algunas de las características que estos dispositivos pueden proporcionar al sistema en el que son colocados.

En cuanto a flujos de potencia son capaces de proporcionar un control rápido y continuo debido a que controlan los voltajes en los nodos críticos en un sistema de transmisión o controlando el ángulo de fase al final de las líneas.

Aumentan la transferencia de potencia en los sistemas de transmisión aumentando la cargabilidad de las líneas de transmisión a niveles cercanos a los límites térmicos, disminuyendo así el costo del suministro de potencia a grandes cantidades de usuarios.

Tiene la capacidad de disminuir las oscilaciones que pueden causar daños en equipos y/o disminuir la capacidad de transmisión de potencia eléctrica. Debido a esto pueden aplicarse en el manejo de la congestión e incremento de la estabilidad.

Permiten al sistema eléctrico aumentar la capacidad de transmisión de potencia eléctrica entre áreas controladas haciéndose que los márgenes de generación de reserva disminuyan de 18% a 15%.

Pueden prevenir los apagones en cascada al evitar los efectos de fallas y de equipos dañados.

Disminuyen las pérdidas de potencia activa, disminuyen costos de producción de energía y cumplimiento de requerimientos contractuales mediante el control de los flujos de potencia en la red.

Los dispositivos FACTS que con ayuda de los tiristores que forman parte de la dinámica de estos en cuanto a su velocidad de respuesta permiten trabajar sobre los flujos de potencia y así resolver los problemas de inestabilidad en el SEP. Es importante hablar sobre la evolución de los FACTS así como es indispensable saber seleccionar un dispositivo que sea adecuado de acuerdo a los requerimientos del sistema pues todo depende de las características de operación de este y del problema que se quiera resolver para así no cometer un error a la hora de la selección y así perder en cuanto la parte económica mayormente.

Con el paso del tiempo los dispositivos semiconductores han demostrado que cuentan poderosas características en cuanto a capacidad de potencia, tamaño y relación costo-beneficio, debido a esto son parte esencial de los FACTS.

Los tiristores son en la actualidad los dispositivos más eficientes en cuanto a aplicaciones de potencia se trata, ya que cuentan con la propiedad de trabajar con tensiones mayores a 10 Kv y corrientes mayores a 5KA. También existen dispositivos llamados GTO, que son capaces de ofrecer ventajas adicionales para interrumpir la corriente, lo cual permite el uso de convertidores de conmutación forzada, característica que hace más eficientes a los FACTS. Los dispositivos IGBT utilizan potencias de capacidad menor a la de potencia como lo son las redes de media y baja tensión, estos dispositivos se utilizan para el mejoramiento de la calidad de la potencia en los niveles de tensión mencionados anteriormente pues cuenta con una respuesta rápida, ya que permiten el switcheo con frecuencias en un rango que va de los 3KHz a los 10KHz. (Rehtanz-B, 2006).

Aunque el objetivo del trabajo no recae en el estudio de los FACTS y su inserción al SEP es importante tener en cuenta que es posible realizar simplificaciones circuitales al momento en que se analiza el impacto de un dispositivo FACTS en los flujos de potencia en un sistema. Estas simplificaciones suponen la operación adecuada del equipo FACTS como un todo, y no requieren detallar las dinámicas de un tiristor en la operación de un FACTS inserto en un SEP (Narain G Hingorani, 2000).

Pero cabe destacar que el dispositivo FACTS que es utilizado en este trabajo como lo es el CEV utiliza tiristores para hacer las pruebas que se tienen contempladas.

2.3.2 Tipos de FACTS

La variedad de dispositivos FACTS, puede ser dividida en tres categorías según el parámetro controlado como se muestra en la tabla 1 (Jiménez, Agosto 2003) .

Tabla 1 Clasificación de los dispositivos FACTS

TIPO	Parámetro controlado	Dispositivo FACTS
A	P y Q Serie	UPFC
B	P Serie	TCSC, reguladores de fase
C	Q shunt	CEV, STATCOM

2.3.2.1 FACTS Tipo A

Estos dispositivos tienen la capacidad de controlar el flujo de potencia activa y reactiva (P_{ij} y Q_{ij}) en la línea de transmisión como se muestra en la figura 2.1. El ángulo de fase de la barra y la magnitud del voltaje no aparecen especificados y son independientes del estado de flujo de potencia bajo estudio. Los FACTS de este tipo son modelados como se muestra en la siguiente figura. En este modelo una barra es introducida (i') para forzar un consumo equivalente a la potencia deseada que fluye sobre la línea. Los principales defectos del modelo es que ignora pérdidas en el dispositivo, además que el UPFC actuales no controlan P y Q de la manera modelada y son capaces de mejorar otros parámetros como el voltaje de barra. (Jiménez, Agosto 2003)

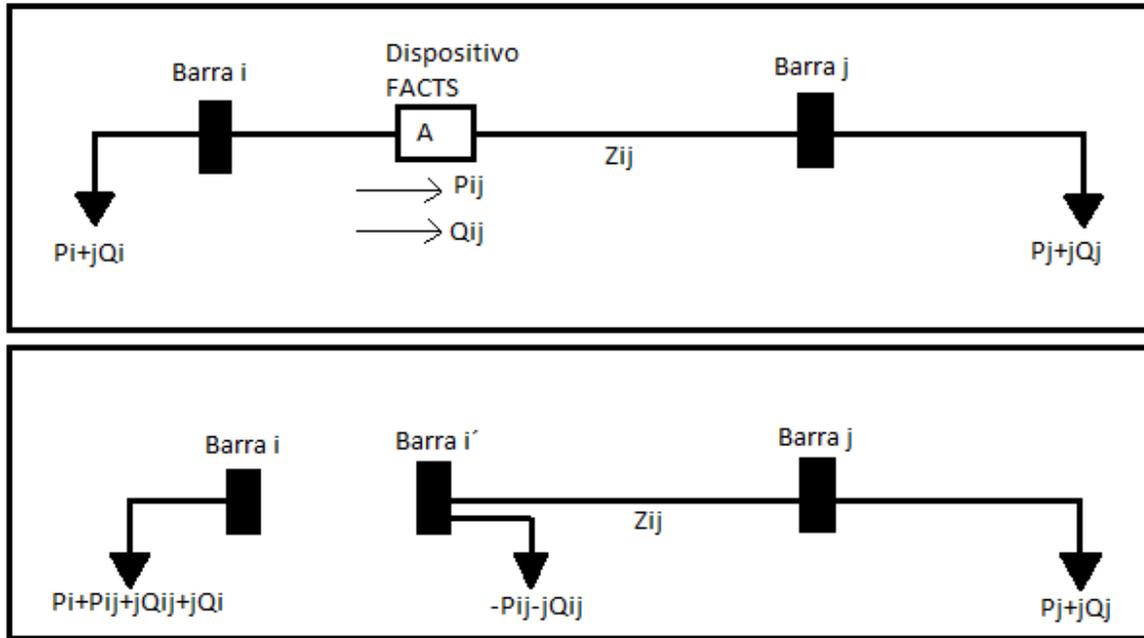


Figura 2.1 FACTS controladores de flujo de potencia (activa y reactiva). (Narain G Hingorani, 2000).

2.3.2.2 FACTS Tipo B

En este tipo de dispositivos, solamente la potencia activa de la línea es controlada (P_{ij}) como se muestra en la figura 2.2. El modelo utilizado se muestra en la siguiente figura, donde el flujo de potencia activa se modela usando una barra ficticia i' de manera similar al caso de los dispositivos tipo A no se consideran las pérdidas en el dispositivo, y el control de otros voltajes, corrientes e impedancias del circuito. (Jiménez, Agosto 2003)

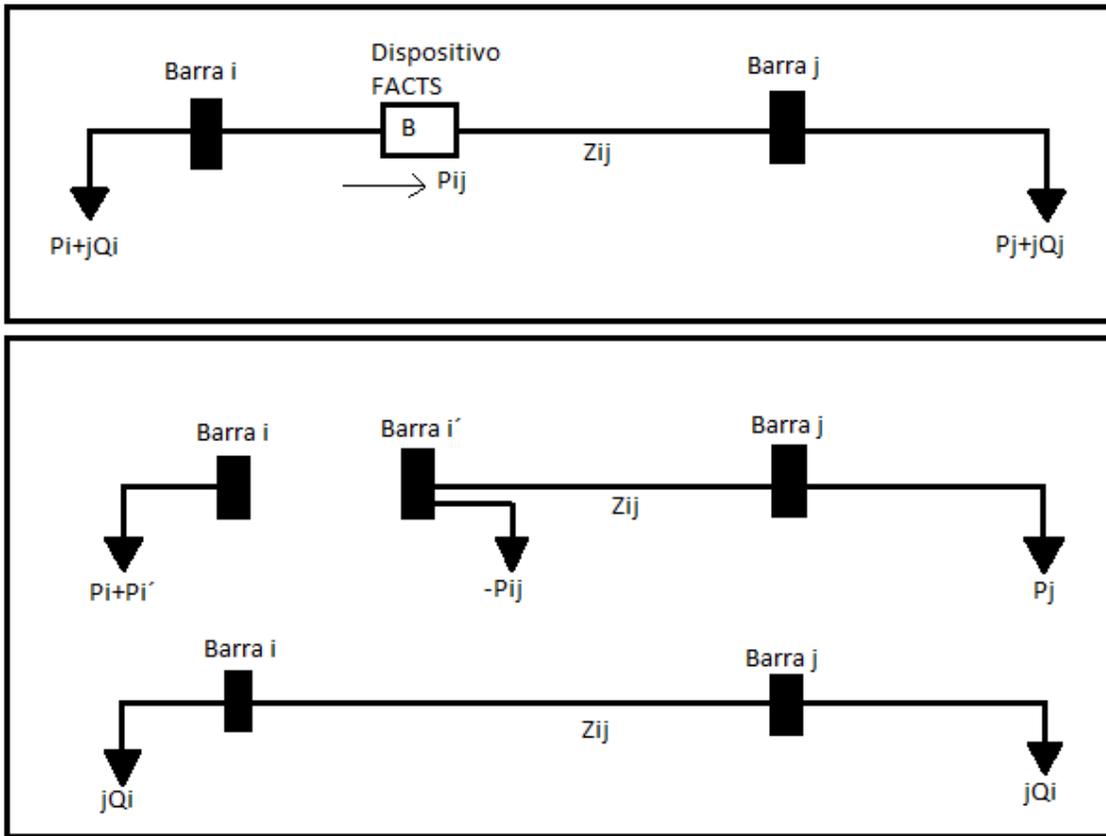


Figura 2.2 FACTS controladores de potencia activa (Narain G Hingorani, 2000)

2.3.2.3 FACTS Tipo C

Estos dispositivos FACTS son controladores de reactivos en la barra y se asume que el dispositivo ajusta la inyección de potencia reactiva para controlar la magnitud del voltaje en dicha barra. En la figura 2.3 se señala el dispositivo y el modelo, en el cual no son tomadas en cuenta las pérdidas en el dispositivo. En este modelo la barra i es una barra P_v con $P=0$. Estos dispositivos son utilizados principalmente en aplicaciones de estabilidad del sistema. (Jiménez, Agosto 2003)

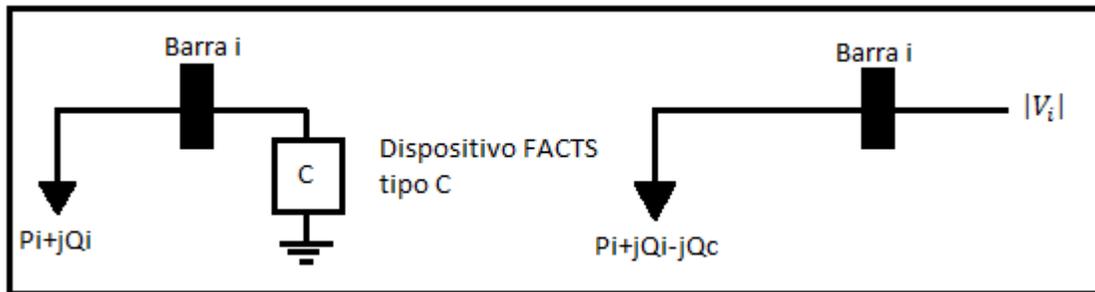


Figura 2.3 FACTS controladores de reactivos.

2.4 Sistemas de control

Antes de analizar los sistemas de control, deben definirse ciertos términos básicos, para poder entender los sistemas de control que en este caso se estudiarán el tipo PI y PID que se mencionan en los siguientes capítulos, pues el control es parte importante en la operación del CEV ya que este es el encargado de hacer que el CEV entre en función mandando las señales.

Variable Controlada: Es la variable que afecta directamente al sistema, y puede ser una condición o cantidad que se debe mantener estable en el sistema para evitar cambios que alteren las condiciones de este.

Variable Manipulada: La variable manipulada afecta el valor de la variable controlada y es la que se modifica con la finalidad de obtener un valor más exacto.

Plantas: Una planta puede ser vista como una parte de un equipo, un objeto físico que va a ser controlado para ejecutar una acción específica.

Procesos: El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinados. Una definición más sencilla y entendible puede ser que un proceso es un conjunto de pasos que tienen como finalidad llegar a un resultado propuesto inicialmente.

Perturbaciones: Es una señal que perjudica al sistema en cuanto a su salida. Hay dos tipos de perturbaciones, las que ocurren dentro del sistema son llamadas internas y las que ocurren fuera del sistema son llamadas externas.

Control Realimentado: El control realimentado consiste en mantener una relación entre la salida y alguna entrada de referencia, haciendo una comparación, utilizando la diferencia como medio de control ya que muchas veces la salida se ve afectada por perturbaciones. (Ogata)

2.4.1 Sistemas de control en lazo cerrado

Los sistemas de control en lazo cerrado son también llamados sistema de control realimentado. El control realimentado consiste en controlar la salida que a su vez es comparada con una señal de referencia. Se alimenta al controlador la señal de error (diferencia entre señal de realimentación y señal de entrada). Esto se hace con la finalidad de tener un error lo más pequeño posible para que la salida tenga un resultado conveniente. Este tipo de control se utiliza en procesos que requieren precisión y por eso se está comparando la salida con la entrada para tener un error lo más mínimo posible.

2.4.2 Sistemas de control en lazo abierto

Los sistemas de control de lazo abierto son aquellos que no cuentan con realimentación, es decir que la salida no afecta la acción del control. En este caso la salida no es medida ni se realimenta para compararla con la entrada, ósea que el error puede ser más grande que en el control en lazo cerrado. Este tipo de control se utiliza en procesos que no requieren de tanta precisión y que aún así cumplen con su función.

2.4.3 Diseño de los sistemas de control

El diseño de los sistemas de control es complejo y la institución encargada de estos debe contar con personal capacitado ya que por lo general no son lineales. Aunque existen modelos matemáticos lineales con los que es posible aproximarlos, dependiendo del tipo de sistema de control que se vaya a utilizar es posible elegir un modelo que sea acorde con este. En un sentido práctico, las especificaciones de desempeño determinadas para el sistema particular sugieren cuál método usar. Si se presentan las especificaciones de desempeño en términos de las características de respuesta transitoria y/o las medidas de desempeño en el dominio de la frecuencia, no tenemos otra opción que usar un enfoque convencional basado en los métodos del lugar geométrico de las raíces y/o la respuesta en frecuencia

Si bien es sabido los sistemas de control, han ido evolucionando con el paso del tiempo y a su vez se hacen más precisos pero al mismo tiempo se vuelven más complejos a la hora de ser analizados y es importante tener conocimiento sobre estos. Un diseñador experimentado será capaz de diseñar un sistema aceptable sin realizar muchas pruebas.

Aunque el diseño de los sistemas de control es un tema que se encuentra escrito en este trabajo, es importante señalar que la finalidad de este no es la de diseñar uno sino aplicar un control ya diseñado y bien establecido al CEV para así saber cómo funciona éste y porque es apropiado elegirlo, que ventajas y desventajas tiene en cuanto a funcionamiento, costos, equipo, tamaño, etc. para poder tener una justificación con bases del porque se eligió este y no otro tipo, aunque también es importante tener una idea de lo que es el diseño de un sistema de control. (Ogata)

2.5 Aplicación de los controladores a los FACTS

Desde el momento en que se comenzaron automatizar los procesos y surgió el control tuvo un gran impacto en la industria y en la ciencia ya que en parte gracias al control estos dos han tenido una marcada evolución que va desarrollándose con el paso del tiempo y que cada vez está siendo más preciso, confiable y eficiente.

Es importante argumentar que el control facilita muchos procesos y hace las cosas más prácticas y sencillas, aunque no hay que olvidar que aun así siempre se necesita de la mano del hombre. El control automático tiene presencia en toda la industria, a continuación se muestran algunos trabajos que se han hecho. Aunque en este trabajo está enfocado específicamente a los FACTS, es importante saber cómo ha evolucionado el control y en que procesos ha sido utilizado.

El primer trabajo significativo en control automático fue el regulador de velocidad centrífugo de James Watt para el control de la velocidad de una máquina de vapor, en el siglo XVIII. Minorsky, Hazen y Nyquist, entre muchos otros, aportaron trabajos importantes en las etapas iniciales del desarrollo de la teoría de control. En 1922, Minorsky trabajó en los controladores automáticos para dirigir embarcaciones, y mostro que la estabilidad puede determinarse a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. En 1932, Nyquist diseñó un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de sistemas en lazo cerrado, con base en la respuesta en lazo abierto en estado estable cuando la entrada aplicada es una senoidal. En 1934, Hazen, quien introdujo el término servomecanismos para los sistemas de control de posición, analizó el diseño de los servomecanismos con relevadores, capaces de seguir con precisión una entrada cambiante. Es así como se comenzó a implementar el control automático, existen otros acontecimientos más en la historia pero es importante señalar que estos son los que marcaron el inicio del control. (Padiyar)

En este trabajo se hace el cambio de un controlador tipo PI a un controlador tipo PID, aunque no se menciona ninguno de estos en la historia de la evolución es importante dar a conocer que se van a utilizar ya que posteriormente se habla de ellos.

2.6 Elementos que intervienen en la conexión del CEV

Los elementos que intervienen en la conexión de un CEV de manera general como lo son: La línea de transmisión, el CEV, el control del CEV, dichos elementos se muestran en la figura 2.4.

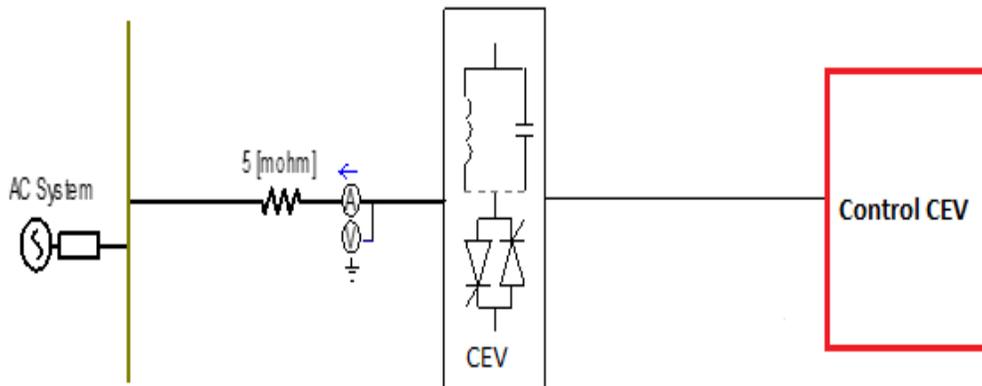


Figura 2.4 Diagrama del CEV en el simulador PSCAD.

2.7 Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión funcionan normalmente con cargas trifásicas equilibradas, aunque la disposición de los conductores no sea simétrica o tengan transposición. La línea de transmisión de energía es un circuito de constantes distribuidas, tiene resistencias, inductancias capacitancias y conductancias que se encuentran distribuidas a lo largo de toda su longitud como se muestra en la figura 2.5.

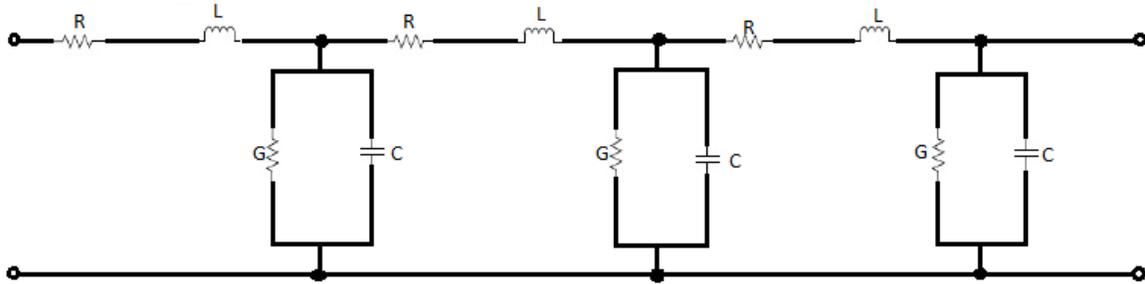


Figura 2.5 Líneas de transmisión. (Jr.)

En base a esto, es necesario desarrollar un modelo matemático que represente el comportamiento de la línea de transmisión aérea de corriente alterna. Este modelo se caracteriza por cuatro parámetros principales:

- Resistencia serie
- Inductancia serie
- Conductancia en derivación
- Capacitancia en derivación

2.7.1 Modelos de líneas

El modelo de líneas es usado para calcular los voltajes, corrientes y flujos de potencias.

Una línea de transmisión es considerada como: línea corta, línea media, línea larga y muy larga según la longitud de la línea.

- Líneas cortas si su longitud es menor a 80 km.
- Líneas medias si su longitud está entre 80-250 km.
- Líneas largas si su longitud es mayor a 250 km.
- Líneas muy largas si su longitud es mayor a 360 km.

2.7.1.1 Modelo de línea corta

Se puede transmitir hasta 1.5 veces la potencia nominal. Cuando la línea es clasificada como corta, la capacitancia en derivación es tan pequeña que se puede omitir por completo, con una pérdida pequeña y sólo se requiere considerar la resistencia “R” y la inductancia “L” en serie para la longitud total de la línea.

El modelo de la línea corta, es representado por una impedancia serie como se muestra en la figura 2.6. La impedancia total de la línea, es obtenida multiplicando la impedancia serie por la longitud de la línea como se indica en la ecuación 2.1 la cual se encuentra en el dominio de la frecuencia y la ecuación 2.2 es el resultado de la multiplicación en la ecuación 2.1 y se encuentra representada de forma imaginaria.

$$Z = (r + j\omega L)l \quad (2.1)$$

$$Z = R + jX \quad (2.2)$$

Donde:

Z es la Impedancia total en serie

r es la Resistencia de fase por unidad de longitud.

L es la Inductancia de fase por unidad de longitud.

l es la Longitud de la línea

R es la Resistencia total de la línea

X es la Reactancia total de la línea

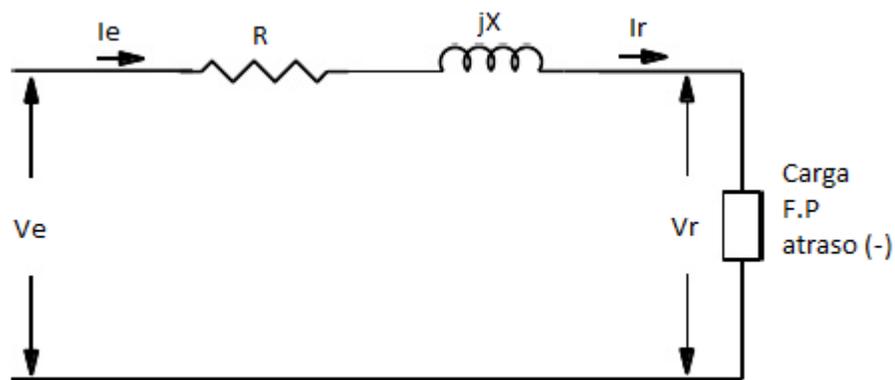


Figura 2.6 Modelo de línea corta.

