



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA - DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO

**Regulación de Frecuencia en Sistemas de
Potencia mediante la Integración de TCSC y
Enlaces Híbridos AC/DC**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

PRESENTA:

Daniela María Carrillo Gutiérrez

DIRECTOR:

Dr. Claudio Fuerte Esquivel



**Morelia, Michoacán, México.
FEBRERO 2026**



REGULACIÓN DE FRECUENCIA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE TCSC Y ENLACES HÍBRIDOS AC/DC

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la **Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de Daniela María Carrillo Gutiérrez**

Dr. Fernando Ornelas Tellez
Presidente del Jurado

Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel
Director de Tesis

Dr. Alejandro Zamora Méndez
Vocal

Dr. Jaime Cerda Jacobo
Vocal

Dr. Cesar Ángeles Camacho
Revisor Externo (UNAM)

Dr. J. Aurelio Medina Rios
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas)*

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Febrero 2026

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. Claudio R. Fuerte Esquivel por su dedicación, paciencia y mentoría constante a lo largo del desarrollo de este trabajo. Gracias por el tiempo brindado, por la orientación rigurosa y por el acompañamiento académico que fue fundamental durante este proceso. Agradezco especialmente sus enseñanzas, las cuales me permitieron comprender la importancia del rigor científico, la claridad en el trabajo intelectual y la solidez en la argumentación matemática y teórica.

Extiendo mi agradecimiento a los integrantes de la mesa sinodal: Dr. Fernando Ornelas Téllez, Dr. Alejandro Zamora Méndez, Dr. Jaime Cerda Jacobo y Dr. César Ángeles Camacho, por sus valiosos comentarios, observaciones y sugerencias, los cuales contribuyeron significativamente al enriquecimiento y fortalecimiento de este trabajo.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de posgrado, el cual hizo posible la culminación de esta etapa académica.

A mi padre, Ricardo Alfredo Carrillo Calderón, por su apoyo incondicional, por motivarme siempre a continuar mis estudios y por todo el amor y respaldo brindado en cada etapa de mi formación. A Luisa Ireri Chávez Franco, por su cariño constante y por acompañarme con paciencia y comprensión durante este proceso.

Agradezco también a mi familia, a mi hermana y a mi pareja, Kristian Gochi, por su amor, apoyo y por constituir una red sólida en los momentos más exigentes. De igual manera, agradezco a mi amiga Herlinda, a mis compañeros y amistades, quienes fueron un pilar fundamental para no rendirme y cuyo intercambio intelectual enriqueció profundamente mi formación académica y personal.

Resumen

El crecimiento continuo de la demanda eléctrica y la creciente integración de generación renovable imponen mayores desafíos en la regulación carga-frecuencia de sistemas eléctricos multiárea. La variabilidad operativa y los desbalances entre generación y demanda afectan directamente la estabilidad de frecuencia, la cual constituye un indicador fundamental del estado dinámico del sistema.

En esta tesis se analiza el impacto de la incorporación de un compensador serie controlado por tiristores y de un enlace híbrido de corriente directa de alta tensión, integrados como actuadores suplementarios dentro de un esquema de control automático de generación basado en el error de control de área y controladores proporcional-integral. Se desarrolló el modelado matemático de cada tecnología y su integración dentro del lazo de control, evaluando su desempeño en un sistema térmico simétrico de dos áreas. Las pruebas se realizaron considerando perturbaciones de carga tipo escalón del 10 % y 20 % en las áreas, con el objetivo de analizar la respuesta dinámica del sistema.

Se analiza la comparativa con el esquema convencional y la inclusión de dispositivos basados en electrónica de potencia permite mejorar la capacidad de recuperación del sistema ante una perturbación. Asimismo, se observó que el desempeño depende del tipo de tecnología empleada.

La implementación coordinada de dispositivos como el compensador serie controlado por tiristores y el enlace híbrido de corriente directa de alta tensión dentro del esquema de regulación carga-frecuencia procura incrementar la robustez dinámica multiárea frente a escenarios de alta variabilidad operativa, al fortalecer la capacidad de amortiguamiento del sistema y mejorar la respuesta dinámica ante perturbaciones de carga.

Palabras clave: Regulación carga-frecuencia, Control Automático de Generación (AGC), Error de Control de Área (ACE), sistemas eléctricos multiárea, TCSC, enlace híbrido HVDC, estabilidad de frecuencia, control PI.

Abstract

The continuous growth of electricity demand and the increasing integration of renewable generation impose greater challenges on load–frequency regulation in multi-area power systems. Operational variability and imbalances between generation and demand directly affect frequency stability, which constitutes a fundamental indicator of the system’s dynamic state.