V_e, I_e : Voltaje y corriente de fase en la barra de emisión.

V_r, I_r : Voltaje y corriente de fase en la barra de recepción.

F.P.: Factor de potencia ($\cos \theta$)

La ecuación de voltaje de emisión está dada por:

$$V_e = V_r + (Z)(I_r) \quad (2.3)$$

En un circuito de impedancia serie, la corriente de emisión es igual a la corriente de recepción:

$$I_e = I_r \quad (2.4)$$

El análisis vectorial se realiza de la siguiente manera:

Para el circuito de la figura 2.7 teniendo la carga con un factor de potencia en atraso (-) se realiza el diagrama fasorial siguiente: ($V_p=V_e$ y $I_p=I_e$)

- 1) Para carga con factor de potencia en atraso

$$\vec{V}_p = \vec{V}_R \cos\theta + \vec{I}_p \cdot R + (V_R \cdot \text{sen}\theta + \vec{I}_R X_L) \quad (2.6)$$

$$V_p = \sqrt{(V_R \cos\theta + I_R \cdot R)^2 + (V_R \cdot \text{sen}\theta + I_R \cdot X_L)^2} \quad (2.7)$$

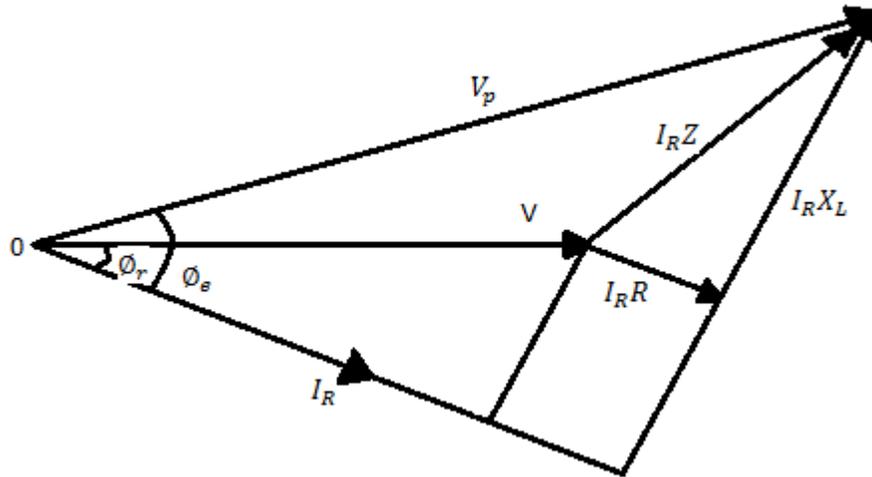


Figura 2.7 Diagrama fasorial para una línea corta.

- 1) Para carga con factor de potencia unitario que se muestra en la figura 2.8.

$$\vec{V}_P = \vec{V}_R + \vec{I}_R \cdot R + j\vec{I}_R \cdot X_L \quad (2.8)$$

$$V_P = \sqrt{(V_R + I_R \cdot R)^2 + (I_R X_L)^2} \quad (2.9)$$

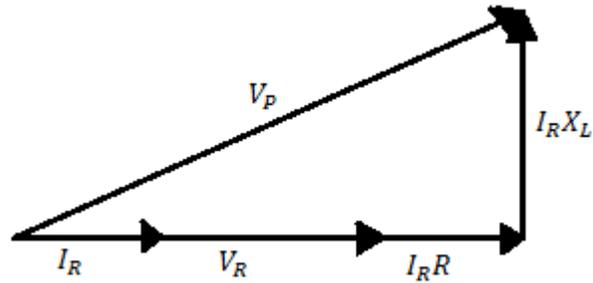


Figura 2.8 Representación para una carga con factor de potencia unitario.

- 2) Para carga con factor de potencia adelantado se muestra en la figura 2.9. Esto significa que la corriente se adelanta con respecto a la tensión y como ya sabemos esto disminuye las pérdidas en las líneas y esto reduce la caída de tensión.

$$\vec{V}_P = \vec{V}_R \cos\theta + I_R \cdot R + j(V_R \cdot \text{sen}\theta - \vec{I}_R X_L) \quad (2.10)$$

En esta ecuación se representa la fórmula para la tensión que está conformada por una parte real y otra imaginaria tomando en cuenta el ángulo de la carga.

$$|V_P| = \sqrt{(V_R \cdot \cos\theta + I_R \cdot R)^2 + (V_R \cdot \text{sen}\theta - I_R \cdot X_L)^2} \quad (2.11)$$

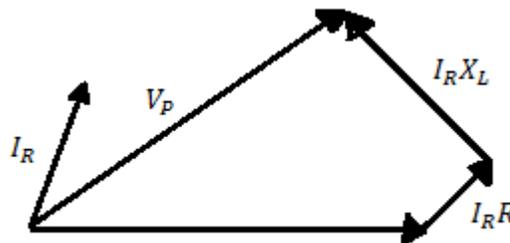


Figura 2.9 Representación para una carga con factor de potencia en adelanto. (John J. Grainger)

2.7.1.2 Modelo de línea media

Este tipo de línea de transmisión tiene entre 80 y 240 km de longitud y puede transmitir hasta 1.2 hasta la potencia. Las corrientes que circulan en la capacitancia shunt o admitancia shunt no son despreciadas, como se muestra en la figura 2.10.

En los cálculos de una línea de longitud media se incluye la admitancia paralelo (capacitancia pura). Si se divide en dos partes iguales la admitancia paralelo total de la línea y cada una se coloca en los extremos generador y receptor se obtiene el llamado circuito nominal π . Este modelo se utiliza para distancias no muy largas.

Una línea de longitud media se puede representar con los parámetros R y L, considerando que para los cálculos de líneas de transmisión media por lo general se incluye la capacitancia pura como se mencionó en el anterior párrafo, así, si toda la admitancia se supone almacenada en un punto medio del circuito que representa a la línea, se dice que es un circuito T nominal, pero si la admitancia se supone dividida en dos partes iguales en los extremos de la línea se dice que el circuito es π nominal.

(Stevenson)

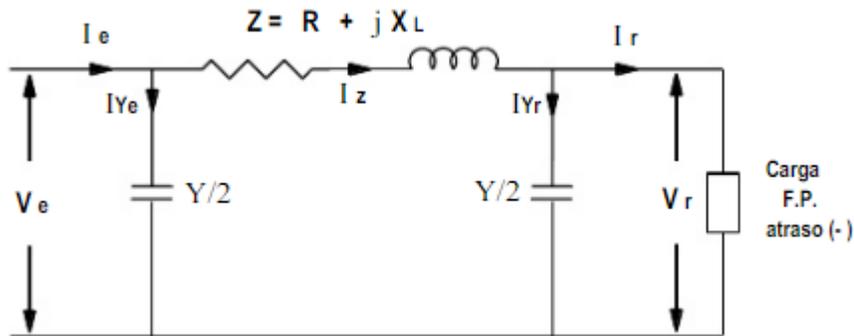


Figura 2.10 Modelo de línea media.

La admitancia shunt está expresado por la siguiente ecuación:

$$Y = (g + j\omega C)l \tag{2.12}$$

Donde:

g es la Conductancia

C es la Capacitancia de la línea al neutro

l es la Longitud de la línea

Bajo condiciones normales, la conductancia shunt por unidad de longitud, representa la corriente que se dispersa sobre los aisladores, la cual es despreciable. También son llamadas pérdidas despreciables.

$$g=0 \tag{2.13}$$

La ecuación de la admitancia shunt, para línea media queda expresada:

$$Y = (j\omega C)l \tag{2.14}$$

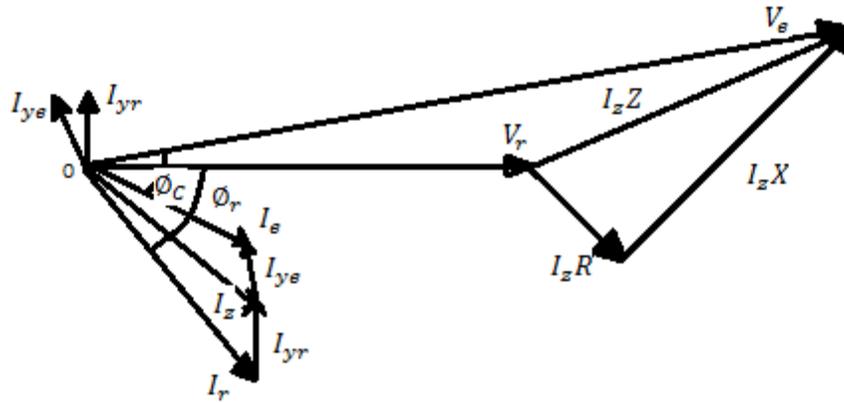


Figura 2.11 Diagrama fasorial de una línea media.

En el diagrama fasorial que se muestra en la figura 2.11, la corriente I_{Yr} hace que el voltaje de recepción V_r se adelante en 90° y la corriente I_{Ye} adelanta al voltaje de emisión V_e en 90° . La corriente I_z es el vector de la suma de las corrientes I_r y I_{Yr} , mientras que la corriente I_e es el vector suma de las corrientes I_z y I_{Ye} .

La corriente sobre la admitancia, en lado de recepción es expresada como:

$$I_{Yr} = \frac{Y}{2} V_r \tag{2.15}$$

La corriente sobre la impedancia de la línea está representada por:

$$I_z = I_r + I_{Yr} \tag{2.16}$$

$$I_Z = I_r + \frac{Y}{2} V_r \quad (2.17)$$

El voltaje de emisión está expresado como:

$$V_e = V_r + I_Z \cdot Z \quad (2.18)$$

$$V_e = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_r + Z \cdot I_r \quad (2.19)$$

La corriente en la admitancia, en el lado de emisión, está expresada como:

$$I_{Ye} = \frac{Y}{2} V_e$$

$$I_{Ye} = \left[\left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_e + Z I_r \right] \frac{Y}{2} \quad (2.20)$$

La corriente de emisión está dada por:

$$I_e = I_Z + I_{Ye} \quad (2.21)$$

$$I_e = Y \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) V_r + \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) I_r \quad (2.22)$$

2.7.1.3 Modelo de línea larga

Este tipo de línea de transmisión tiene una longitud mayor a los 250 km. La discrepancia entre el circuito nominal π y la línea se hace mayor conforme la longitud de la línea se incrementa. Sin embargo, es posible encontrar el circuito equivalente de una línea de transmisión larga y a ésta representarla con mayor precisión mediante una red de parámetros concentrados. Cuando se requiere una mejor representación para una

línea de transmisión larga, se necesita de una solución más exacta, debido a que se debe considerar la longitud que vaya en aumento de la línea.

En éstos modelos de línea larga, la impedancia y admitancia shunt son consideradas uniformemente distribuidas a lo largo de toda la línea de extremo a extremo como se muestra en la figura 2.12.

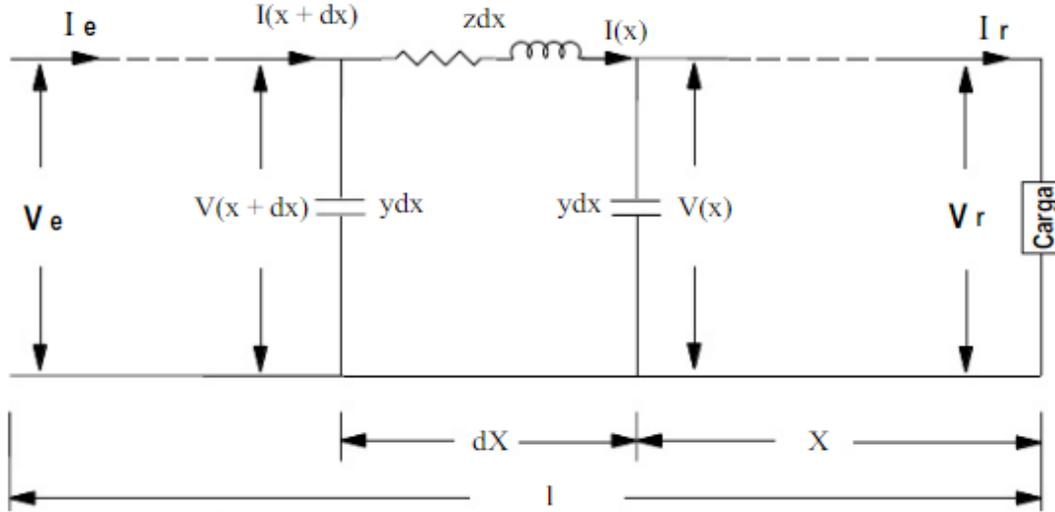


Figura 2.12 Modelo de una línea larga. (John J. Grainger).

2.7.2 Control del flujo de potencia en una línea de CA

El control que se tiene sobre el flujo de potencia en una línea de transmisión de CA, que se muestra en la figura 2.13, debe ser activado cuando en el sistema se encuentre disturbios de cualquier tipo, la potencia reactiva más común a inyectar al sistema es la capacitiva ya que esta potencia ayuda al sistema a restablecer su estabilidad y su seguridad. La estabilidad del sistema puede estar afectada por una variación en la frecuencia a la que trabaje el sistema eléctrico de potencia, a la oscilación de potencia transmitida del rotor a la línea, pérdida del sincronismo en los elementos eléctricamente conectados y por colapsos en la tensión por transitorios de cualquier tipo.

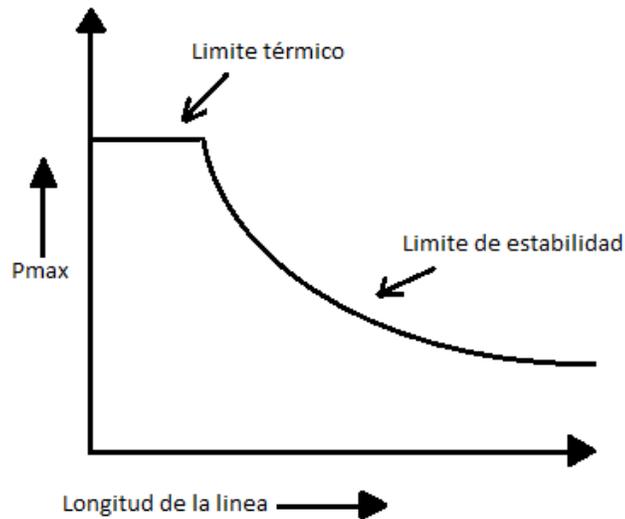


Figura 2.13 Control de flujo de potencia de una línea de C.A. (Woodford)

La compensación serie se lleva a cabo conectando al sistema capacitores en serie con el fin de incrementar la capacidad de transferencia máxima de potencia, al conectar capacitores al sistema se hace una inyección de energía reactiva capacitiva en forma de corriente que puede ser calculado por el modelo siguiente.

$$X_c = x(1 - K_{se}) \quad (2.23)$$

Donde:

K_{se} es la cantidad en por unidad de potencia necesaria para compensar el sistema

X_c es la reactancia en serie necesaria para compensar

x es la reactancia de la línea

Cabe decir que el factor K_{se} está severamente afectado por el parámetro de la resistencia propia del conductor usado en la transmisión de energía por lo que este factor nunca excede el valor de 0.7.

La principal razón para usar una compensación serie de capacitores es que tienen la habilidad de incrementar la tensión del sistema en un tiempo muy reducido, pero para lograr esto se requiere de un control muy preciso, por lo que lo más viable es el uso de tiristores de gran potencia.

El tema del control de inyección de potencia en el sistema eléctrico de potencia es parcialmente nuevo ya que tiene no más de 15 años de su desarrollo. El uso del control de los reactores conmutado por tiristores (TCR) es un control en paralelo que también inyecta potencia reactiva pero inductiva en este caso ayuda a mitigar el problema que se tiene en las líneas de resonancia subsíncrona (SSR), La causante de que en el sistema exista una inestabilidad torsional. (Woodford)

2.8 Compensador Estático de VARS (CEV)

Por años, los dispositivos compensadores han sido manejados por diversos nombres, por ejemplo; generadores estáticos de VAR's (SVG "Static var Generators" en inglés), compensadores estáticos de VAR's (SVC "Static var Compensators" en inglés), compensadores estáticos, y sistema estático de VARS (SVS "Static var Systems" en inglés). Sin embargo, el CIGRE y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), acordaron establecer las siguientes definiciones para asegurar una mayor consistencia.

Un generador estático de VAR's (SVG "Static var Generator" en inglés) es un dispositivo eléctrico estático, un sistema, o un equipo que es capaz de manejar o controlar una corriente capacitiva o inductiva de un sistema eléctrico de potencia, por tanto generando o absorbiendo potencia reactiva. Un compensador estático de VAR's o CEV, es un dispositivo estático generador y/o absorbedor de potencia reactiva conectado en derivación, el cual su salida es variada para mantener o controlar parámetros específicos de un sistema eléctrico de potencia.

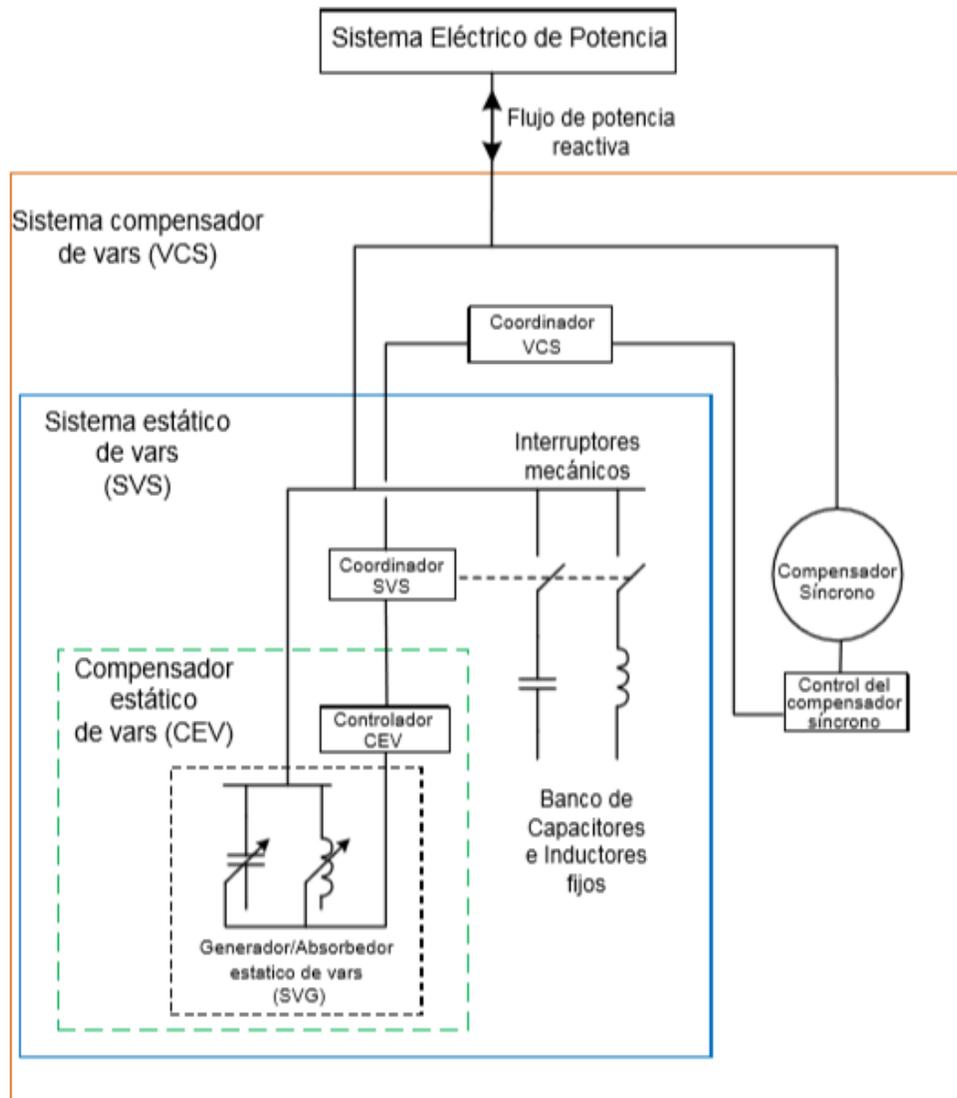


Figura 2.14 Compensador Estático de VARS y su relación con otros dispositivos de compensación reactiva en un SEP (Adaptado de [CIGRE, 1986]).

Un generador estático de VARS es una parte integral de un CEV. Por lo tanto un sistema estático de VARS SVS (“Static var System”, en inglés), es una combinación de diferentes compensadores de VAR’s estáticos y mecánicos, cuyas salidas son coordinadas. Un sistema de compensación de VAR’s VCS (“Var Compensator System” en inglés), es una combinación de sistemas estáticos de VAR’s y compensadores de VAR’s por rotación en los cuales sus salidas también son coordinadas (R. Mohan Mathur). Todo lo explicado anteriormente se resume de la mejor manera por medio de la Figura 2.14.

Para entender aún más la diferencia entre cada uno de los conceptos vistos anteriormente y en vista de que nuestro interés está enfocado en los compensadores estáticos de VAR's, procedemos a establecer la siguiente lista de características generales que se le atribuyen a los compensadores estáticos de VAR's:

1. Un CEV no tiene componentes móviles o en rotación.
2. Tiempo de control de respuesta muy rápido.
3. Puede mantener un control de forma individual en cada fase.
4. Perdidas reducidas.
5. No genera armónicas, a excepción del reactor controlado por tiristores (TCR).
6. Es conectado en derivación.
7. Altamente rentables.

Como vemos, de las características principales que distingue al CEV contiene puntos a favor y en contra, sin embargo por ahora solo se mencionan y en los capítulos posteriores se entrará más en detalle. Por el momento solo queda como una presentación de estos dispositivos para poder ubicarlo el CEV dentro de un sistema de potencia y así mismo conocer sus diferencias con respecto a otros compensadores.

La compensación reactiva controlada en un sistema eléctrico de potencia es conseguida con una variedad de dispositivos en derivación (Narain G Hingorani, 2000) como se muestra en la figura 2.15.

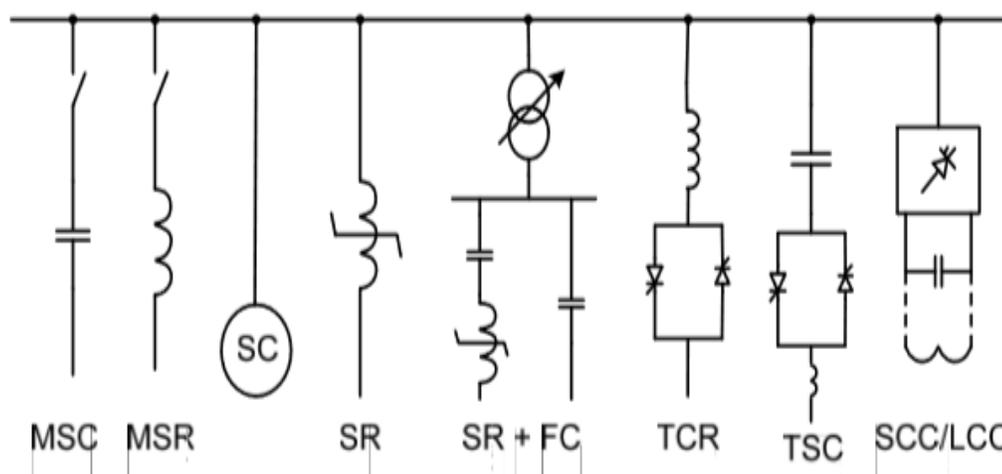


Figura 2.15 Dispositivos en derivación para compensación reactiva controlada (Adaptado de [CIGRE, 1986]).

- Condensadores síncronos
- Compensadores estáticos de VAR's, con:

1. Gradual, control activo, capacitores y reactores con interruptores mecánicamente (MSC y MSR)
2. Control inherente: reactores saturados (SR)
3. Control activo continuo: reactor controlado por tiristor (TCR), convertidores de línea conmutada (SCC o LCC)
4. Control activo discontinuo: capacitor conmutado por tiristor (TSC) o reactores con interruptor tiristor (TSR)

Estos dispositivos pueden ser utilizados por separado o en conjunto con algún otro, varios de ellos son solo empleados para una compensación constante o con una variación muy lenta (MSC, MSR, etc.), mientras que los otros tienen la particularidad de variar la potencia reactiva de forma rápida (TCR, TSC, etc.) En la práctica, un compensador estático de VARS está formado por TCR, TSC en conjunto con uno o varios de los dispositivos anteriores como son capacitores, reactores, etc. (Rehtanz-B, 2006)

2.8.1 Elementos del Compensador Estático de VARS (CEV)

Los elementos más característicos de un Compensador estático de VAR's (CEV) son los capacitores conmutados por tiristores por sus siglas en inglés (TSC) y los reactores conmutados (TSR) o controlados (TCR) por tiristores, estos dispositivos son los principales elementos de la electrónica de potencia. En la figura 2.16 se muestra un esquema simplificado para un CEV donde se incluyen los elementos anteriormente mencionados.

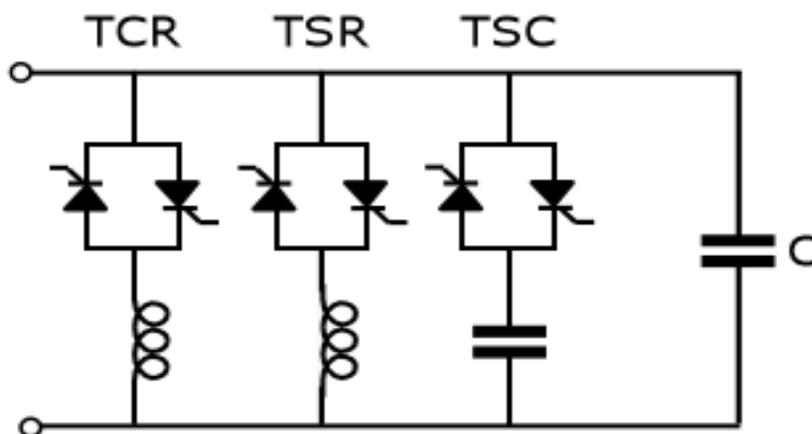


Figura 2.16 Esquema simplificado de un CEV. (Narain G Hingorani, 2000)

2.8.1.1 Reactor Controlado por Tiristores (TCR)

En el TCR el valor efectivo de la inductancia puede cambiar con la variación del ángulo de disparo en los tiristores. En la figura 2.17 se muestra la variación de la componente fundamental de la corriente en función del ángulo de disparo. Considerando que el voltaje en los terminales del TCR es constante, la variación de la corriente se puede interpretar como una variación de la reactancia y por lo tanto como una variación de la inductancia efectiva del reactor. Debido a la carga no lineal que representa el TCR para el sistema, se generan armónicos de corrientes que se requieren filtrar. El valor de la susceptancia efectiva del reactor, $B_L(\alpha)$, en función del valor del ángulo de disparo (α) de los tiristores se puede calcular por la expresión (Narain G Hingorani, 2000):

$$B_L(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \text{sen}2\alpha \right) = \frac{I_{LF}(\alpha)}{V} \quad (2.24)$$

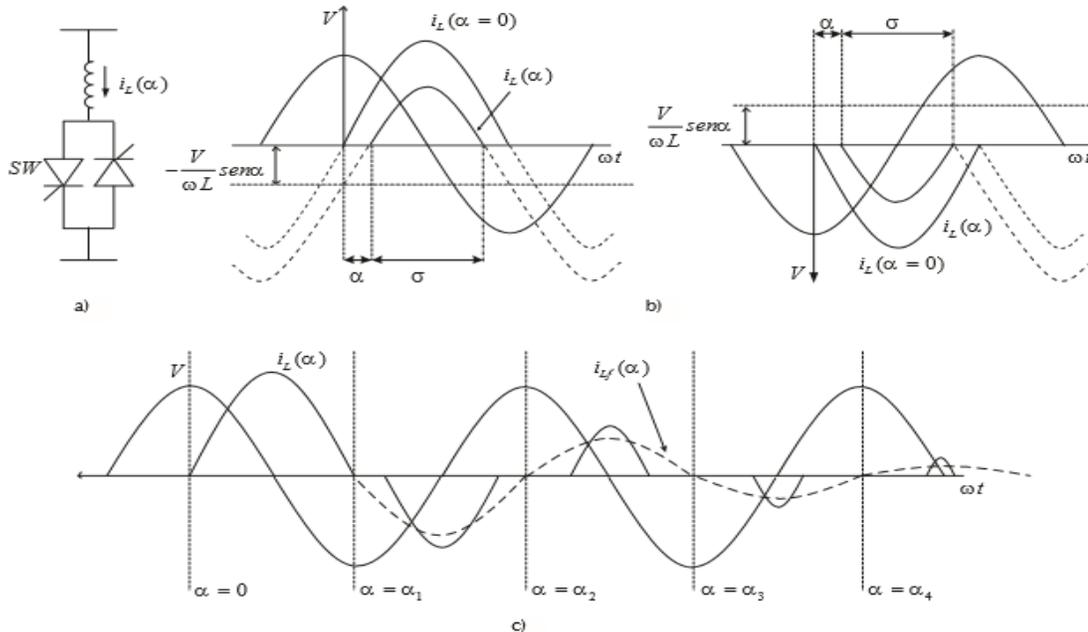


Figura 2.17 Reactor controlado por tiristor, b) Control de ángulo de disparo, c) Formas de onda de operación. (Narain G Hingorani, 2000).

El esquema de un TCR como se muestra en la figura 2.18 está formado por una bobina ($R+L$) y un convertidor CA/CA compuesto por dos tiristores de manera antiparalelo.

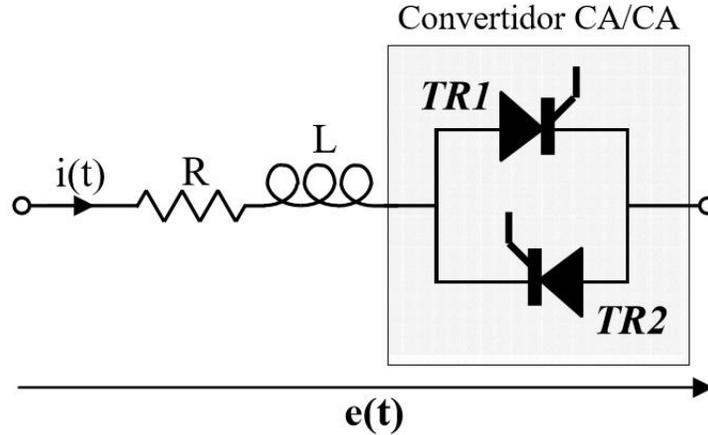


Figura 2.18 Configuración de un TCR.

En este caso, a la electrónica de potencia se le aplica un control de fase, de forma que se regula el valor eficaz de la corriente que circula a través de la reactancia.

Si en vez de realizar un control de fase, los tiristores se emplean como si fuesen un interruptor estático, la configuración recibe el nombre del reactor conmutado por tiristores o por sus siglas en inglés thyristor swiched reactor (TSR). Para minimizar los transitorios (fallas y perturbaciones) de desconexión el instante más favorable sería cuando la tensión de alimentación alcance su nivel máximo o mínimo. Otra alternativa podría ser la de utilizar los tiristores para controlar la intensidad de una batería de condensadores, no obstante, el aplicar el control de fase sobre capacidades ocasionaría fuertes corrientes de conexión que tendrían que soportar los propios tiristores, además de la dificultad que esto originaría en el control.

2.8.1.2 Capacitores Conmutados por Tiristores (TSC)

La variación de la capacitancia en el CEV se realiza conectando y desconectando capacitores con un mínimo de transitorios electromagnéticos. La conexión y desconexión se realiza utilizando interruptores electrónicos formados por una configuración bidireccional de dos tiristores de igual forma a como se tiene en el TCR, pero con la diferencia de que en el TSC la configuración de los dos tiristores trabaja como interruptor y en el TCR como regulador, debido a que en el TSC los tiristores realizan la función de un interruptor bidireccional, es decir, conectan y desconectan los capacitores en un determinado momento con el mismo valor de la capacitancia, sin embargo, en el TCR se controla el valor del ángulo de disparo para variar el valor de

la inductancia efectiva del reactor y por lo tanto controlar la cantidad de reactivo que consume. En la figura 2.19 se muestra un TSC monofásico que consiste en un capacitor, una válvula bidireccional de tiristores y un pequeño reactor limitador de corriente. En condiciones de estado estacionario, cuando la válvula de tiristores entra en conducción, el capacitor es conectado a la fuente de voltaje de CA (Narain G Hingorani, 2000), donde $v = V \sin \omega t$ y la corriente de la rama es:

$$i(\omega t) = V \frac{m^2}{m^2 - 1} \omega C \cos(\omega t) \quad (2.25)$$

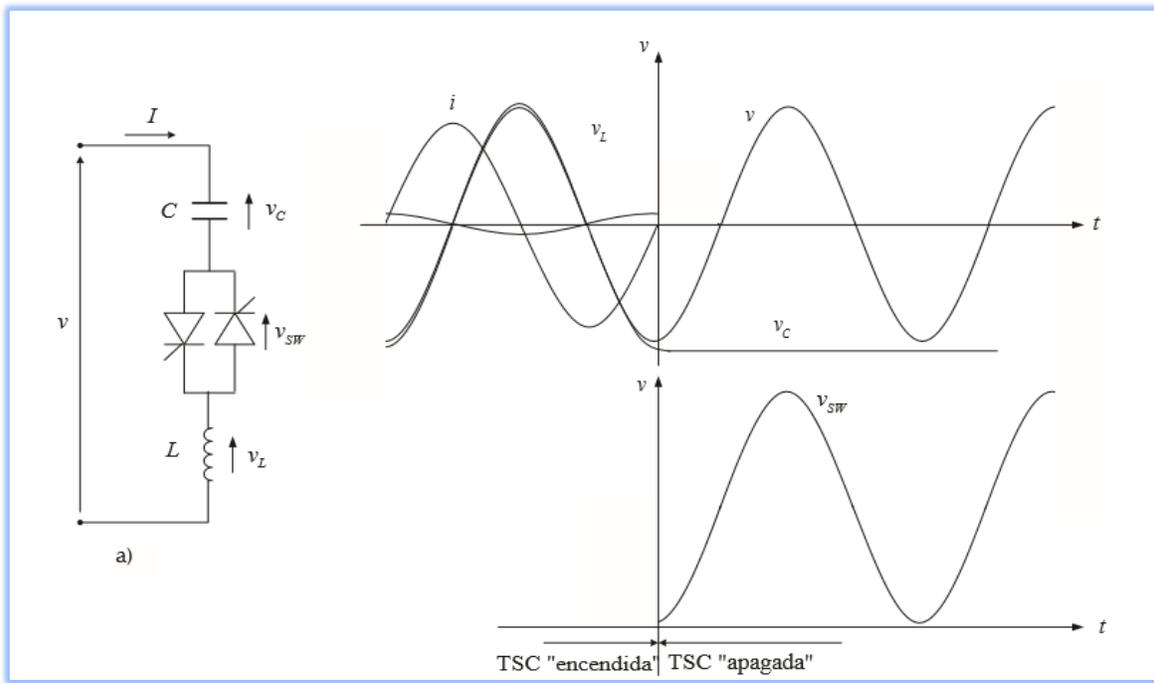


Figura 2.19 a) Configuración básica del capacitor conmutado por tiristores (TSC), b) Formas de onda (Narain G Hingorani, 2000).

El esquema del capacitor conmutado por tiristor o thyristor switched capacitor (TSC) representa la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de reactiva. Este elemento está formado por un interruptor de estado sólido en serie con un capacitor o batería de capacitores como se muestra en la figura 2.20.

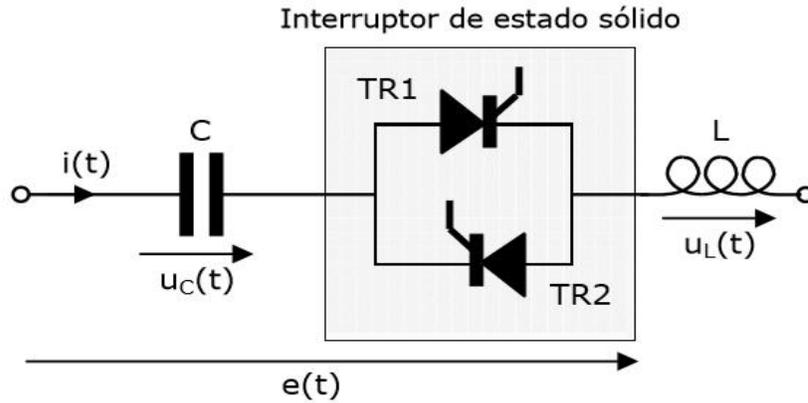


Figura 2.20 Configuración de un TSC.

En la figura 2.20 se muestra un interruptor de estado sólido formado por dos tiristores (TR1 y TR2) en anti paralelo. De forma que, para conectar el condensador (C) se disparan los dos tiristores al mismo tiempo empezando a conducir tan pronto estén polarizados positivamente. Para la desconexión se anula la señal de disparo y los tiristores se apagarán en el instante en que la corriente que los atraviesa cruce por cero. En serie con el condensador es habitual encontrar una bobina (L en figura 2.20), ya sea para limitar la derivada de la intensidad $di(t)/dt$ y así proteger a los tiristores, o bien, para crear un filtro sintonizado a una determinada frecuencia. La actuación del interruptor estático es prácticamente instantánea, por consiguiente, se puede elegir como instante de conexión aquel en que el valor de la tensión de alimentación provoque la menor corriente transitoria. La figura 2.21 muestra un esquema equivalente de un TSC.

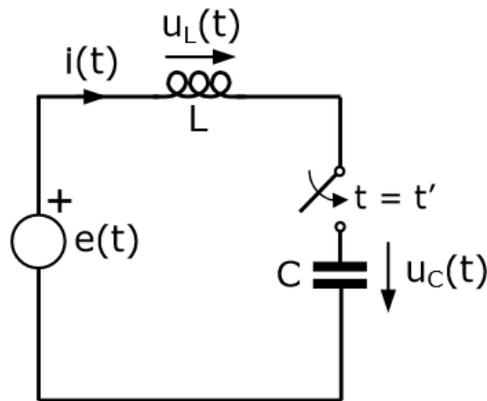


Figura 2.21 Esquema equivalente de un TSC.

2.8.2 Aplicaciones del CEV

Dentro de las aplicaciones de los CEV destacan:

- Control de la tensión para aumentar la calidad del suministro permitiendo, por ejemplo, mitigar la aparición de flicker cuando existen hornos de arco.
- Desde el lado del transporte de energía eléctrica se emplean para mejorar la estabilidad y la capacidad de transporte de las líneas de transporte.
- El CEV se puede poner en paralelo con un determinado consumo cuyo comportamiento varíe rápidamente para obtener un factor de potencia cercano a la unidad en todo instante
- En el caso de consumos monofásicos variables, como es el caso de la tracción en trenes eléctricos, el CEV se usa para equilibrar el consumo en cualquier régimen de funcionamiento.

2.8.3 Configuración del CEV

En general un CEV puede estar compuesto por todos o algunos de los elementos mostrados en la figura 2.22. De esta forma, el CEV tiene un comportamiento capacitivo o inductivo en función del estado de operación de las distintas unidades de capacidad (TSC o controladas mecánicamente), del TCR y de la dimensión de los condensadores fijos, ya sea en baterías o filtros LC.

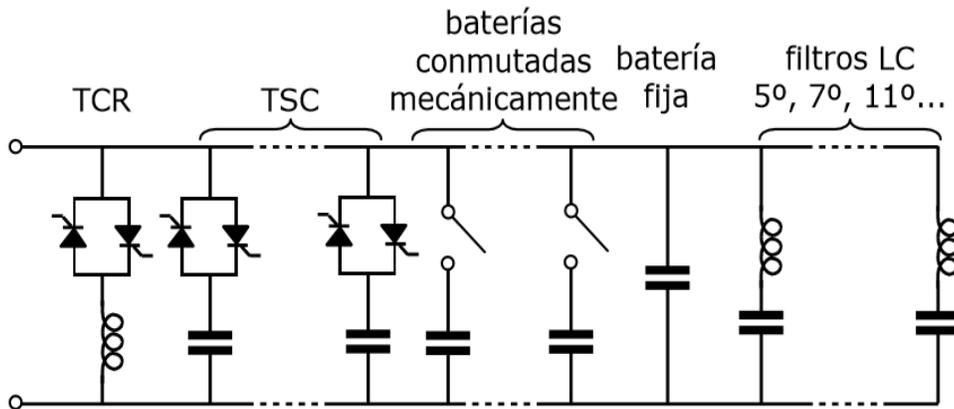


Figura 2.22 Composición por fase de un CEV. (Narain G Hingorani, 2000)

La utilización del TSC en paralelo con el TCR permite disminuir la inductancia para el funcionamiento en el lado capacitivo, ya que el TCR su función es sustituir el salto de potencia reactiva entre dos escalones del TSC. Al reducir el tamaño del TCR también disminuirán los armónicos inyectados a la red. En la figura 2.23 se puede ver el comportamiento de un CEV formado por TCR y TSC's en función de una potencia reactiva demandada (Q_{ref}), que es la potencia del sistema (Narain G Hingorani, 2000).

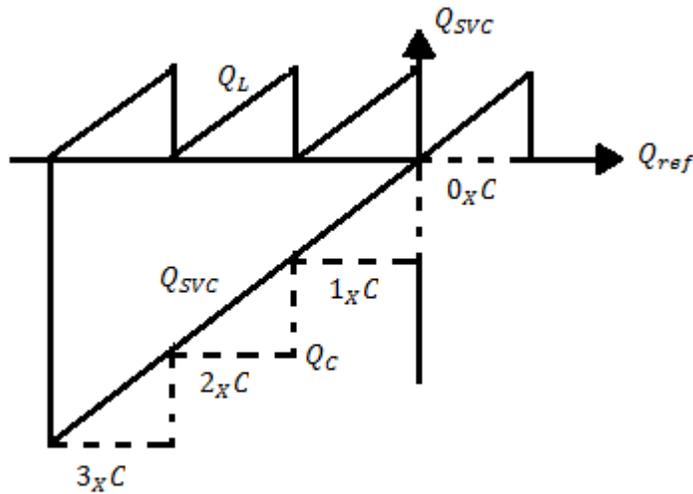


Figura 2.23 Evolución de la Potencia reactiva generada por un CEV formado por un TSC y un TCR.

La adición de filtros LC al sistema, ya sea sintonizados a un determinado armónico o bien pasa-bajo, sirven para evitar que parte de los armónicos generados en el TCR se transmitan a la red y ocasionen una variación de corriente o algún ruido. Con el objetivo de reducir los armónicos emitidos por el CEV también se pueden emplear estrategias como las del rectificador de 12 pulsos, dividiendo el CEV en dos y conectando cada parte a un transformador YY y YD. Las baterías de condensadores, o inductancias, accionadas mecánicamente pueden trabajar como unidades de reactiva de reserva que entrarían en funcionamiento en aquellas condiciones más severas para el control realizado por el CEV.

2.8.4 Control de tensión mediante CEV

El CEV se desarrolló a principios de los años 70 para el control de la tensión en puntos de la red en los que hubiese hornos de arco de eléctrico. Este tipo de horno se carga con chatarra de acero en la que se introducen unos electrodos. Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos produce un calor intenso que funde el acero. Durante el proceso de fundición se producen unas variaciones bruscas y de carácter aleatorio en la corriente que se consume. De esta forma, el resto de los consumos conectados a la red en paralelo con el horno pueden padecer unas variaciones de tensión indeseables, por ejemplo, en forma de flicker. El principio de funcionamiento del CEV, basado en electrónica de potencia, se adapta perfectamente a este tipo de situaciones, ya que se puede realizar un control progresivo y rápido de la tensión, o sea de la reactiva, en el punto de la red en el que se desee actuar. En estas situaciones en las que la variable de control es la tensión, la actuación sobre el CEV se puede realizar a través de un regulador que actúe sobre el ángulo de disparo del TCR y que conecte o desconecte las unidades de TSC en función de la desviación de la tensión con respecto a la tensión de referencia (Narain G Hingorani, 2000).

2.8.5 Corrección del factor de potencia mediante CEV

La utilización del TSC para el control del factor de potencia en aquellas aplicaciones donde se desea minimizar los transitorios de conexión es bastante habitual, teniendo los principales fabricantes (Circuitor, Schneider Electric...) equipos de estas características. No obstante, el comportamiento de estos equipos se puede mejorar incluyendo un TCR en el diseño, de forma que la regulación del factor de potencia sea continua. El control de estos equipos puede realizarse en un bus abierto midiendo la potencia reactiva consumida por la carga y actuando sobre el CEV o bien en bus cerrado midiendo la potencia reactiva consumida por el conjunto formado por la carga a compensar y el CEV. No obstante, el emplear la potencia reactiva como variable entrada no está exenta de problemas, ya que es necesaria la medida simultánea de la tensión y la intensidad, además de la problemática que acarrea su definición cuando hay armónicos en la red (Narain G Hingorani, 2000).

2.9 Controladores

En esta parte del capítulo se relaciona con la selección de la forma apropiada del controlador para una planta en un sistema de control en lazo cerrado y la determinación de los parámetros idóneos para ese controlador.

El controlador es un elemento en el sistema en lazo cerrado que tienen como entrada la señal de error y produce una salida que se convierte en la entrada al elemento correctivo. La relación entre la salida y la entrada al controlador con frecuencia se denomina ley de control. Existen tres formas de dicha ley: proporcional, integral y derivativo, y son los que se analizan en este capítulo. En algunos sistemas es necesario mejorar el desempeño del controlador, lo cual se logra al introducir en el sistema de controles adicionales denominados compensadores. Esta mejora en el desempeño se denomina compensación.

2.9.1 Control proporcional

Con el control proporcional la salida del controlador es directamente proporcional a su entrada; la entrada es la señal de error, e , la cual es una función del tiempo.

De esta manera:

$$\text{Salida} = (K_p)(e) \quad (2.26)$$

Donde K_p es una constante llamada ganancia proporcional. La salida del controlador depende solo de la magnitud del error (e) en el instante en el que se considera. La función de transferencia, $G_c(s)$ para el controlador es, por lo tanto:

$$G_c(s) = K_p \quad (2.27)$$

El controlador es, en efecto, solo un amplificador con una ganancia constante. En cierto tiempo, un error grande produce una salida grande del controlador. La ganancia constante, sin embargo, tiende a existir solo sobre cierto rango de errores que se conoce como banda proporcional. Una gráfica de salida contra el error sería una línea recta con una pendiente de K_p en la banda proporcional como se muestra en la figura 2.24.

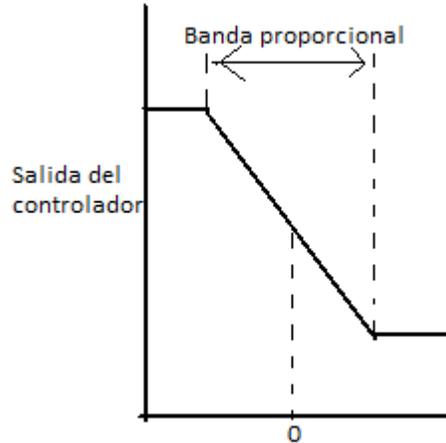


Figura 2.24 Control proporcional.

Es común expresar la salida del controlador como un porcentaje de la posible salida total de éste. De este modo, un 100% de cambio en la salida del controlador corresponde a un cambio en el error desde un extremo a otro de la banda proporcional. Así:

$$K_p = \frac{100}{\text{banda proporcional}} \quad (2.28)$$

Debido a que la salida es proporcional a la entrada, si la entrada al controlador es un error en la forma de un escalón, entonces la salida es también un escalón, y es exactamente una versión a escala de la entrada como se muestra en la siguiente figura 2.25. Esto es provisto por el controlador si opera dentro de su banda proporcional.

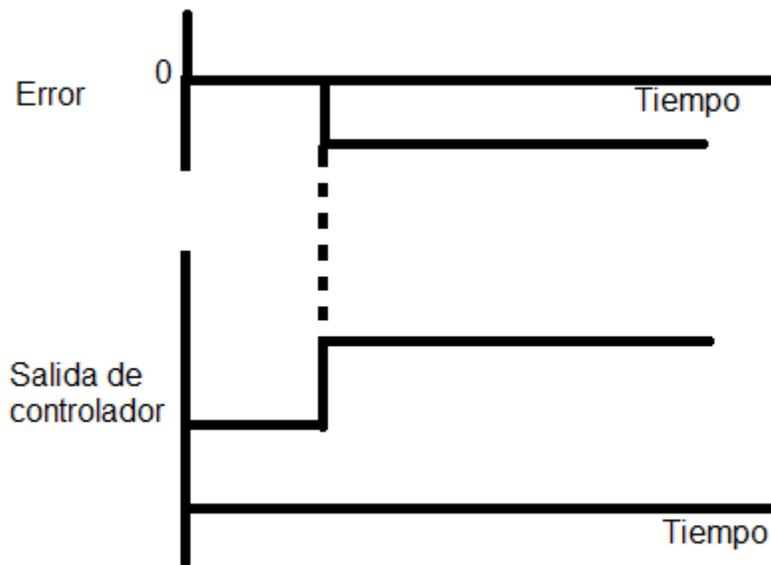


Figura 2.25 Sistema con control proporcional.

El control proporcional es sencillo de aplicar en esencia solo se requiere alguna forma de amplificador. Éste podría ser un amplificador electrónico o un amplificador mecánico en forma de palanca; el control proporcional es de la forma que describe la figura 2.26.

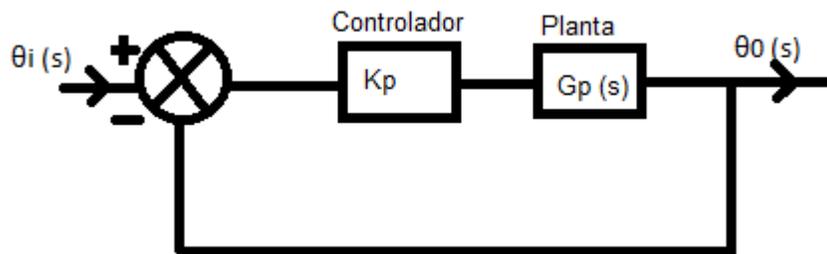


Figura 2.26 Sistema con control proporcional. (bolton)

El resultado es una función de transferencia en lazo abierto de:

$$G_o(s) = K_p G_p(s) \tag{2.29}$$

Donde:

$G_p(s)$ es la función de transferencia de la planta.

La principal desventaja del sistema es que el controlador no introduce un término $1/s$ o integrador en la trayectoria directa. Esto significa que si el sistema fuera de tipo 0, entonces el controlador no cambiaría y seguiría siendo de tipo 0 con los consecuentes errores en estado estable. El controlador no introduce nuevos ceros o polos al sistema, solo determina la ubicación de los polos en lazo cerrado. Esto se debe a que la función de transferencia en lazo cerrado es con el controlador, y la realimentación unitaria es:

$$G(s) = \frac{K_p G_p(s)}{1 + K_p G_p(s)} \quad (2.30)$$

Y, de esta manera, la ecuación característica $(1+K_p G_p(s))$ tiene los valores de sus raíces afectados por K_p .

2.9.2 Control integral

Con el control integral la salida del controlador es proporcional a la integral de la señal de error e con el tiempo, es decir:

$$\text{Salida} = K_i \int_0^t e \, dt \quad (2.31)$$

Donde K_i es la constante denominada ganancia integral. La integral entre 0 y t es, de hecho, el área bajo la gráfica del error entre 0 y t . Así, debido a que después de que el error comienza, el área se incrementa en una razón regular, la salida del controlador se debe incrementar en una razón regular. La salida en cualquier tiempo es, entonces, proporcional a la acumulación de los efectos de los errores pasados.

Al tomar la transformada de Laplace de la ecuación 2.25 da por resultado la función de transferencia, para el controlador integral, de:

$$G_c(s) = \frac{\text{salida}(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.32)$$

Así, para el sistema de la forma que se ilustra en la figura 2.27 el control integral de una función de transferencia de la trayectoria directa de $(K_i/s)G_p(s)$ y, por lo tanto, una función de transferencia en lazo abierto de:

$$G_o(s) = \left(\frac{K_i}{s}\right)G_p(s) \quad (2.33)$$

Una ventaja del control integral es que la introducción de un término s en el denominador incrementa el tipo de sistema en 1. De esta manera, si el sistema hubiera sido de tipo 0, el error en estado estable que se habría presentado con la entrada escalón desaparecería cuando se presentara el control integral. Una desventaja del control integral es que el término $(s-0)$ en el denominador significa que se ha introducido un polo en el origen. Puesto que no se introducen ceros, la diferencia entre el número de polos n , y de ceros m se incrementa en 1. Una consecuencia de lo anterior es que los ángulos de las asíntotas de los lugares geométricos de las raíces decrecen, es decir, éstas apuntan más hacia el semiplano derecho del plano s y, de este modo, se reduce la estabilidad relativa.

Ángulos de las asíntotas = $\pm \frac{\pi}{n-m}, \frac{3\pi}{n-m}$, etcétera. (Woodford)

2.9.3 Control proporcional integral (PI)

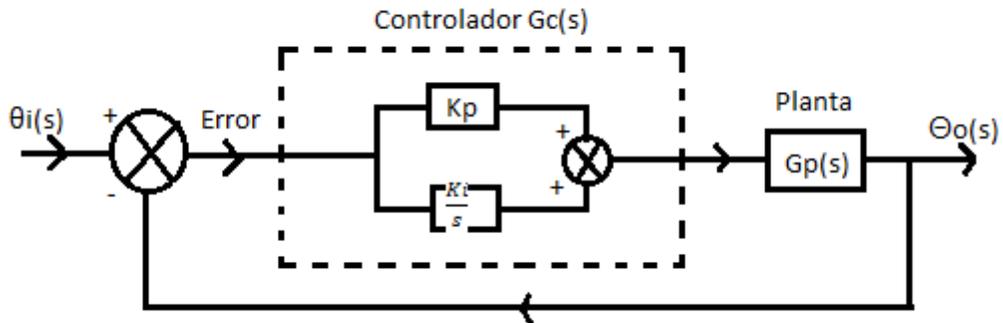


Figura 2.27 Control proporcional integral.

La figura 2.27 ilustra el tipo de salida del controlador que se presenta con dicho sistema cuando existe una entrada de error tipo escalón. Al tomar la transformada de Laplace de la ecuación (2.34) se obtiene una función de transferencia, salida (s)/e(s), para el controlador PI de:

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} \\ &= \frac{sK_p + K_i}{s} \\ &= \frac{K_p[s + (K_i/K_p)]}{s} \end{aligned} \quad (2.34)$$

(K_p/K_i) se denomina constante de tiempo integral, T_i . De esta manera:

$$G_c(s) = \frac{K_p[s + (1/T_i)]}{s} \quad (2.35)$$

En consecuencia, la función de transferencia de la trayectoria directa para el sistema de la figura 2.27 es:

$$G_o(s) = \frac{K_p[s + (1/T_i)]G_p(s)}{s} \quad (2.36)$$

De esta manera, mediante el uso del control PI se adicionan un cero en $-(1/T_i)$ y un polo en 0. El factor $1/s$ incrementa el tipo de sistema en 1 y elimina la posibilidad de un error en estado estable para una entrada escalón. Debido a que se introducen un nuevo polo y un nuevo cero, la diferencia entre el número de polos n y número de ceros m permanece sin cambio. Así, los ángulos de las asíntotas para los lugares geométricos de las raíces no cambian.

Ángulos de las asíntotas = $\pm \frac{\pi}{n-m}, \frac{3\pi}{n-m}$, etcétera.

Sin embargo, el punto de intersección de las asíntotas con el eje real se mueve hacia el origen y, en consecuencia, se presenta cierta reducción en la estabilidad relativa.

$$\text{Punto de intersección} = \frac{\text{suma de polos} - \text{suma de ceros}}{n - m} \quad (2.37)$$

Adicionar el polo en 0 y el cero en $s=-(1/T_i)$ da por resultado que el punto de intersección cambia por $+(1/T_i) / (n-m)$ a la derecha y se hace más positivo y cercano al origen. Sin embargo, la reducción en la estabilidad relativa no es tanto como lo es con el control integral solo.

La posición del cero que se introduce está determinada por la ganancia, K_i , es decir, ésta se determina mediante la constante de tiempo integral, T_i . La ganancia proporcional, K_p , determina las posiciones de los polos en lazo cerrado.

2.9.4 Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

El controlador proporcional integral derivativo (PID), mejor conocido como controlador de tres términos, con un sistema de la forma que ilustra la figura 2.28 dará una salida, para una entrada de error e , de:

$$\text{Salida} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.38)$$

La función de transferencia, salida (s)/e(s), del controlador es, de esta manera:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.39)$$

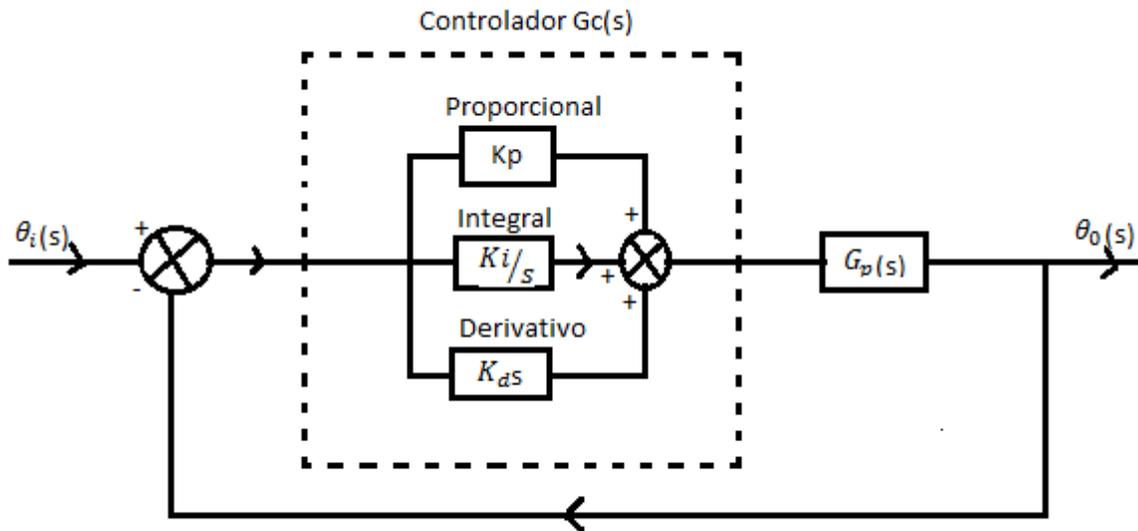


Figura 2.28 Control PID. (bolton)

Debido a que la constante de tiempo integral, τ_i , es K_p/K_i y la constante de tiempo derivativa, τ_d , K_d/K_p , la ecuación se puede escribir como:

$$G_c(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right] \quad (2.40)$$

La función de transferencia en lazo abierto para el sistema de la figura 2.28 es:

$$G_o(s) = \frac{K_p(\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)}{\tau_i s} \quad (2.41)$$

De este modo, el controlador PID ha incrementado el número de ceros en 2 y el número de polos en 1. También el factor $1/s$ incrementa el tipo de sistema en 1. En la ecuación anterior se supone que se ha empleado un diferenciador ideal. En la práctica, se usa un compensador en adelanto.

2.9.5 Ajuste de las ganancias del controlador

El uso del control proporcional sólo requiere la elección de una variable: la ganancia proporcional, K_p , para que el sistema de control tenga el comportamiento dinámico requerido. El uso de un controlador PI requiere la selección de dos variables: la ganancia proporcional K_p y la ganancia integral, K_i . Con un controlador PID se deben seleccionar tres variables: la ganancia proporcional, K_p , la ganancia integral, K_i , y la ganancia derivativa, K_d . La selección de estas variables permite localizar los polos y ceros que introduce el controlador a ser determinados y, por lo tanto, afectan la estabilidad del sistema de control.

Para describir el proceso de selección de los mejores valores para el controlador se usa el término sintonización. Existen varios métodos para lograrlo, pero aquí sólo se estudiarán dos métodos, los de Ziegler y Nichols. Ambos métodos se basan en experimentación y análisis, éstos son recetas de cocina útiles que se usan con mucha frecuencia. El primer método a menudo se denomina “método de la curva de reacción del proceso”. El procedimiento con éste método consiste en abrir el lazo de control de modo que no se presenten acciones de control. En general, la ruptura del lazo se hace entre el controlador y la unidad de corrección. Se aplica, entonces, una señal de prueba a la unidad de corrección y se determina la respuesta de la variable de proceso medida, es decir, la señal de error. La señal de prueba deberá ser tan pequeña como sea posible. La figura 2.29 muestra la forma de la señal de prueba y una respuesta típica. La gráfica de la señal medida se grafica contra el tiempo y se conoce como la curva de reacción del proceso.

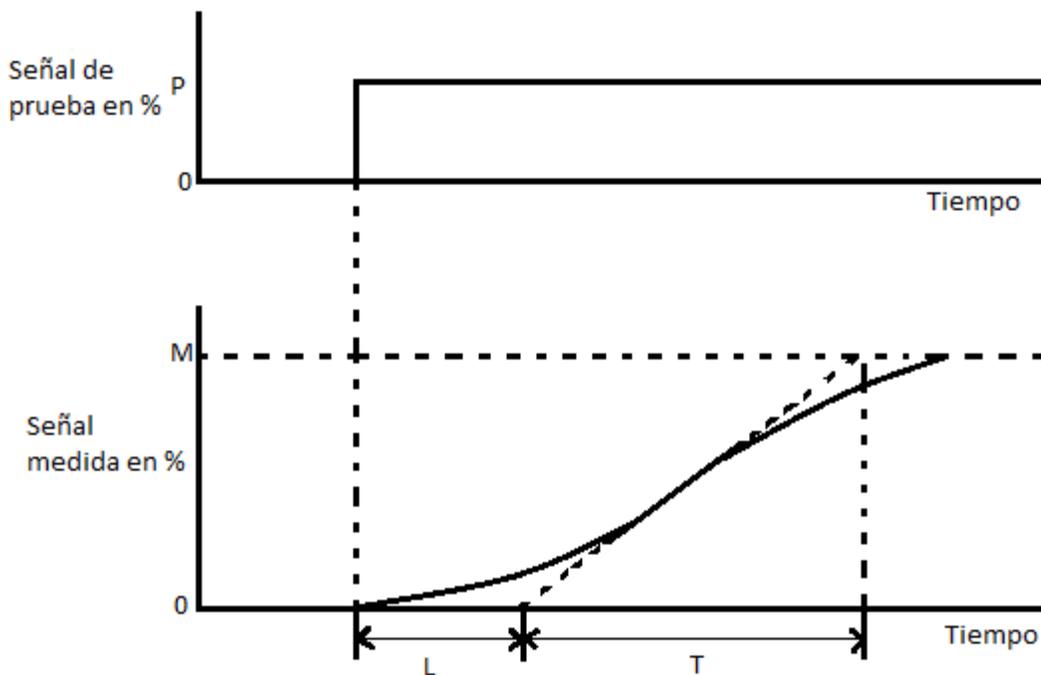


Figura 2.29 Curva de reacción de proceso.

La señal de prueba, P , se expresa como el porcentaje de cambio en la unidad de corrección. La variable medida se expresa como el porcentaje del rango a escala completa. Para dar el máximo gradiente de la gráfica se traza una tangente. Para la figura 2.29 el máximo gradiente R es M/T . El tiempo entre la aplicación de la señal de prueba y cuando esta tangente intersecta el eje de tiempo de la gráfica se denomina atraso L . La tabla 2 proporciona los criterios recomendados por Ziegler y Nichols para los valores del controlador con base en los valores de P, R y L .

Tabla 2 Criterios de Ziegler y Nichols para la curva de reacción del proceso.

Método de control	K_p	K_i	K_d
Proporcional solamente	P/RL		
Proporcional + integral	$0.9 P/RL$	$1/3.33L$	
Proporcional + integral + derivativo	$1.2 P/RL$	$1/2L$	$0.5L$

El otro método se conoce como el “método de la última ganancia”. Primero, las acciones integral y derivativa se reducen a sus valores mínimos. La constante proporcional, K_p , se fija en un valor bajo y, entonces, se incrementa en forma gradual. Esto es lo mismo que decir que la banda proporcional se hace más angosta de manera gradual. Mientras esto sucede, al sistema se le aplican pequeñas perturbaciones. El proceso continúa hasta que se presentan oscilaciones. Se anota el valor crítico de la constante proporcional, K_{pc} , en la que se presentan las oscilaciones, así como el tiempo, T_c , de éstas. La tabla 3 muestra los criterios de Ziegler y Nichols sobre cómo se relacionan los valores de K_{pc} y T_c para establecer los valores del controlador. La banda proporcional crítica es $100/K_{pc}$.

Tabla 3 Criterios de Ziegler y Nichols para la última ganancia.

Método de control	Kp	Ki	Kd
Proporcional solamente	0.5 Kpc		
Proporcional + integral	0.45 Kpc	1.2/Tc	
Proporcional + integral + derivativo	0.6 K pc	2.0/Tc	Tc/8

2.9.6 Realimentación de velocidad

En muchos sistemas se involucra el posicionamiento de algún objeto, por ejemplo, el brazo de un robot; en este caso, el requerimiento es que el sistema responda con rapidez a los errores y no producir excesivas oscilaciones, o sobrepasos. Esto se puede lograr incorporando dentro del lazo principal de realimentación una trayectoria de realimentación menor que introduzca lo que se denomina realimentación de velocidad, término que describe un lazo de retroalimentación donde la señal que se alimenta de regreso no es el valor de la salida sino la razón de cambio con el tiempo de la salida. Para esta realimentación la salida de la trayectoria de realimentación se relaciona con su entrada mediante:

$$\text{Salida} = K_v \frac{d\theta_0}{dt} \quad (2.42)$$

Y, de esta manera, la trayectoria de realimentación tiene una función de transferencia de:

$$H(s) = K_v s \quad (2.43)$$

K_v es una constante, la ganancia de realimentación con unidades de s.

El término de realimentación de posición se usa en circunstancias en las que se realimenta el valor de salida. Estos términos surgen a partir del uso primario de sistemas de control para controlar la posición de algún objeto; la realimentación de posición es, entonces, una medida de la posición del objeto y la realimentación de velocidad, una medida de la velocidad del objeto. La figura 2.30 muestra un sistema con ambas formas de realimentación.

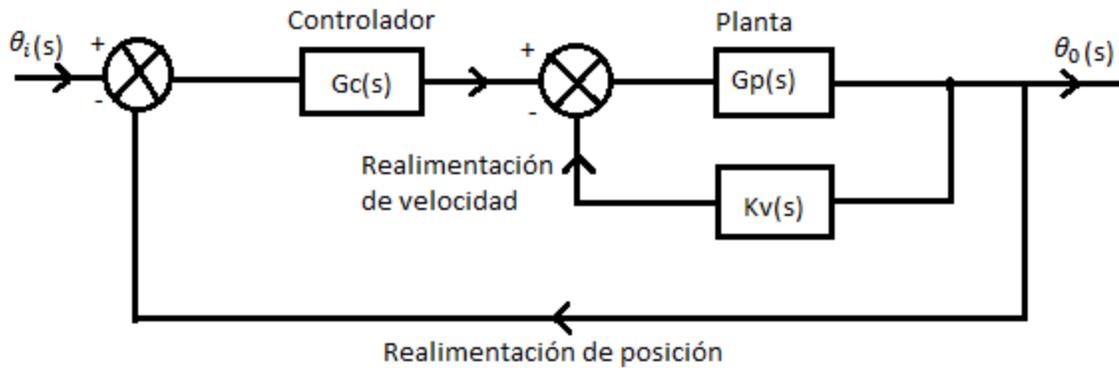


Figura 2.30 Sistema con realimentación de velocidad y posición. (bolton)

En estos sistemas la función de transferencia en lazo abierto es:

$$G_o(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_p(s)K_v s} \quad (2.44)$$

Y la función de transferencia en lazo cerrado es:

$$G(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_p(s)K_v s + G_p(s)G_c(s)} \quad (2.45)$$

El efecto de la realimentación de velocidad ha sido el introducir un término $G_p(s)K_v s$ en el denominador y, de este modo, en la ecuación característica.

El efecto de esto se puede ver al considerar un ejemplo. Considere un sistema con control proporcional, ganancia K_p , y una planta con una función de transferencia $1/s(s+a)$.

La función de transferencia en lazo abierto es:

$$G_o(s) = \frac{K_p}{s(s+a+Kv)} \quad (2.46)$$

La realimentación de velocidad modifica el denominador y, por lo tanto, la posición de las raíces en lazo abierto. Las raíces, las cuales estaban en 0 y en a en ausencia de la realimentación de velocidad, están ahora en 0 y $-(a+Kv)$. La figura 2.31 ilustra el efecto sobre el diagrama del lugar geométrico de las raíces. Como consecuencia de la realimentación de velocidad se mejoró la estabilidad relativa, se incrementó el factor de amortiguamiento relativo para la misma frecuencia natural angular y la frecuencia natural angular se incrementó para el mismo factor de amortiguamiento relativo. El sobrepaso en porcentaje es:

$$\exp\left[\frac{-\delta}{\sqrt{1-\delta^2}}\right] \times 100\% \quad (2.47)$$

Debido a que $\delta = \cos \phi$, entonces:

$$\text{Sobrepaso} = \exp\left[\frac{-\cos\phi}{\sqrt{1-\cos^2\phi}}\right] \times 100\% \quad (2.48)$$

$$\text{Sobrepaso} = \exp\left[\frac{-\cos\phi}{\sqrt{\sin^2\phi}}\right] \times 100\% \quad (2.49)$$

Así el sobrepaso en porcentaje es:

$$\text{Sobrepaso} = \exp\left[\frac{-1}{\tan\phi}\right] \times 100\% \quad (2.50)$$

El efecto de incluir la realimentación de velocidad es reducir ζ para un valor particular de la frecuencia natural angular, Esto significa una reducción en la $\tan \phi$ y, en consecuencia, un decremento en el sobrepaso en porcentaje como se muestra en la figura 2.31.

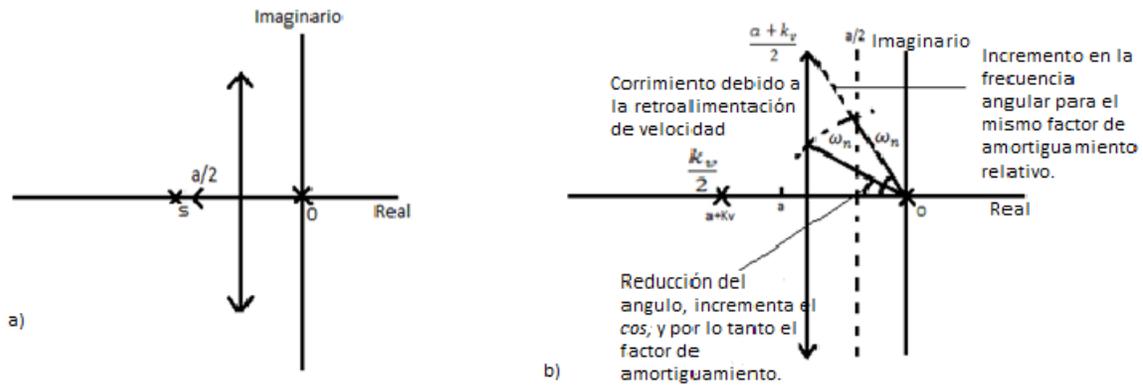


Figura 2.31 El efecto de la realimentación de velocidad: a) sin, b) con realimentación de velocidad.

2.9.7 Compensación

Los compensadores se pueden definir como componentes insertos en el sistema de control para aumentar el desempeño del controlador. Si se considera que el controlador va a tener como base un controlador proporcional, entonces, como ejemplo, se puede considerar que un controlador PI va a ser un controlador proporcional con un compensador integral. Cuando el compensador se incluye en la trayectoria directa del lazo de control se dice entonces que éste va a ser un compensador en cascada. De esta manera, el compensador integral es el compensador integral en cascada. El efecto de incluir un compensador tendrá principalmente una mejora respecto a los errores en estado estable y una reducción en la estabilidad.

Los compensadores se usan para mejorar el desempeño y para moldear al lugar geométrico de las raíces. Así, el compensador integral introduce un polo en el origen y, de este modo, cambia la posición y forma de los lugares geométricos de las raíces. Las dos formas más comunes de compensadores en cascada tienen la función de transferencia:

$$G_c(s) = \frac{K(s + z)}{(s + p)} \quad (2.51)$$

Cuando $z > p$ se conoce como compensador de atraso en cascada, y cuando $z < p$, como compensador de adelanto en cascada. De esta manera, ambos compensadores introducen un cero y un polo; sin embargo, entre los dos difiere la posición relativa del polo y el cero.

Un compensador de atraso en cascada introduce el polo en lazo abierto más cercano al origen que el cero. En muchos aspectos éste es como un control proporcional integral; sin embargo, la principal diferencia es que el polo que se introduce no está en el origen. Del mismo modo que con el control PI, el punto de intersección de las asíntotas sobre el eje real se mueve a la derecha y así existe alguna reducción en la estabilidad. Los ángulos de las asíntotas permanecen sin alteración, puesto que no hay cambio en $(n-m)$. Sin embargo, puesto que no hay un factor $1/s$ no hay cambio en el tipo de sistema.

Un compensador de adelanto en cascada introduce el cero más cercano al origen que el polo. En muchos aspectos éste es como un control proporcional derivativo, pero la principal diferencia es que el cero no se introduce en el origen. Como con el control PD, el punto de intersección de las asíntotas sobre el eje real se mueve a la izquierda y, así, existe una mejora en la estabilidad. Los ángulos de las asíntotas permanecen sin alteración puesto que no hay cambio en $(n-m)$. No se introduce un factor $1/s$ y, de esta manera, no hay cambio en el tipo de sistema.

2.9.8 Implantación de las leyes de control.

En sistemas de control eléctricos con frecuencia se usan amplificadores operacionales como la base para generar las leyes de control requeridas. La figura 2.32 muestra la forma básica de dicho amplificador cuando éste se conecta como si fuera a usarse como un amplificador inversor. El amplificador tiene dos entradas, conocidas como la entrada inversora (-) y la entrada no inversora (+). Para usarse como amplificador inversor, la entrada se conecta a través de un resistor, R_1 , a la entrada inversora del amplificador y la entrada no inversora se conecta a tierra. Una trayectoria de realimentación está provista por el resistor R_2 . El amplificador operacional tiene una ganancia grande en lazo abierto, del orden de 100000 o más, y el cambio en su voltaje de salida está limitado, en general, en alrededor de $\pm 10V$. Para producir esa salida con ésta ganancia, el voltaje de entrada debe estar entre $0.00001 V$ y $-0.00001 V$. Éste es virtualmente cero y, así, el punto X está virtualmente a un potencial de tierra. Por

ésta razón a ese punto se le llama tierra virtual. La diferencia de potencial a través de R_1 es $V_1 - V_x$, por lo tanto, el potencial de entrada, V_1 , se puede considerar como el voltaje a través de R_1 y, de esta manera:

$$V_1 = I_1 R_1 \quad (2.52)$$

El amplificador operacional (figura 2.32) tiene una impedancia de entrada muy alta y de esta manera virtualmente no fluye corriente hacia su interior a través del punto X. Por lo tanto, la corriente, I_1 , fluye sólo a través de R_2 . Puesto que X es la tierra virtual, y debido a que la diferencia de potencial a través de R_2 será virtualmente $-V_0$. Por lo que:

$$-V_0 = I_1 R_2 \quad (2.53)$$

$$\text{Función de transferencia} = \frac{V_0}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.54)$$

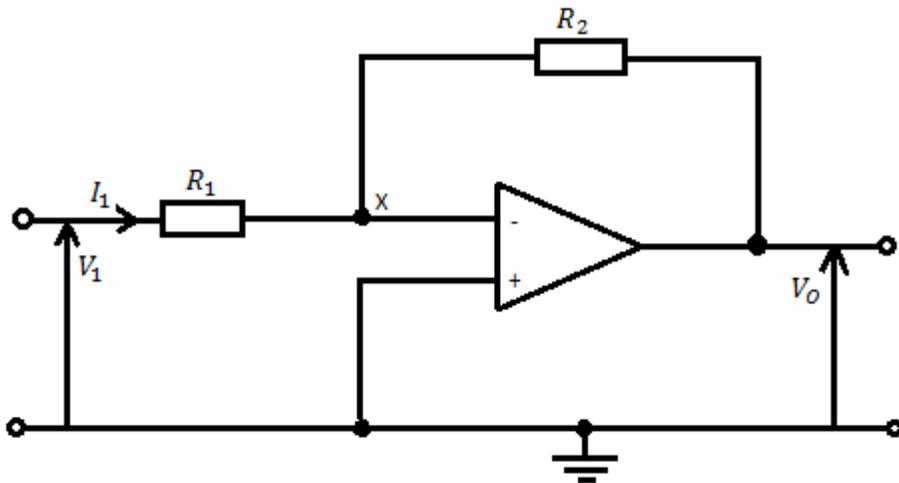


Figura 2.32 Amplificador operacional en configuración inversora.

Así, la función de transferencia está determinada por los valores relativos de R_2 y R_1 . El signo negativo indica que la salida está invertida, es decir, desfasada 180° respecto a la entrada.

Como indica la ecuación (2.45), el amplificador operacional inversor tiene una ganancia de $-R_2/R_1$. El signo menos se puede eliminar pasando la salida a través de otro amplificador operacional inversor, pero ésta vez uno en el que $R_2=R_1$ y así tenga una ganancia de -1 . La combinación figura 2.33 es, entonces, un controlador proporcional con:

$$Kp = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.55)$$

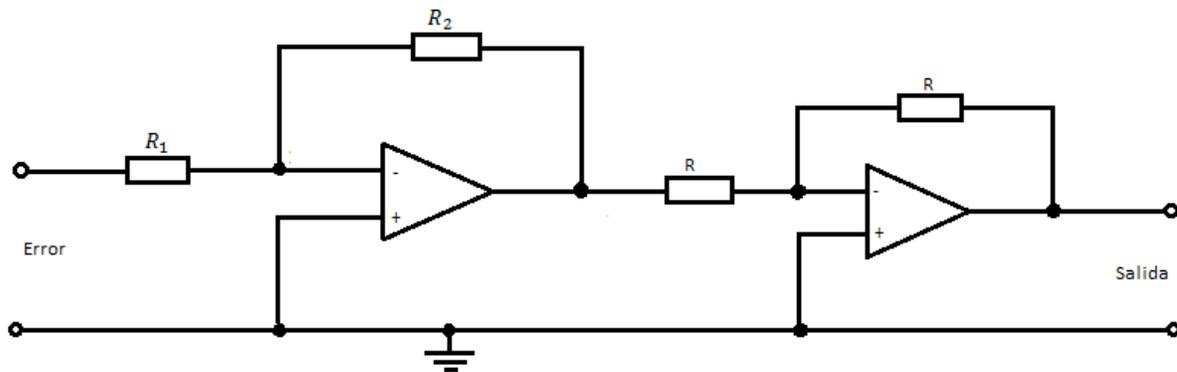


Figura 2.33 Controlador proporcional.

Se puede producir un controlador integral si el resistor de realimentación se reemplaza por un capacitor figura 2.34. Para un capacitor, la ecuación (2.47) da por resultado:

$$v = \frac{1}{C} \int idt \quad (2.56)$$

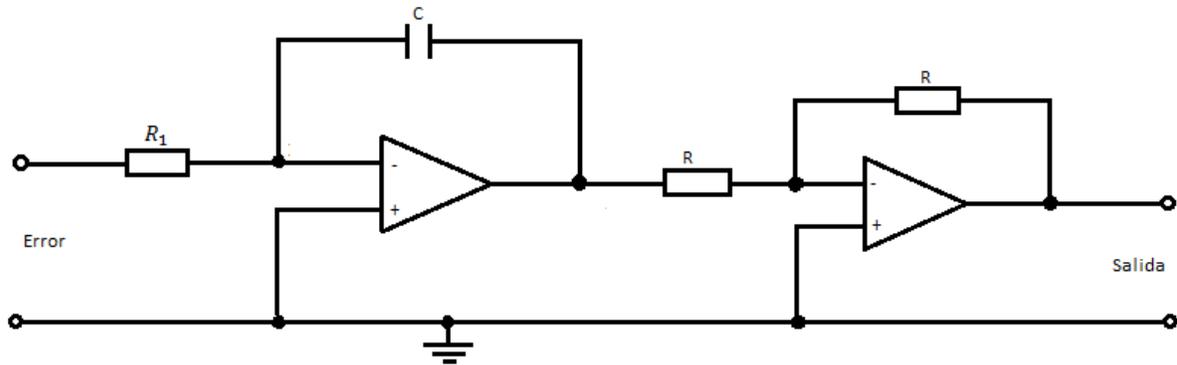


Figura 2.34 Controlador integral.

De este modo:

$$V_{(s)} = \frac{I(s)}{C_s} \quad (2.57)$$

Y así, la impedancia Z, está dada por:

$$Z_{(s)} = \frac{1}{C_s} \quad (2.58)$$

Para el circuito con amplificador operacional con el capacitor en la realimentación, la ecuación básica (2.45) se puede escribir como:

$$\text{Función de transferencia} = - \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.59)$$

Puesto que $Z_1(s) = R_1$ y $Z_2(s) = 1/C_s$, entonces:

$$\text{Función de transferencia} = - \frac{1}{R_1 C_s} \quad (2.60)$$

Cuando el circuito se combina con otro circuito con amplificador operacional de función de transferencia -1, como muestra la figura 2.34, da por resultado:

$$\text{Función de transferencia} = \frac{(1/R_1 C)}{s} \quad (2.61)$$

Y, por lo tanto, es un controlador integral con $K_i = (1/R_1 C)$. La figura 2.35 describe cómo se puede adaptar el circuito para dar un controlador PI. Para éste circuito:

$$Z_2(s) = R_2 + \frac{1}{C_s} \quad (2.62)$$

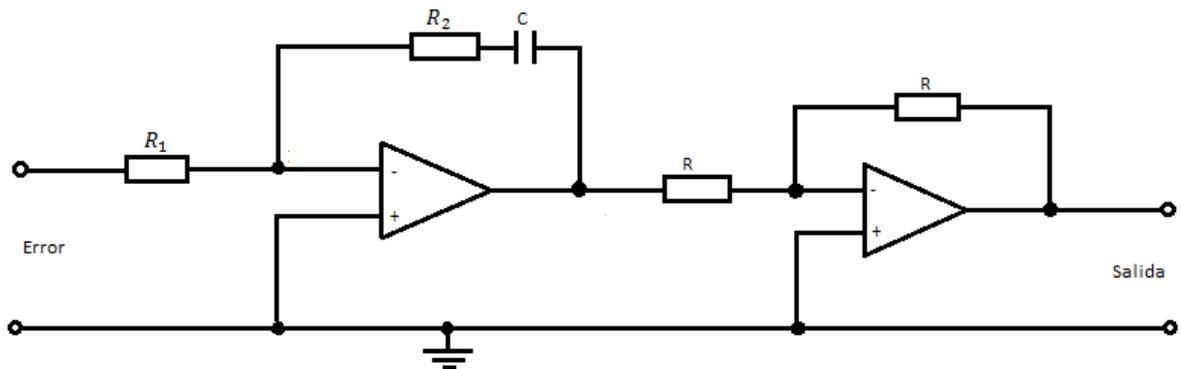


Figura 2.35 Controlador PI.

Y, de esta manera:

$$\text{Con } K_p = \frac{R_2}{R_1} \text{ y } K_i = 1/R_1 C \quad (2.63)$$

La figura 2.36 muestra cómo se puede producir un controlador derivativo. Para el amplificador operacional con capacitor y resistor en la línea de entrada se tiene,, según la ecuación [29], $Z_2 = R_2$ y:

$$Z_1(s) = R_1 + \frac{1}{C_s} = \frac{R_1 C_s + 1}{C_s} \quad (2.64)$$

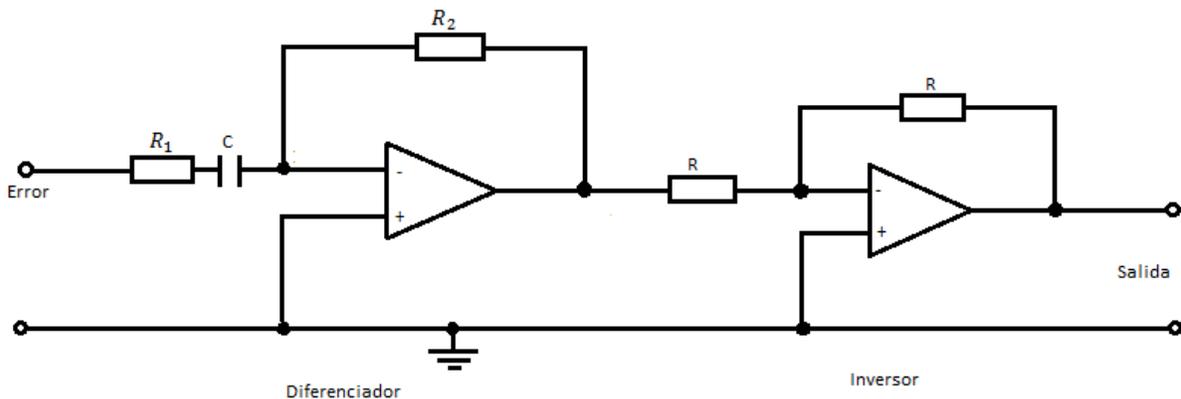


Figura 2.36 Controlador derivativo.

De éste modo, la ecuación (2.56) da por resultado:

$$\text{Función de transferencia} = - \frac{R_2 C_s}{R_1 C_s + 1} \quad (2.65)$$

Al cambiar éste circuito con uno que tenga una función de transferencia de -1 da como resultado:

$$\text{Función de transferencia} = \frac{R_2 C_s}{R_1 C_s + 1} \text{ (bolton)} \quad (2.66)$$

Capítulo 3 Simulación del CEV con control tipo PID

3.1 Introducción

En este capítulo se hará una descripción de los componentes del CEV, en donde se explicará cada parte de que lo compone en el modelo que contiene el simulador PSCAD, posteriormente se hará la sintonización donde se pasará de un controlador PI al controlador PID que es el objetivo de este proyecto y también se realizará el análisis de todas las gráficas necesarias para garantizar el funcionamiento correcto del CEV con el nuevo modelo de control.

3.2 Descripción de la simulación del control PI del CEV en el software PSCAD

El sistema de bancos de capacitores y banco de reactores del CEV son accionados a través de los tiristores controlados por pulsos de corriente enviados por el controlador, la corriente es calculada directamente con el ángulo de disparo con la que salga esta corriente.

En la figura 3.1 se observan las variables de entrada y de salida del sistema de control que en las de entrada se puede ver la potencia reactiva de la línea y el nivel de tensión que será comparada con un nivel de tensión de referencia; En la parte de la salida están los pulsos de corriente y un ángulo alfa de conducción hacia la planta que es el sistema compuesto por los tiristores.

Para poder simular el sistema de control es necesario tomar en cuenta los parámetros de la línea, por esta razón se conecta a una impedancia que es la característica propia de la línea y una fuente de CA que representa los transformadores y la generación.

El sistema CEV está representado por dos TRIAC de alta capacidad de tensión conectados en antiparalelo, cada parte con su respectiva carga capacitiva e inductiva, que se encargara de la inyección de reactivos para lograr la correcta compensación.

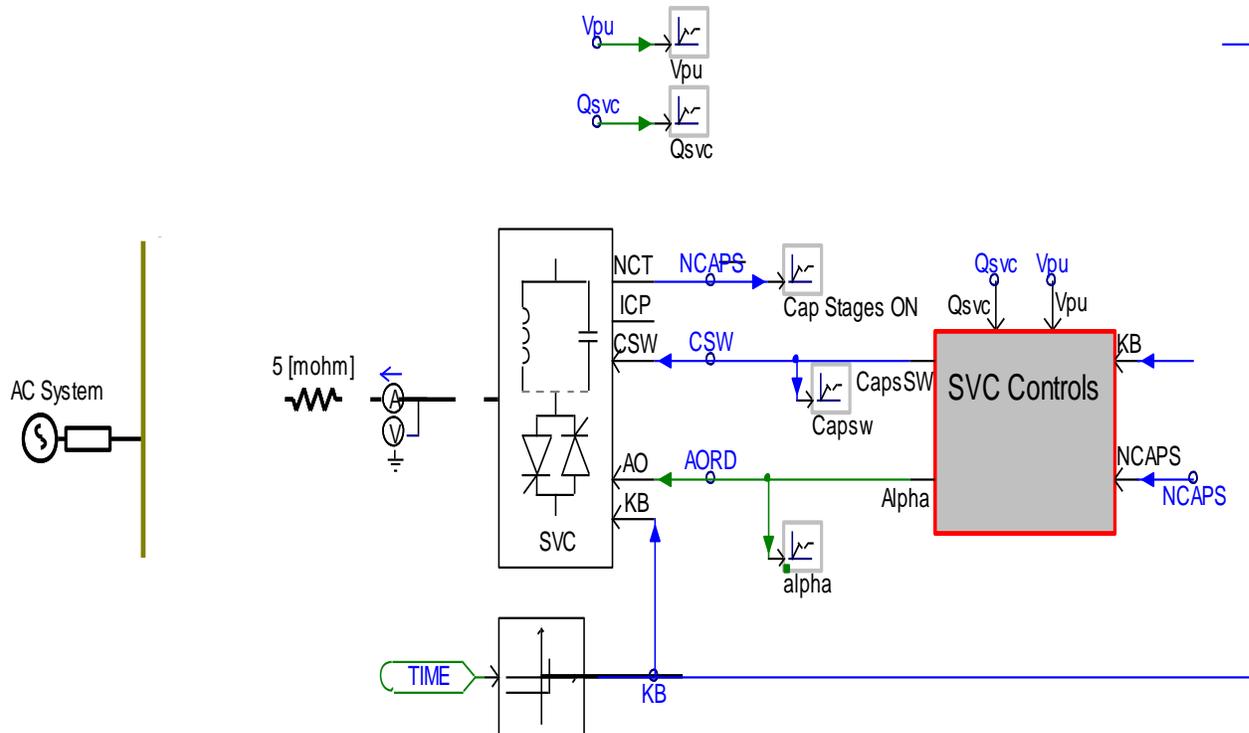


Figura 3.1 Esquematación de un CEV de la conexión eléctrica del CEV y del sistema de control con la línea. (Woodford)

La figura 3.2 es una esquematización de la fuente de generación y de las impedancias características de la línea en paralelo con lo que es una conductancia, se nota como último elemento un circuito en paralelo que se encarga de simular una falla a tierra o entre fases, depende de la configuración deseada.

La falla se pone en la línea con la finalidad de dar un abatimiento en la tensión, se encontró que existe un tiempo de respuesta del CEV aunque siempre se encuentra censando no es instantánea la compensación en la línea.

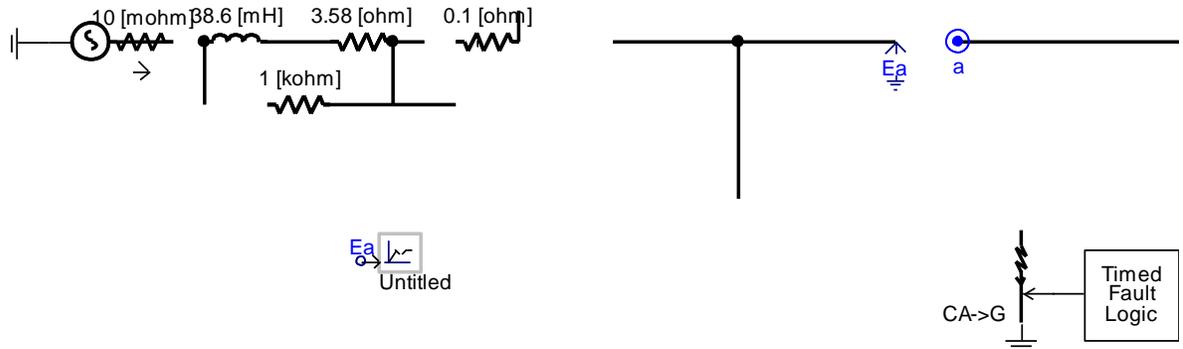


Figura 3.2 Diagrama eléctrico de la línea de transmisión en paralelo con la falla provocada.

Dentro del bus infinito puede estar conectado un sin número de fuentes de generación provocando discrepancias en la tensión por lo que es de vital importancia el censado del comportamiento de la misma, en la figura 3.3 se ve de manera clara como la tensión tiene un comportamiento estable, del tiempo delimitado de 1 segundo se introduce la falla que tiene una duración de .125 segundos que es la parte representada en color verde claro del rango 1-1.097 segundos, después de este tiempo entra en accionamiento el CEV dando como resultado un sobretiro y una estabilidad en el sistema; cabe mencionar que el CEV no entrará en accionamiento mientras la falla este presente; cuando pase la falla el sistema no podrá restablecer sus características nominales inmediatamente.

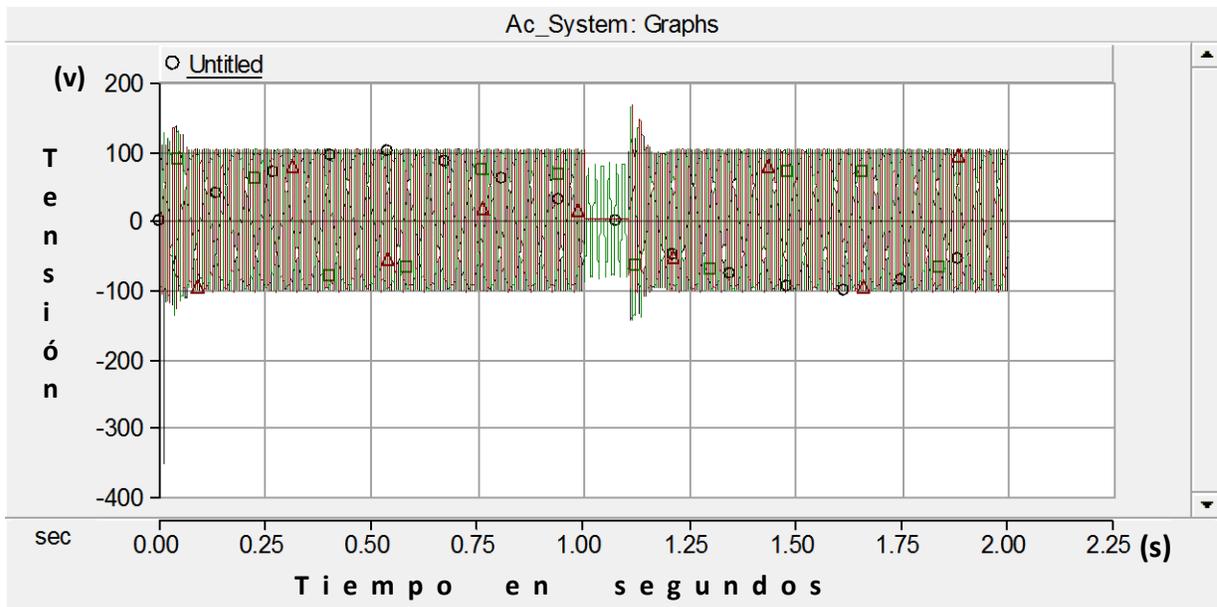


Figura 3.3 Lectura del comportamiento de la tensión: antes, durante y después de la falla.

En la figura 3.4 se muestra el comportamiento de los valores de salida del sistema de control; observando un disparo del valor de por unidad del voltaje así como el ángulo de disparo emergente del lazo de control y la proporcionalidad del banco de capacitores

que se accionó en ésta prueba para mostrar su crecimiento drástico con el fin de contrarrestar el cambio de tensión en la línea.

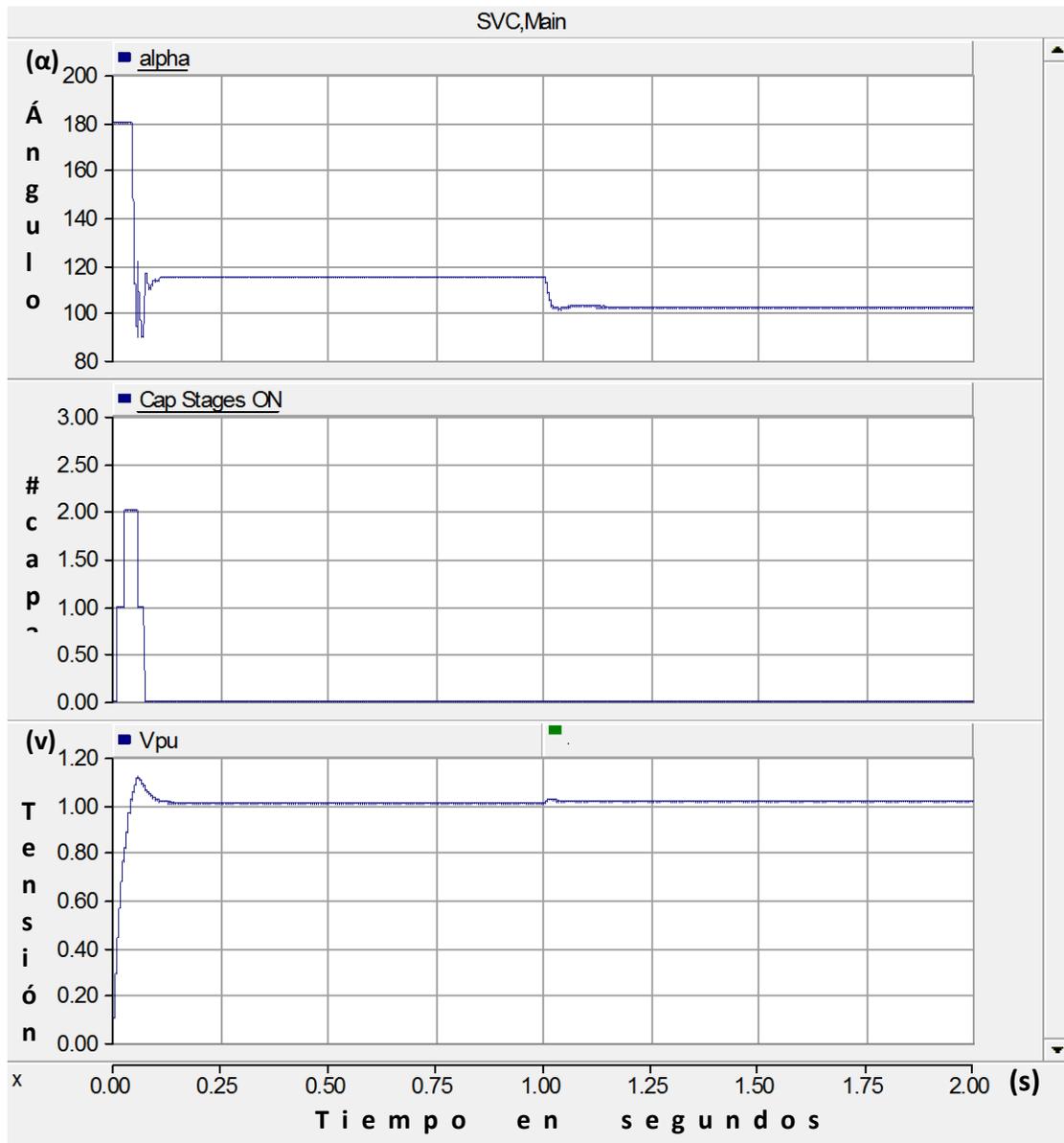


Figura 3.4 Gráfica de los valores de salida del sistema de control para controlar la planta. (Woodford)

Anteriormente se describió el sistema de accionamiento del CEV mostrando el lazo de control como una caja negra donde únicamente se notan las entradas y las salidas omitiendo el proceso de control.

A continuación, se describirá parte por parte la constitución del sistema de control PI conectado a un CEV y se mostrará el comportamiento de las señales en cada parte del proceso para después poder hacer el cambio al controlador PID como se muestra en la figura 3.5.

Como primera entrada del controlador se tiene el monitoreo de la tensión en niveles por unidad y se tiene un multiplicador que es el encargado de dar un nivel del 80% del valor de tensión monitoreada que será el parámetro principal de activación del CEV.

El siguiente parámetro de entrada al sistema de control es la potencia reactiva en la línea que está conectada a un divisor, esto con la finalidad de obtener la potencia en un sistema de base de 200 MVA que es una característica del sistema existente.

Al tener los valores de potencia y de tensión en valores por unidad se conectan a un divisor de potencia entre tensión lo que dará como resultado la corriente en un sistema base del SEP.

Al tener la corriente resultante del sistema se trabaja con el 3% por lo que se encuentra con un multiplicador de valor de 0.03 este nivel de corriente entra a un comparador que tiene como referencia la tensión por unidad.

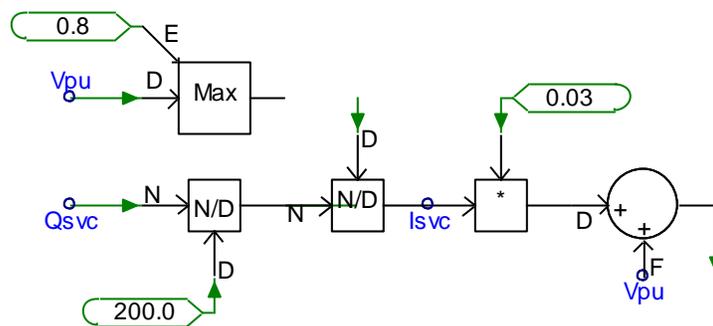


Figura 3.5 Entrada del lazo de control del controlador PI.

En la figura 3.6 se observa una clara purificación de la señal de salida con respecto a la de entrada, esto se logró con la colocación de filtros pasa altos y pasa bandas; estos filtros se encargan de oponerse al paso de señales con frecuencias distintas a las de la frecuencia nominal permitiendo una lectura mucho más apegada a la fundamental con el propósito de que el CEV no tenga falsos accionamientos por armónicos o por transitorios, el filtro pasa altos es el encargado de repeler las señales con una frecuencia mayor a los 90 Hz; mientras que el filtro pasa bandas se encarga de repeler las señales en un intervalo de 60 a 120 Hz.

En la figura 3.7, se muestra una gráfica comparativa en el que se muestran las señales de entrada y la de salida de los filtros, en el programa utilizado (PSCAD) la señal no tiene ruido por que trabaja en condiciones ideales, por lo que fue necesario agregar una señal ajena a la monitoreada en la entrada del control para crear una distorsión y se vea el accionamiento de los filtros.

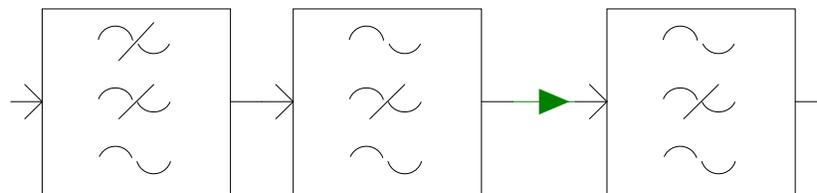


Figura 3.6 Conexión de los filtros pasa altos y pasa bandas.

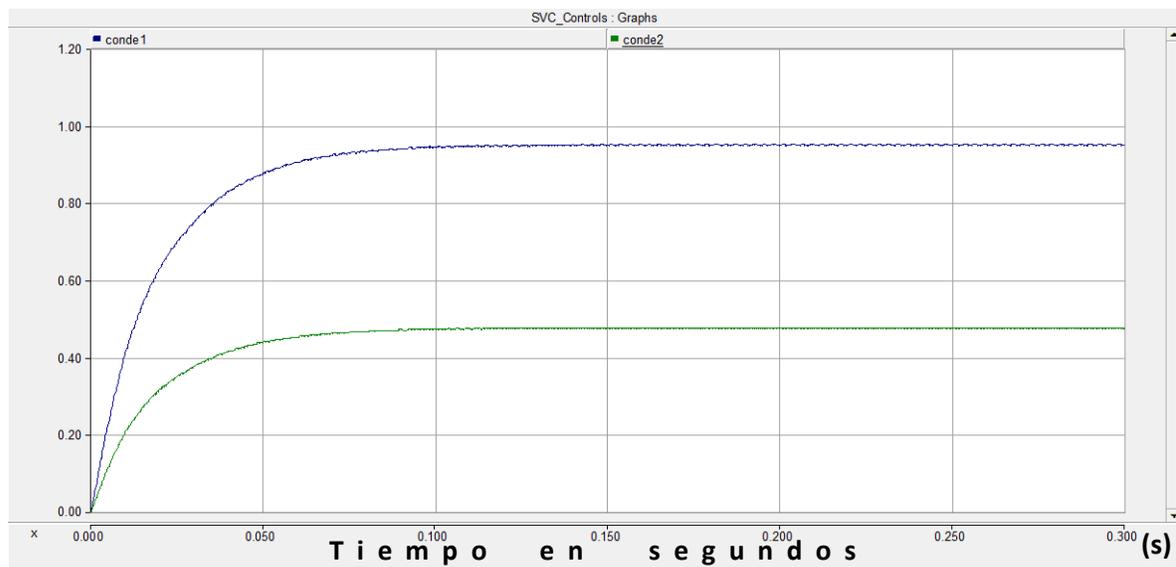


Figura 3. 7 Monitoreo de la señal antes y después de entrar al filtro con el fin de eliminar armónicos.

Después de que la señal fue filtrada entra a un punto de comparación con la mayor pureza posible donde la tensión entra en un punto de comparación para poder entrar al fin al sistema PI, cómo se muestra en la figura 3.8, lo que hace que las constantes K_p Y K_i controlen los niveles de susceptancia necesarios para la compensación, al cambiar los niveles de susceptancia se mandaran pulsos de corriente a los tiristores que activaran ciertos números de bancos de capacitores y numero de capacitores o un posicionamiento en el reactor; en el capítulo anterior se explicó el como la manipulación de estas variables dan la precisión del controlador , permitiendo una rapidez y eficiencia en el modo de activación.

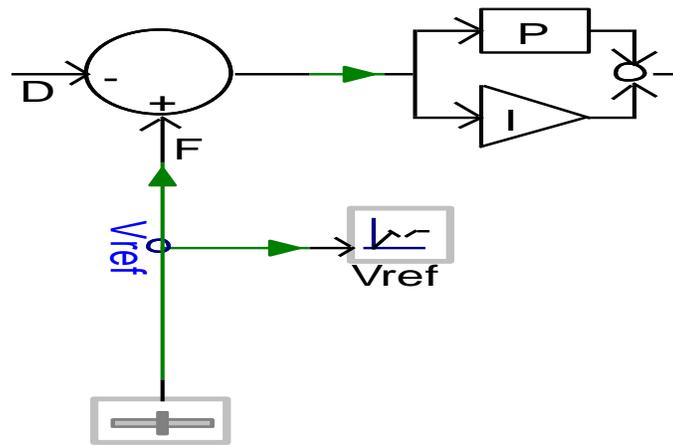


Figura 3.8 Entrada del controlador PI.

Los pulsos de corriente descritos en la figura anterior van directamente al banco de tiristores que es todo un conjunto con la caja de TCR/TSC esto no solo representa las válvulas de control si no también los bancos de capacitores y el reactor en serie con los tiristores cada uno respectivamente; después se puede visualizar las señales de envío del sistema de control, es decir se ve la forma de obtención del ángulo de conductancia como primer escalón, la activación de los capacitores en segundo plano y en el tercer plano se muestra una retroalimentación de comparación de los niveles de susceptancia, esta comparación determinará en qué momento se dejara de compensar en el sistema de control, como se observa en la figura 3.9.

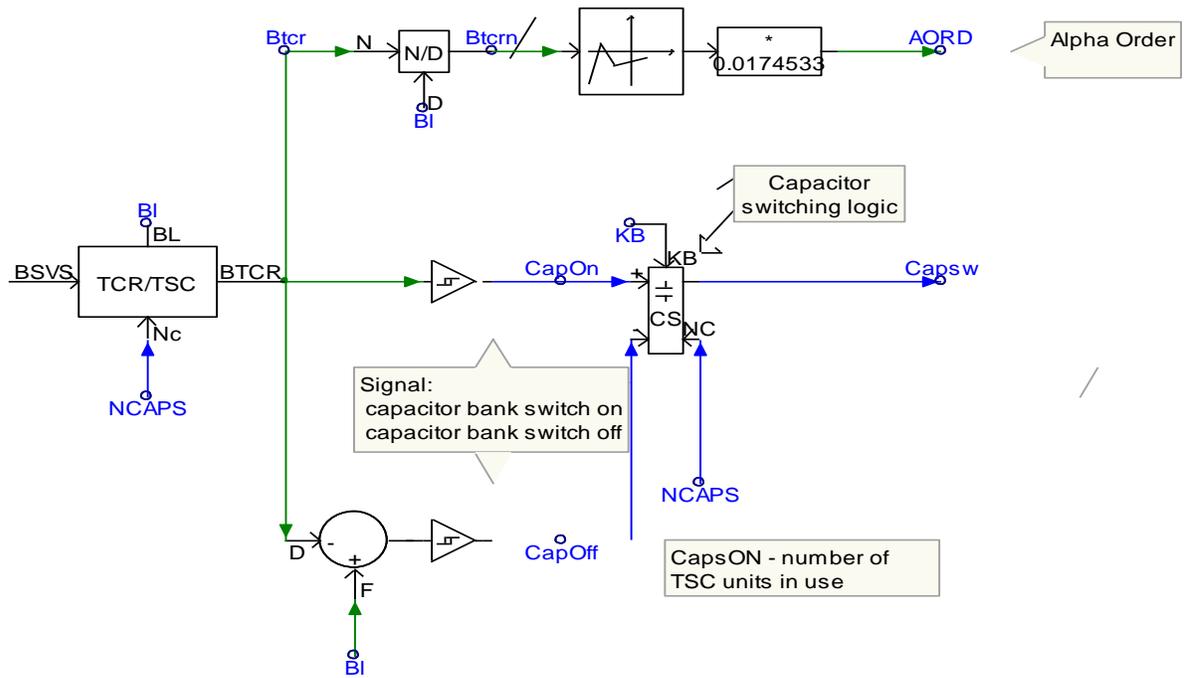


Figura 3.9 Accionamiento del TCR/TSC con las salidas en los tres escalones principales.

En la figura 3.10 se presentan los valores reales del CEV que son tomados del simulador PSCAD, como son: la capacidad en MVA, y la frecuencia, se hace necesario conocer estos datos ya que este CEV es el que se utilizó para hacer las pruebas.

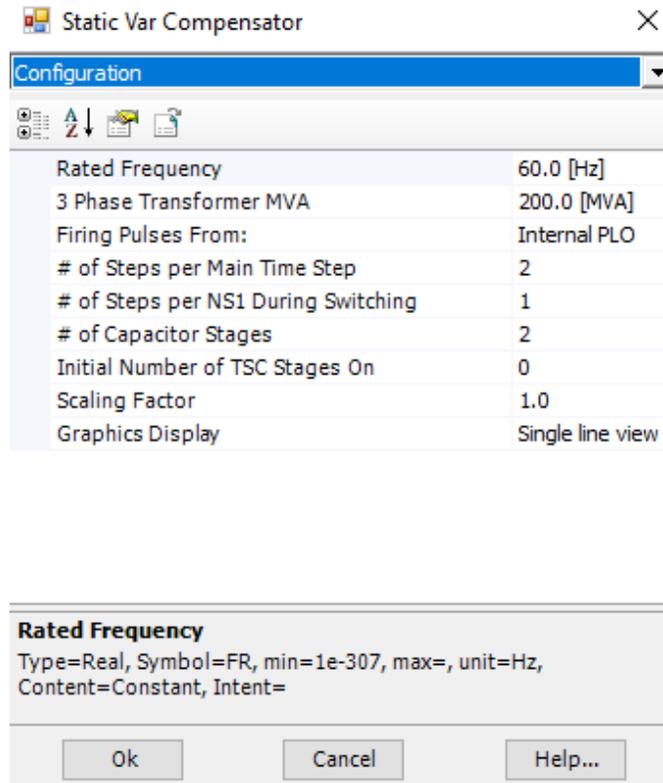


Figura 3.10 Valores del CEV en el Simulador PSCAD.

Los valores del TCR y TSC como la capacidad en MVAR, los MVA del transformador CEV, valor en pu y número de bancos de capacitores se muestran en la figura 3.11.

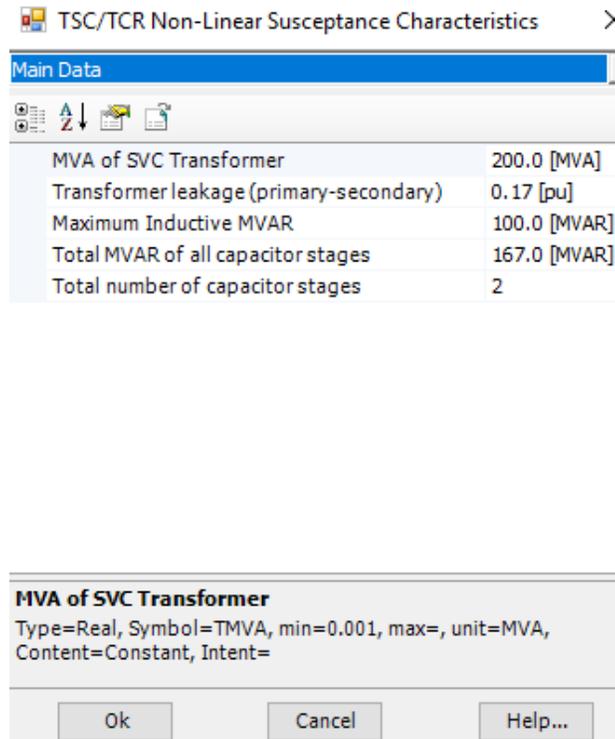


Figura 3. 11 valores de las Potencias del TSC/TCR en MVA.

En la figura 3.12 se muestran los valores generales del Modelo 1 (CEV) que es el utilizado para las pruebas.

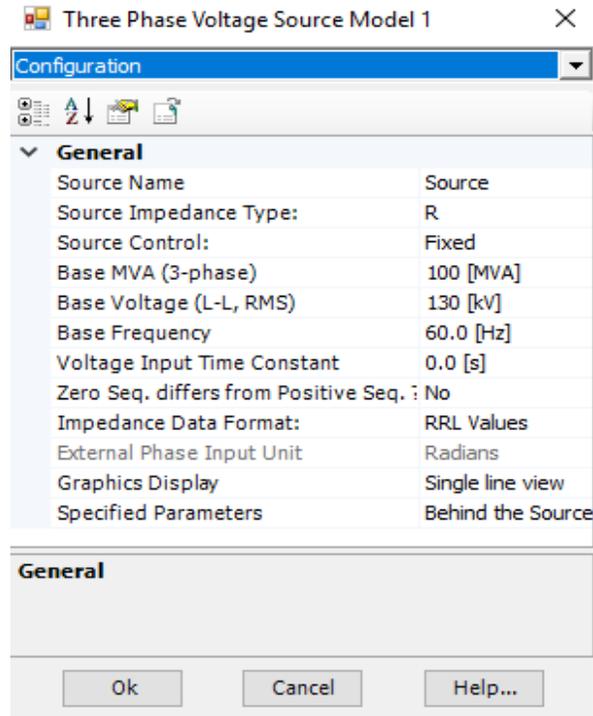


Figura 3.12 Voltaje del Modelo 1 del simulador PSCAD.

En las figuras 3.13 y 3.14 se muestran los valores detallados del CEV que son todos los que lo involucran y a cada una de sus partes.

Capítulo 3 Simulación del CEV con control tipo PID

master.svc:1728961202 X

Layers		Ports		Parameters		Computations			
Name	Caption	Type	Unit	Minimum	Maximum	Data	Value	F	^
FR	Rated Frequency	Real	Hz	1e-307		60.0 [Hz]	60.0	*	
Tmva	3 Phase Transformer MVA	Real	MVA	1e-006		200.0 [MVA]	200.0	*	
KFP	Firing Pulses From:	Choice				0	0	*	
NS1	# of Steps per Main Time S...	Integer				2	2	*	
NS2	# of Steps per NS1 During ...	Integer				1	1	*	
NCP	# of Capacitor Stages	Integer				2	2	*	
NCP0	Initial Number of TSC Stag...	Integer				0	0	*	
SCAL	Scaling Factor	Real		0		1.0	1.0	*	
View	Graphics Display	Choice				1	1	*	
GP	PLO Proportional Gain	Real		0		100.0	100.0	*	
GI	PLO Integral Gain	Real		0		900.0	900.0	*	
XIPS	Positive sequence leakage ...	Real	pu	1e-006	1	0.17 [pu]	0.17	*	
XIPD	Positive sequence leakage ...	Real	pu	1e-006	1	0.17 [pu]	0.17	*	
XISD	Positive sequence leakage ...	Real	pu	0	1	0.021 [pu]	0.021	*	
MTCR	Total Inductive MVARs of ...	Real	MVAR	0.0001		100.0 [MVAR]	100.0	*	
RD	Thyristor Snubber Resistan...	Real	ohm	0.001		1000.0 [ohm]	1000.0	*	
CD	Thyristor Snubber Capacit...	Real	uF	0.001		0.3 [uF]	0.3	*	
RON	Thyristor ON Resistance	Real	ohm	0.005		0.005 [ohm]	0.005	*	
ROFF	Thyristor OFF Resistance	Real	ohm	1		1.0E4 [ohm]	10000.0	*	▼

Aceptar Save as... Help...

Figura 3.13 valores del CEV en el simulador PSCAD.

MTSC	Combined MVARs of all C...	Real	MVAR	0.001		167.0 [MVAR]	167.0	*	
RTSC	Parallel Resistance across E...	Real	ohm	0.001		500.0 [ohm]	500.0	*	
MMIN	Minimum Total Capacitive...	Real	MVAR	0.001		0.001 [MVAR]	0.001	*	
VP	Rated Primary Voltage,L-L	Real	kV	0.1		120.0 [kV]	120.0	*	
ImP	Primary Magnetizing curre...	Real	%	0.0001	50	0.5 [%]	0.5	*	
VS	Rated Secondary Voltage,L...	Real	kV	0.1		12.65 [kV]	12.65	*	
ImS	Secondary Star Magnetizin...	Real	%	0.0001	50	0.5 [%]	0.5	*	
ImD	Secondary Delta Magnetizi...	Real	%	0.0001	50	0.5 [%]	0.5	*	
Xair	Air core reactance	Real	pu	0.001	1	0.4 [pu]	0.4	*	
Tdc	In rush decay time constant	Real	s	0.001		0.18 [s]	0.18	*	
Xknee	Knee voltage	Real	pu	0		1.7 [pu]	1.7	*	
Gloss	Shunt loss conductance	Real	mho	0		0.00001 [mho]	1.0e-005	*	▼

Aceptar Save as... Help...

Figura 3.14 valores del CEV en el simulador PSCAD.

3.3 Calculo de las variables de sintonización Kp, Kd y Ki por el método de Ziegler-Nichols.

En esta sección presentaremos las formas de obtener los valores óptimos de las constantes [P], [I], [D], de un controlador en base a los parámetros encontrados por experimentos hechos en el sistema.

Existen fundamentalmente 2 tipos de experimentos para reconocer un sistema, estos son de lazo abierto o respuesta al escalón y los de respuesta en frecuencia o lazo cerrado. Los experimentos deberán hacerse siempre midiendo el tiempo en segundos.

Para los 2 tipos de experimento se presentarán las fórmulas clásicas de Ziegler-Nichols y las más recientes (1994) desarrolladas por Astron y Hagglund. Estas fórmulas entregan los valores óptimos K, Ti, Td para la ecuación PID.

$$U(t) = K \left(E(t) + \frac{1}{T_i} \int E dt + T_d \frac{dE}{dt} \right) \quad (3.1)$$

3.3.1 Respuesta al escalón (Lazo abierto)

En esta sección desarrollamos un experimento para reconocer los parámetros del modelo de sistema de primer orden con tiempo muerto. En la práctica tendremos que modificar ligeramente este experimento para poder obtener resultados. Esto se debe a que nuestro modelo es una aproximación lineal y entonces habrá diferencias con el sistema real, por ej. el máximo valor de la derivada no estará exactamente en $t = L$. Además, no es recomendable (o ni siquiera posible) aplicar el 100% de potencia en forma continua y esperar a ver qué pasa.

Con esta experimentación se obtendrá una curva parecida a la de la figura 3.15 y bajo estas notaciones se obtendrán las variables necesarias para esta sintonización.

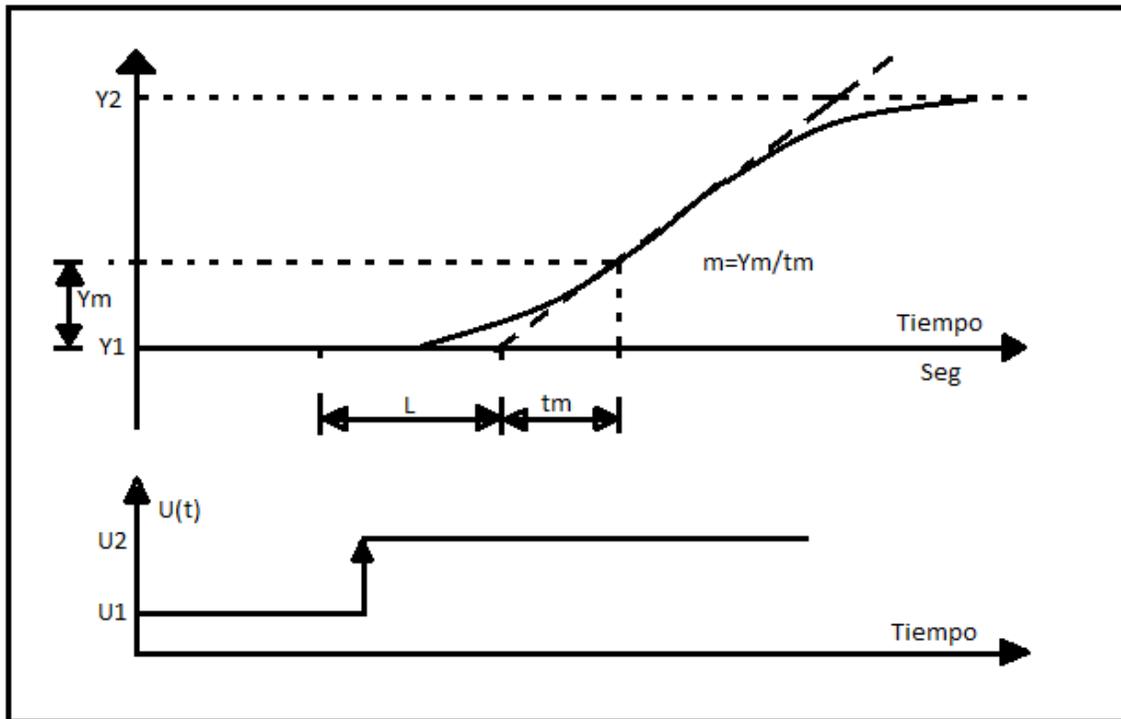


Figura 3.15 Curva utilizada para la Sintonización. (R. Mohan Mathur)

3.3.2 Fórmulas de Ziegler-Nichols para “respuesta al escalón” Para aplicar Ziegler-Nichols

solo requerimos usar L y m , no hace falta saber K_p , lo que es una ventaja si no queremos esperar a que el sistema llegue a su valor final una vez aplicado el escalón en la entrada. Calculando previamente: $a = m \cdot L$

Como primer paso de la sintonización se requiere una prueba de lazo abierto al sistema en escalón unitario, es decir que la planta se debe de accionar con una señal proporcional a la original, pero en un sistema sin controlador, esto generara una señal que será el sistema con el que se trabajara.

Primeramente, se traza una línea tangente a la curva en el punto de la segunda derivada del comportamiento de la curva de restablecimiento de la tensión gracias al controlador PID.

K_p = ganancia estática (static gain)

Es la ganancia o amplificación del sistema para una entrada constante (ganancia DC)

L = tiempo muerto (death time)

Es el tiempo que transcurre desde que se provoca un cambio en la entrada hasta que aparece algún cambio en la salida.

T= tiempo característico (characteristic time)

Como su nombre lo dice, es un tiempo característico del sistema de primer orden. Se puede pensar como el tiempo que toma a la salida cambiar un 63% de su cambio total, cuando se aplica un cambio en la entrada.

Función de transferencia.

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K_P e^{-sL}}{1+Ts} \quad (3.2)$$

Donde, siguiendo la notación común a todos los libros de texto:

y(s)= transformada de Laplace de la salida del sistema.

u(s)= transformada de Laplace de la entrada del sistema.

En la tabla 4 se muestran las constantes para el cálculo por el método de Ziegler-Nichols.

Tabla 4 Constantes de función de transferencia por el método "Ziegler-Nichols"

Ziegler-Nichols			
Método de respuesta al escalón			
Control	K	T_i	T_d
P	$\frac{1}{a}$		
PI	$\frac{0.9}{a}$	3.L	
PID	$\frac{1.2}{a}$	2.L	$\frac{L}{2}$

3.3.3 Cálculo de las constantes.

Como primer paso se manda una señal proporcional al sistema del valor en por unidad y se obtuvo la siguiente curva en donde se trazaron líneas representativas del tiempo de compensación y de liberación de falla, así como se trazó la curva de máxima pendiente en el punto de inflexión de la curva de subida como se muestra en la figura 3.16.

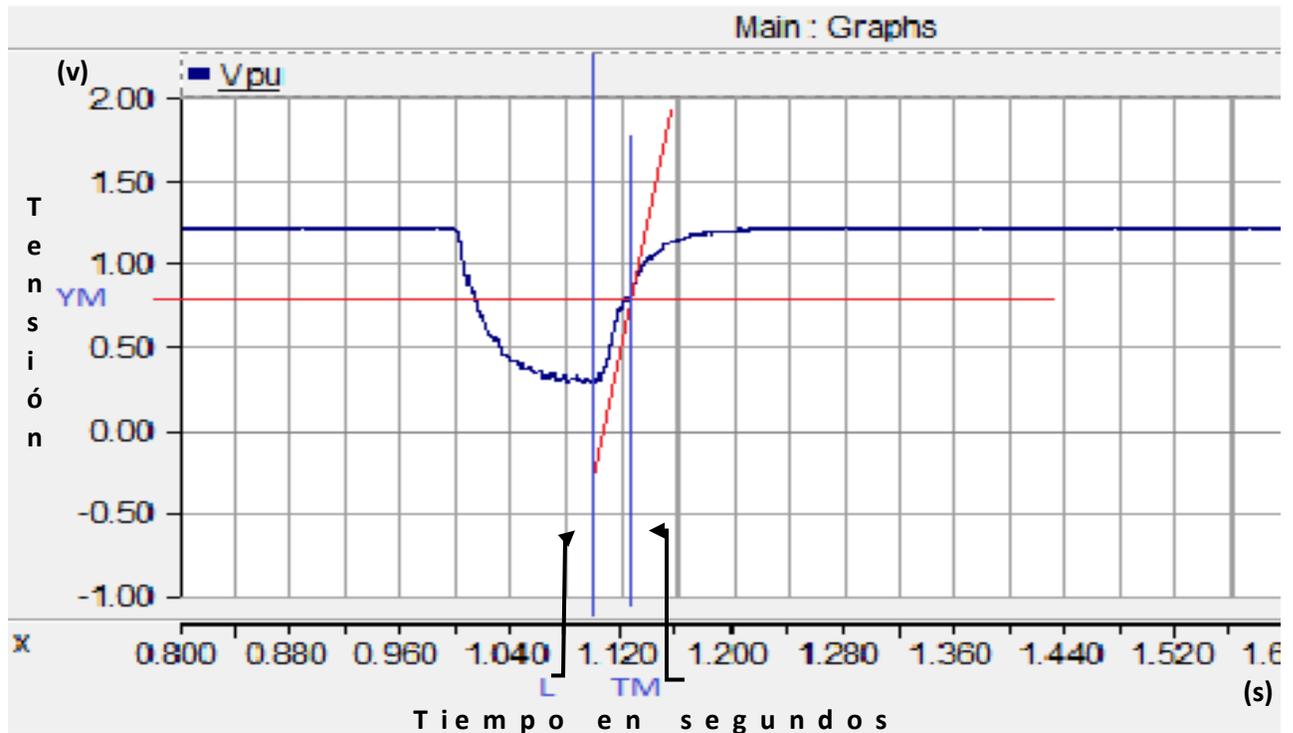


Figura 3. 16 Esquema de la obtención de las variables para el cálculo de la sintonización.

Con ayuda de los cursores se obtienen los posicionamientos de las tensiones Y2, Y1, L, U2, U1 y Ym, dando los siguientes valores:

$$Y2= 1.25$$

$$Y1= 0.30$$

$$U2= 0.75$$

$$U1= 0.55$$

$$L= 0.02$$

$$Kp = \frac{(Y2 - Y1)}{(U2 - U1)} = \frac{1.25 - 0.30}{0.75 - 0.55} = 4.75 \quad (3.3)$$

Pero este valor está considerado en por unidad y como se está trabajando en un sistema de 130Kv se hace la multiplicación quedando de la siguiente manera.

$$Kp = (4.75)(130) = 617.5 \quad (3.4)$$

Se calcula la pendiente en el punto quedando de la siguiente manera.

$$m = \frac{ym}{tm} = \frac{0.7}{0.1} = 7 \quad (3.5)$$

$$T = \frac{Kp}{m} = \frac{617.5}{585} = 1.05 \text{ seg} \quad (3.6)$$

$$a = (m)(L) = (585)(0.02) = 11.7 \quad (3.7)$$

Con estos valores encontrados es posible construir la función de transferencia del compensador estático de VAR's.

Pero primero se procede a calcular las variables con la tabla dada anteriormente quedando de la siguiente manera.

$$Kp = \frac{1.2}{a} = \frac{1.2}{11.7} = .1025 \quad (3.8)$$

$$Ti = 2L = 2(0.02) = 0.04 \text{seg} \quad (3.9)$$

$$Td = \frac{L}{2} = \frac{0.02}{0.01} = 0.01seg \quad (3.10)$$

Si se sustituyen los valores de la sintonización en la formula general (3.1) o equivalente del sistema PID queda de la siguiente manera.

$$Kp=.1025$$

$$KI=.04S$$

$$KD=.01S$$

En el siguiente modelo de la formula general antes mencionada (ecuación 3.1)

Se obtiene:

$$U(t) = .1025 \left(E(t) + \frac{1}{.04} \int E dt + .01 \frac{dE}{dt} \right) \quad (3.11)$$

Dándole los parámetros obtenidos en el proceso de sintonización de Ziegler-Nichols se obtuvo la siguiente aproximación, en donde se puede notar el considerable ajuste de la tensión en el sistema de por unidad, como se muestra en la figura 3.17, además de que se ve reducido el tiempo en el que el compensador lleva acabo el restablecimiento de la tensión que era el principal propósito de esta investigación.

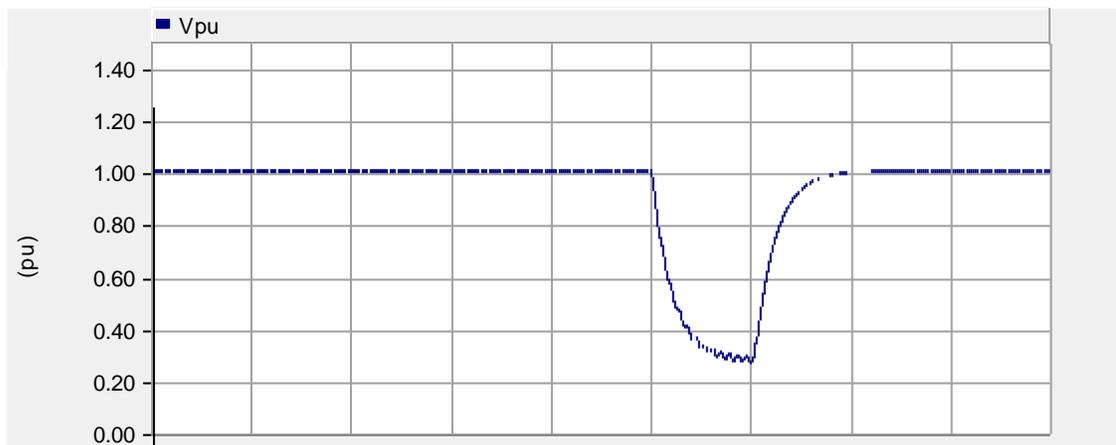


Figura 3. 17 ajuste de sintonización por el método de ziegler-nichols.

Capítulo 4 Análisis Económico

4.1 Introducción

Debido a que el compensador estático de VARS (CEV) es de gran importancia en el sistema eléctrico de potencia en este capítulo se analizará una aproximación de los costos que puede alcanzar la instalación o el mantenimiento de un CEV así como del control PID que estamos proponiendo en éste proyecto.

Como cualquier otro instrumento o elemento del SEP, durante el tiempo en que trabaja el compensador éste puede sufrir desgaste o daños en los tiristores por diversas causas esto debido a que en ocasiones operan hasta en años no se les da ningún tipo de mantenimiento y esto por consecuencia se refleja en que no tiene un funcionamiento óptimo. (Ruiz, 2017)

4.2 Alcances

Éste análisis tiene la finalidad de alcanzar una mayor eficiencia en su operación del CEV, lo cual permitirá una mayor seguridad, confiabilidad y eficiencia de la línea de transmisión, así como proporcionar un servicio más eficiente en la red eléctrica.

El proyecto tiene como alcance tener una operación más eficiente del compensador en la parte de control siempre buscando ahorros económicos.

4.4 Costos

Los datos obtenidos para éste análisis fueron extraídos de catálogos de la empresa ABB S.A de C.V.

Tabla 4 Costo de equipo para un CEV

Componentes	Descripción			
	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Importe
Válvulas de Tiristores	Pieza	1	\$1,524,000.00 USD	\$1,524,000.00 USD
Sistema de control	Pieza	1	\$3,173,000.00 USD	\$3,173,000.00 USD
Sistema de enfriamiento	Pieza	1	\$362,000.00 USD	\$362,000.00 USD

(Ruiz, 2017)

En el capítulo 3 se simularon las fallas en el CEV como el disparo de líneas. Como se observó al ocurrir la falla en el sistema los niveles de tensión se abaten y es ahí cuando el compensador estático de VARS juega un papel muy importante ya que éste se encarga de respaldar el nivel de tensión.

4.7 Consideraciones Económicas en la Aplicación del CEV

Durante la planeación y realización de las fases de estudio de un proyecto, los costos de estimación juegan un rol muy importante y generalmente son requeridos junto con toda la demás información correspondiente (por ejemplo, estudios técnicos, etc.), todos estos factores suelen incrementarse en mayor exactitud conforme el proyecto progresa. En esta sección se mencionará los principales factores a considerar, y que tienen un impacto directo en el costo e implementación de dispositivos CEV's, así como en los dispositivos FACTS en general.

El costo de proporcionar potencia reactiva incluye costos de capital, así como los costos de operación. Los costos de capital para fuentes de potencia estáticas como son los capacitores, son mucho menores que los costos de capital para las fuentes dinámicas, tales como CEVS, STATCOM, etc. Los dispositivos estáticos [Li et al., 2006]. Los costos de capital pueden variar significativamente dependiendo del tipo de equipo, requerimientos de operación, magnitud, voltajes en el sistema de transmisión, requerimientos del terreno, tiempo de construcción, método de financiamiento del proyecto y algunos otros factores específicos. Generalmente los costos de inversión en dispositivos FACTS pueden clasificarse dentro de dos categorías: a) costos en equipo del dispositivo, y b) costos en la infraestructura necesaria. (IEEE, 1996)

a) Costos en equipo del dispositivo. Los costos en equipo dependen no solo de la magnitud de la instalación, sino también de ciertos requerimientos especiales tales como:

- Redundancia en el control y en el sistema de protección, incluso de ciertos componentes tales como reactores, capacitores, transformadores, etc.
- Condiciones sísmicas
- Condiciones ambientales (temperatura, nivel de contaminación, etc.); y
- Comunicación con la estación de control del sistema, o con algún centro de control regional y/o nacional.

b) Costos en la infraestructura necesaria.

Los costos de infraestructura dependen del lugar de localización donde vaya a ser instalado los dispositivos FACTS. Estos costos pueden incluir

- Adquisición del terreno, si hay insuficiente espacio en la subestación existente.
- Modificaciones en la subestación existente, por ejemplo, si un nuevo interruptor de alta tensión es requerido.
- Construcción de algún otro inmueble para el equipo interior (sistemas de control, protección, interruptores tiristor, equipo auxiliar, etc.)

4.8 Costos de los elementos del CEV.

Los costos de capital en la instalación de CEV como ya se ha mencionado varían significativamente dependiendo de los requerimientos del equipo a usar, el sistema en donde se ha de instalar y las condiciones del lugar. Los costos en porcentajes de los factores principales de un dispositivo CEV, se muestran en la Figura 4.19 donde se puede observar el costo para cada factor, los cuales se clasifican por mayor categoría. Debido a la naturaleza de cada instalación y en virtud de que hay variación en los requerimientos de cada una de ellas, el porcentaje en costos con relación a los que se muestran en la gráfica de la Figura 4.1 pueden llegar a variar, no obstante, se estima

que esta variación pueda ser de hasta un 5% en cada categoría, esto nos permite darnos cuenta de la magnitud en costos de inversión por cada categoría para la instalación del proyecto del CEV. (IEEE, 1996)

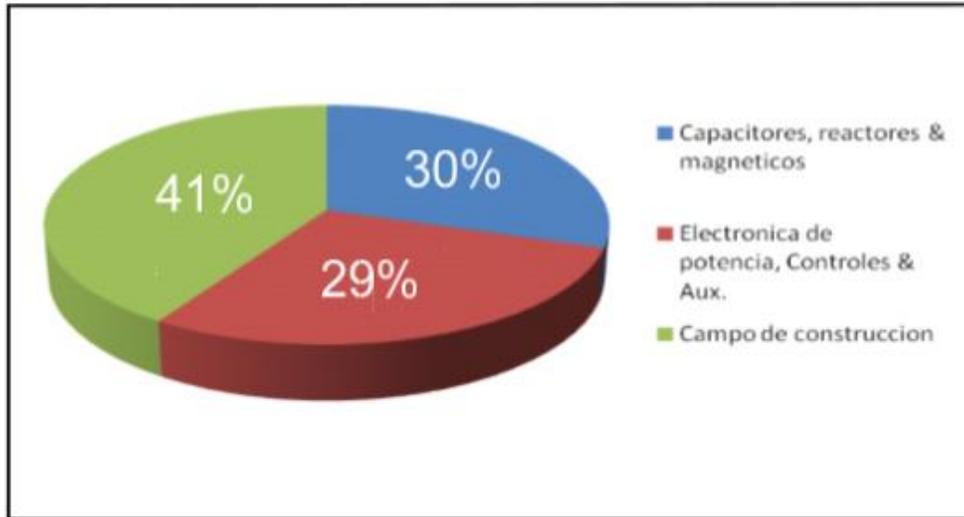


Figura 4.1 Costos de los Elementos del CEV. (IEEE, 1996)

Los costos típicos para los dispositivos CEV's incluyendo la instalación y las comisiones necesarias se resumen de manera global en la Tabla 4.1. El trabajo civil o mano de obra podría agregar un 15% adicional a lo que se muestra a continuación.

Tabla 4.1 Tendencia en costos del CEV (Adaptado de (IEEE, 1996). Rango (MVAR) \$/KVAR Menor a 100 \$ 35-55 (sin transformador) Mayor a 100 \$ 25-50 (con transformador).

Las instalaciones que se emplean para compensación de potencia reactiva pueden ser de varias formas (MSC, MSR, dispositivos FACTS, etc.) y cada alternativa que se llega a utilizar resulta necesario evaluarla en cuanto a pérdidas se refiere, ya que muchas veces las magnitudes de estas pérdidas llegan a ser igual a los costos de capital del equipo y por lo tanto es indispensable saber que tan rentable puede ser el empleo de algún método de compensación. Los resultados a los que se puede llegar, tienen gran importancia pues influyen directamente en la selección del diseño del equipo.

4.8.1 Evaluación de las pérdidas económicas debido al uso de un Compensador Estático de VARS.

El costo en pérdidas del CEV incurridas durante la operación del equipo en el sistema de potencia, influye en el significado del costo final del CEV para el usuario. Estas pérdidas se evalúan para cierto rango de condiciones específicas de operación previstas para el CEV. Las pérdidas del CEV a evaluar, deben incluir las pérdidas individuales de cada uno de los componentes que conforman al compensador (transformadores, reactores, capacitores, interruptores tiristor) y algún otro equipo auxiliar en la instalación del CEV (CIGRE, 1986).

El siguiente método propuesto es para evaluar las pérdidas en el CEV proporciona una flexibilidad y optimización en el diseño del equipo y por lo tanto reduce el costo total del CEV. Para esto el usuario, previo a un análisis, puede especificar la duración de tiempo de potencia reactiva de salida del CEV $\Delta t_i = f(Q_i)$. Entonces para un periodo dado $\sum \Delta t_i$ y el valor capitalizado k de pérdidas de potencia activa P_L , el costo total de las pérdidas P_L del CEV se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Costo en Pérdidas} = K \frac{\sum P_L(Q_i, Q_k) \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i} \quad (4.1)$$

Con el propósito de ilustrar y para una mayor comprensión de este método, analizamos en base a la curva típica de pérdidas de un compensador tipo TCR/TSC su efecto en el costo total de las pérdidas, Figura 4.2. Las líneas punteadas horizontales que pasan a través de los puntos PLA, PLB y PLC indican el promedio en pérdidas en la operación del CEV en el rango de potencia reactiva de salida correspondiente. Entonces, si el CEV opera para un periodo de tiempo de Δt_A en el rango reactivo de salida A, Δt_B en el rango reactivo de salida B y Δt_C en el rango reactivo de salida C. El costo total de las pérdidas en el CEV para el periodo de tiempo total se calcula como;

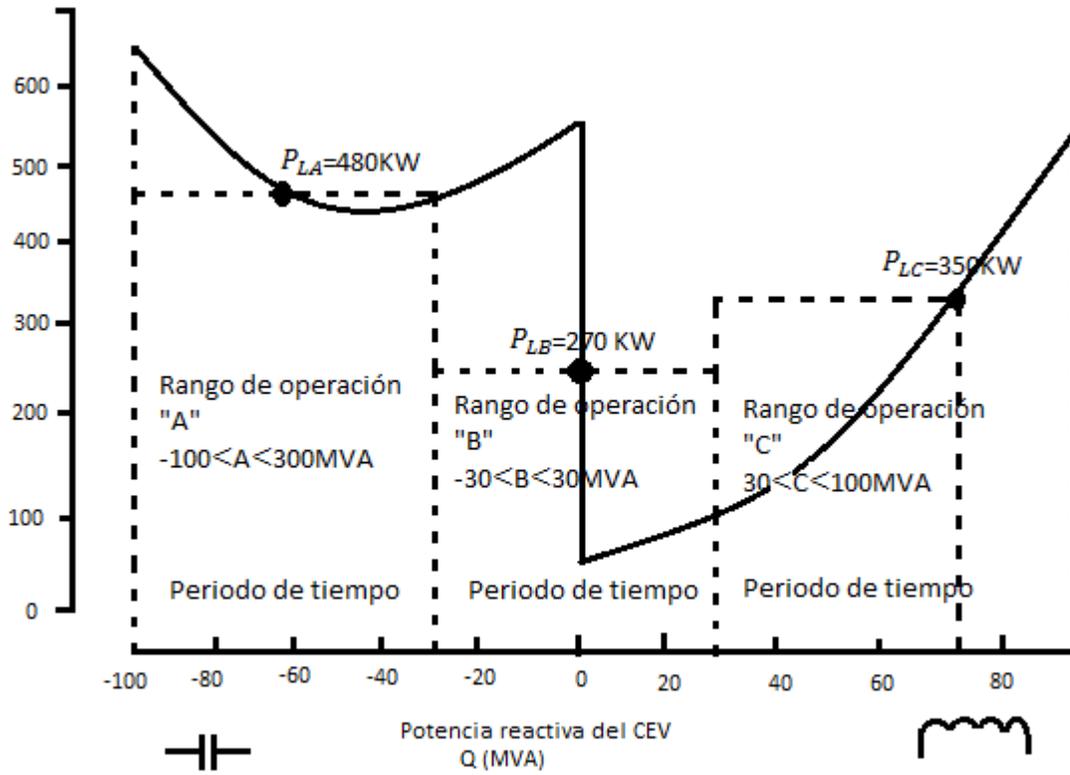


Figura 4. 2 Costo en Pérdidas

Dada la información presentada en la Figura 4.2, y asumiendo que $\Delta tA=0.2$ p.u., $\Delta tB=0.55$ p.u., $\Delta tC=0.25$ p.u. representan los periodos por unidad de operación del CEV en rangos de salida A, B y C respectivamente.

4.9 Justificación Económica

El principal beneficio que se encontró con el cambio del controlador tipo PI al PID fue que en la curva se abate el sobretiro y se reduce el tiempo de restablecimiento de la tensión en el sistema de por unidad, esto permite que en el sistema se pueda quitar un banco de capacitores de los dos con los que el sistema bus infinito estaba diseñado.

Se puede notar en la curvatura de la figura 4.3 se activan con el sobretiro los dos bancos de capacitores.

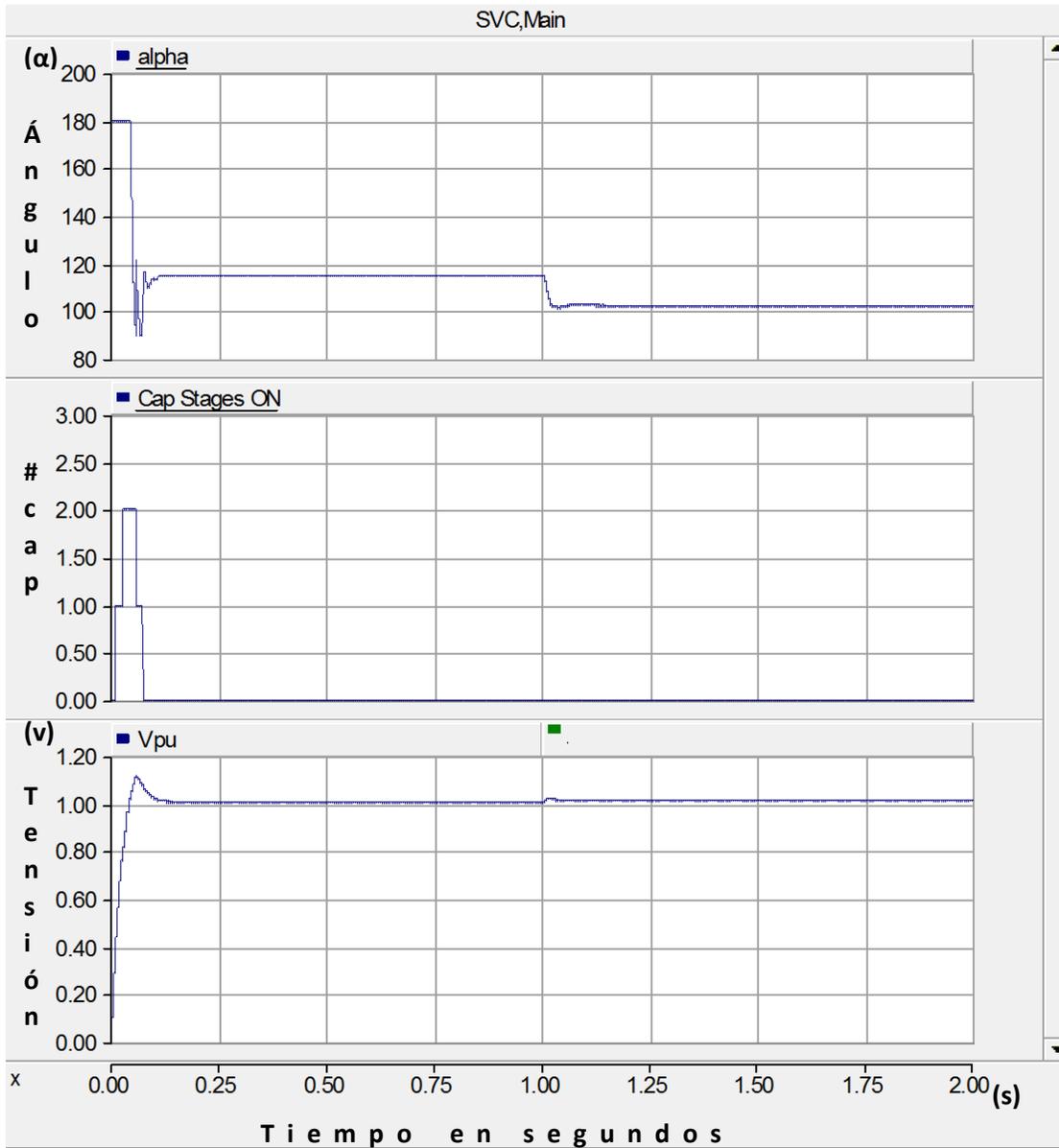


Figura 4. 3 Activación de los dos bancos de capacitores

En la curvatura de la figura 4.4 Se nota claramente como el sistema deja sin activación a uno de los bancos de capacitores, probando así que es un tanto más barato en cuanto a material un sistema de control tipo PID.

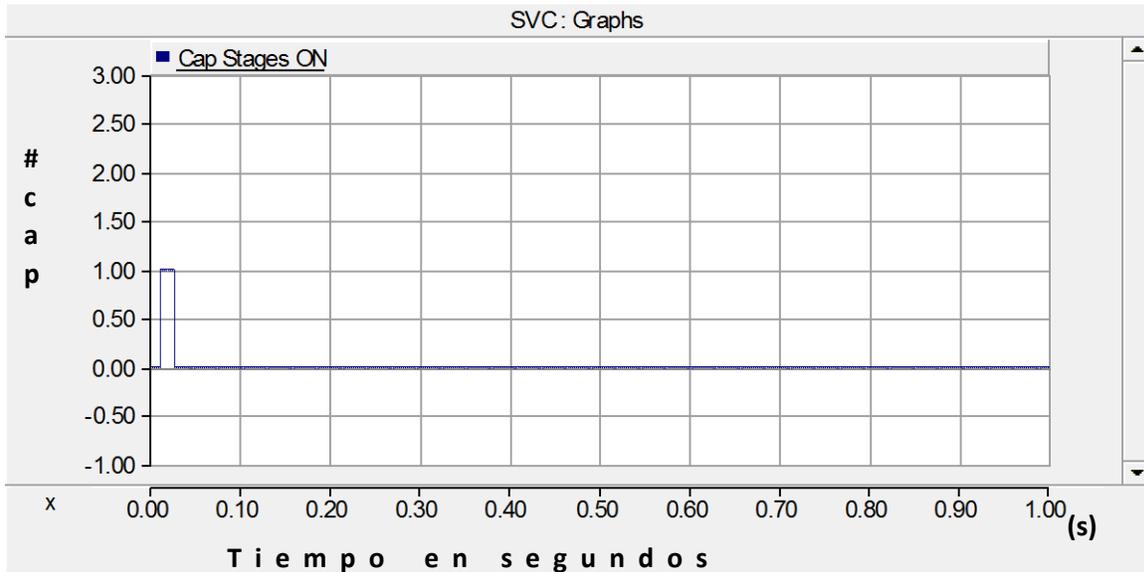


Figura 4. 4 Activación de un solo banco de capacitores con controlador PID

En la figura 4.5 Se hace la comparación del tiempo de restablecimiento de la falla al sistema de por unidad, aunque este es muy poco es considerable ya que el sistema es un bus infinito y se espera al tener una carga aumentar este tiempo o una distorsión.

Es importante dentro de la comparativa de los controladores ver los tiempos de restablecimiento de la tensión, para esto fue necesario alinear las curvas, y por medio

de un cursor notar visualmente que el controlador tipo PID tiene un tiempo de restablecimiento más corto; que, aunque no es mucho es un resultado satisfactorio.

Esta comparativa se muestra en la figura 4.5 que representa las tensiones de los dos controladores.

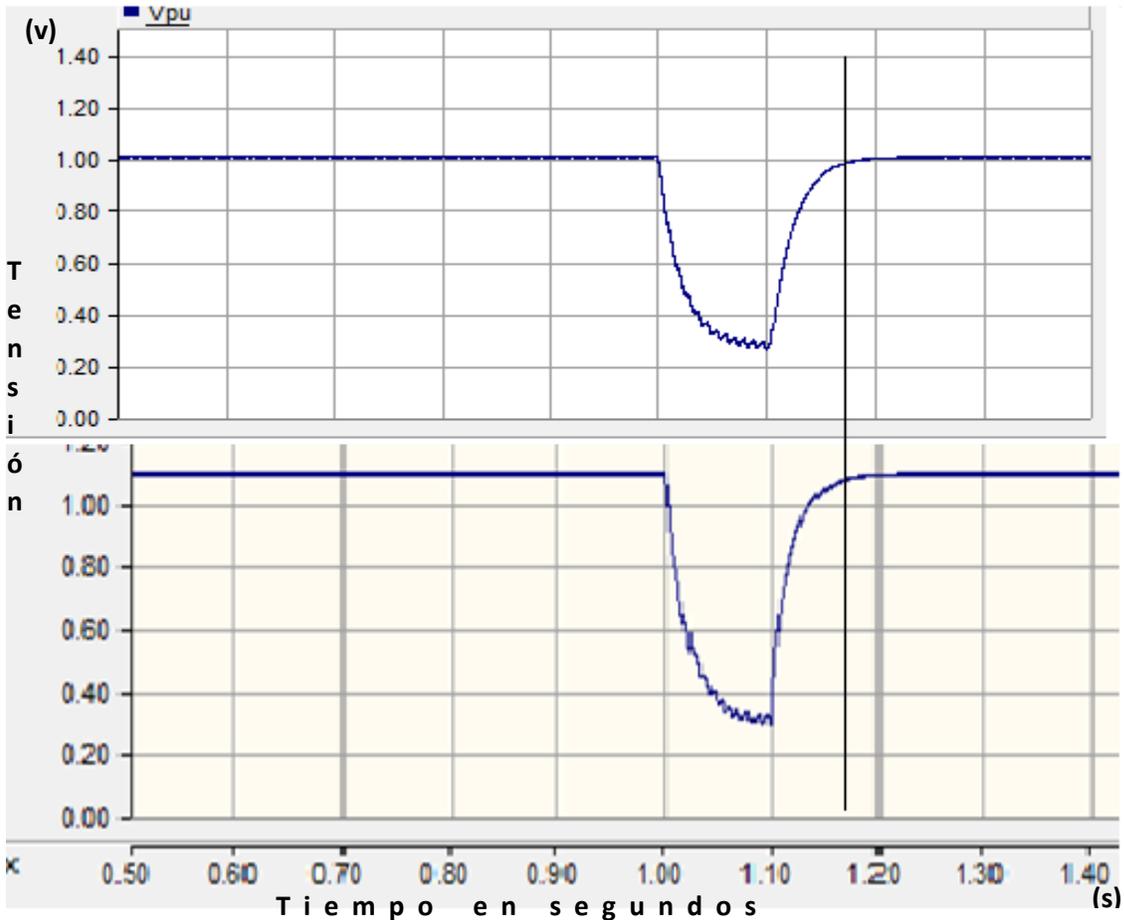


Figura 4. 5 Comparación de tiempo de restablecimiento de los controles PID contra PI.

Para el análisis de este trabajo se centró en la parte del control del CEV en donde se cambió el tipo de controlador PI a PID en el simulador PSCAD, pero, aunque el sistema de control ha cambiado el modulo que contiene el algoritmo sigue siendo el mismo ya que la mayoría de los módulos de control contiene la opción de manejar las tres variables (Proporcional, Integral y Derivativo).

Lo que hace que este tipo de control sea mejor pues las características de este nos ayudan a que el CEV sea más rápido y robusto utilizando el mismo sistema ya instalado en cuanto a control.

Para finalizar se puede argumentar por medio de las pruebas realizadas que el ahorro se hace en que se reduce la utilización de un banco de capacitores, pues al sistema de control no se le añade ni quita nada en cuanto a costos económicos.

Conclusiones

Hay distintas formas de controlar el correcto accionamiento del banco de capacitores y del banco de reactores del compensador estático de VARS, la cuestión es cuál es el mejor, con esta investigación se pudo comprobar que un controlador PID (proporcional integral derivativo) es una técnica de control mucho más eficiente que el PI (proporcional integral), esto se debe a su tercer variable en el tiempo derivativo que es un adelanto al error que existe dentro del sistema, este adelanto permite al controlador predecir en que momento el sistema tendrá una falla, además de que le proporciona una finura de ajuste a la curva en cuanto esta se restablezca lo que es muy importante, ya que grandes variaciones dentro de este ajuste podrían provocar falsos accionamientos del dispositivo CEV.

En términos de unidades se logró demostrar que el control del tipo PID es mejor que el PI cuando se tiene un abatimiento de la tensión ya que fue la prueba que se realizó en este trabajo, cuando se tiene la tensión en p.u (por unidad) el valor normal de la tensión es 1, cuando se abate la tensión puede bajar hasta 0.8, con el control PI anteriormente se tenía un sobre tiro que pasaba el 1 por poco, y ya con el control PID ese sobretiro ya no se queda permanente y se logra establecer exactamente en 1 la tensión del sistema, además de que se reduce el tiempo en que la tensión llega a su valor nominal pues con el control PI la falla dura 0.2 segundos y con el control PID la falla 0.18 segundos.

En el momento en que se realiza matemáticamente y se conecta este controlador al sistema, es importante llevar a cabo el proceso de sintonización; este proceso es la elección de las constantes K_p , K_i y K_d y cada una de estas constantes tiene un propósito. La constante K_d es un multiplicador que le dará el principal acercamiento de ajuste a la señal de referencia, si es muy pequeño no se verá cercano y tendrá un intervalo de error muy grande, lo mismo si el valor supera la señal de referencia. La constante K_i es una constante de tiempo en cuanto al integrador, esto con el propósito de efectuar la suma de todos los errores que transcurren en el salto principal pero aun así este valor con el de referencia tendrán un poco de discrepancia. La constante K_d es un valor de tiempo que se le dará al factor derivativo que calcula el cambio o variación que exista en el sistema permitiendo contrarrestarlo dándole mayor finura al control.

Este proceso de sintonización se realizó utilizando el método de Ziegler-Nichols, el cual es el método más utilizado no solo en los CEV si no en cualquier sistema de control ya que no requiere conocer la planta ni la función de transferencia, con una simple prueba de escalón con una señal múltiplo de la real se obtiene una curva y bajo esa curva se obtienen variables que con una algebra muy simple y una tabulación proporciona las constantes buscadas.

Este control tan estricto del compensador debe de existir, ya que si no lo hace se puede convertir en una problemática muy grande. El CEV se utiliza en cuanto existe una alteración de la tensión en el SEP que puede ser provocada por cualquier falla, cuando la tensión se abate el sistema requiere de un impulso para poder reestablecerse y la inyección de potencia reactiva en forma de corriente lleva a cabo este impulso o compensación.

Referencias

- ABB Power Systems. (1999). *Información Compensación de Potencia Reactiva*. Västerås, Suecia.
- Barrera, J. P. (agosto 2008). *Mantenimiento y Simulación de Dispositivos FACTS para Estudios Electricos de Estado Estable*. Medellin.
- bolton, W. (s.f.). *Ingenieria de control*.
- Camilo Jose Carrillo Gonzalez, J. C. (2003). *Compensadores Estaticos de Potencia Reactiva (SVC)*. Vigo.
- CFE. (Mayo 2016). *Compensador Estatico de Potencia Reactiva (CEV)* . Especificacion CFE K0000-24.
- Concordia, J. B. (s.f.). *Analysis of series capacitors application problem*. IEEE.
- Coronel Mercado Luis Enrique Rodruiguez Rivas, J. J. (Mayo 2012). *Simulación del Compensador Estatico de Var de la Subestación de Culiacan Tres para el analisis de Transitorios*.
- Garcia, D. F. (s.f.). *Analisis de Sistemas de Potencia*. Mexico, DF., Mexico: Depto. Investigación y Desarrollo Centro Nacional de Control de Energia CFE.
- Guk C. Cho, *. G. (s.f.). *Control of Static VAR Compensator (SVC)*.
IEEE. (1996). *IEEE*.
- Jiménez, M. e. (Agosto 2003). *Analisis de Dispositivos FACTS (CEV,CSCT y UPFC) para Interacciones Torsionales Subsincronas de Turbogeneradores en Sistemasa Eléctricos de Potencia*. Mexico DF.
- John J. Grainger, W. D. (s.f.). *ANALISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA*.
- Jr., J. J. (s.f.). *Analisis de Sistemas de Potencia*. Carolina: State University.
- Juanjuan Wang, C. F. (Abril 2008). *SVC Control System Bsed on Instantaneous Reactive Power Theory and Fuzzy PID*. IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- Murtaza Farsadi1, F. M. (s.f.). *Applying Recurrent Neural Networks to Static VAR Compensator*. Iran: IEEE.
- Narain G Hingorani, L. G. (2000). *UNDERSTANDING FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Power Engineering Society.
- Ogata, k. (s.f.). *Ingenieria de control moderna*. tercera edicion.
- Padiyar, K. (s.f.). *FACTS controllers in power transmission and distribution*. Ansari Road.
- R. Mohan Mathur, R. K. (s.f.). *THYRISTOR-BASED FACTS CONTROLLERS FOR ELECTRICAL TRANSMISSION SYSTEMS*. IEEE Press.
- R.K, M. M. (s.f.). *Thyristor based Facts Controllers For Electrical Transmission Systems*. IEEE .
- rashid. (2000). *electronica de potencia*. cdmx: princeton.
- Rehtanz-B, X.-P. Z. (2006). *Flexible AC transmission systems*. New York: splinger.

Ruiz, L. A. (2017). *Analisis de la modernizacion del compensador estatico de VARS de la subestacion Texcoco*. CDMX.

Verma, K. G. (2006). *Impact on Real and Reactive Power Pricing in Open Power Market Using Unified Power Flow Controller*. IEEE Transactions on Power Systems.

Woodford, D. (s.f.). *Applications of PSCAD/EMTDC*. Canada: Manitoba HVDC.

Anexos

ANEXO 1

NORMAS QUE APLICAN PARA UN CEV

NOM-008-SCFI-2002

SISTEMA GENERAL DE UNIDADES DE MEDIDA

CFE G0000-62-2013

ESQUEMAS NORMALIZADOS DE PROTECCIONES PARA
TRANSFORMADORES, AUTOTRANSFORMADORES Y REACTORES
DE POTENCIA.

ESQUEMAS DE PROTECCIÓN DE UN CEV

ZONA DE PROTECCIÓN	FUNCIÓN DE PROTECCIÓN Y TIPO	ESPECIFICACIONES QUE APLICAN
BUS BAJA TENSIÓN	FALLA A TIERRA EN BAJA TENSIÓN	CFE G0000-81
BANCO DE TRANSFORMADORES	PROTECCIÓN SOBRE Y BAJA TENSIÓN.	CFE G0000-81
RAMAS TCR/TSR	-DIFERENCIAL DE ALTA IMPEDANCIA. -SOBRECORRIENTE DE 3 FASES. -SECUENCIA NEGATIVA (RESPALDO PARA FALLA EN EL CONTROL DE PULSOS DE DISPARO DE LOS TIRISTORES).	CFE G0000-81
RAMAS TSC	-SOBRECARGA -SECUENCIA NEGATIVA (RESPALDO PARA FALLA EN EL CONTROL DE PULSOS DE DISPARO DE LOS TIRISTORES).	CFE G0000-81/IEC60871-3

FILTROS	-PROTECCIÓN POR DESBALANCE EN DOS ETAPAS CON AJUSTES INDEPENDIENTES: ALARMA POR FALLA INCIPIENTE Y DISPARO POR FALLA DE UNIDADES CAPACITIVAS CUANDO LA TENSIÓN REBASA LA TENSIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN DE LAS UNIDADES CAPACITIVAS.	CFE G0000-81/IEC60871-3
---------	---	-------------------------

(CFE, Mayo 2016)