In this thesis, the impact of incorporating a thyristor-controlled series compensator and a hybrid high-voltage direct current link, integrated as supplementary actuators within an automatic generation control scheme based on the area control error and proportional–integral controllers, is analyzed. The mathematical modeling of each technology and its integration within the control loop were developed, evaluating their performance in a symmetric two-area thermal system. The tests were carried out considering 10% and 20% step load perturbations in the areas, with the objective of analyzing the system’s dynamic response.

A comparative analysis with the conventional scheme is conducted, and the inclusion of power-electronics-based devices allows improving the system’s recovery capability following a disturbance. Likewise, it was observed that the performance depends on the type of technology employed.

The coordinated implementation of devices such as the thyristor-controlled series compensator and the hybrid high-voltage direct current link within the load–frequency regulation scheme seeks to increase multi-area dynamic robustness under scenarios of high operational variability by strengthening the system’s damping capability and improving the dynamic response to load disturbances.

Índice general

Lista de Abreviaturas	9
Lista de Símbolos	10
1. Introducción	12
1.1. Revisión del Estado del Arte	13
1.2. Hipótesis	15
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo General	15
1.3.2. Objetivos Particulares	15
1.4. Justificación	16
1.5. Metodología	16
1.6. Estructura de la Tesis	17
2. Modelado Dinámico y Control para Regulación de Frecuencia	19
2.1. Modelado de Espacio de Estados	19
2.2. Comportamiento Dinámico de la Frecuencia en Sistemas de Potencia	23
2.3. Control Automático de Generación	27
2.3.1. Sistema del cambiador de velocidad y gobernador	27
2.3.2. Modelado de Turbina	30
2.3.3. Modelo del Generador y Carga	34
2.4. Áreas de Control	36
2.4.1. Área Aislada	36
2.4.2. Resultados de Área Aislada	37
2.4.3. Áreas Interconectadas	38
2.5. Resultados de Sistema de Dos Áreas Interconectadas	41
2.6. Conclusiones	44
3. Inclusión de Controladores Basados en Electrónica de Potencia para el Control de Frecuencia	45
3.1. Descripción del Compensador Serie Controlador por Tiristores (TCSC)	45
3.1.1. Modelado Matemático del Dispositivo	46
3.1.2. Inclusión en el Problema de Control de Frecuencia	49
3.1.3. Resultados	52
3.2. Análisis de Sensibilidades considerando el TCSC	54

3.2.1.	Modificación en la Constante de tiempo del Sistema $T_{ps} = 10$	54
3.2.2.	Modificación en la Constante de tiempo del Sistema $T_{ps} = 30$	55
3.2.3.	Modificación en la Ganancia del Sistema $K_{PS} = 80$	56
3.2.4.	Modificación en la Ganancia del Sistema $K_{ps} = 100$	57
3.2.5.	Modificación en el estatismo del gobernador $R = 1.2$	58
3.2.6.	Modificación en el estatismo del gobernador $R = 4$	59
3.2.7.	Modificación en el sesgo de frecuencia $\beta = 0.75$	60
3.2.8.	Modificación en el sesgo de frecuencia $\beta = 0.25$	61
3.2.9.	Incremento del coeficiente de sincronización	62
3.2.10.	Reducción del coeficiente de sincronización	63
3.3.	Enlace de Corriente Continua en Alta Tensión (HVDC)	64
3.3.1.	Incorporación del Enlace HVDC en Sistemas Multiarea	65
3.3.2.	Resultados	71
3.4.	Análisis de Sensibilidades	73
3.4.1.	Modificación en la constante de tiempo del sistema $T_{ps1} = 10$	73
3.4.2.	Modificación en la constante de tiempo del sistema $T_{ps} = 30$	74
3.4.3.	Modificación en la ganancia del sistema $K_{PS} = 80$	75
3.4.4.	Modificación en la ganancia del sistema $K_{ps} = 100$	76
3.4.5.	Modificación en el estatismo del gobernador $R = 1.2$	77
3.4.6.	Modificación en el estatismo del gobernador $R = 4$	78
3.4.7.	Modificación en el sesgo de frecuencia $\beta = 0.75$	79
3.4.8.	Modificación en el sesgo de frecuencia $\beta = 0.25$	80
3.4.9.	Modificación en la ganancia del bloque HVDC $K_{dc} = 1.6$	81
3.4.10.	Modificación en la ganancia del bloque HVDC $K_{dc} = 2.4$	82
3.4.11.	Modificación en la constante de tiempo del bloque HVDC $T_{dc} = 0.1$	83
3.4.12.	Modificación en la constante de tiempo del bloque HVDC $T_{dc} = 0.4$	84
4.	Conclusiones y Trabajos Futuros	85
4.1.	Conclusiones	85
4.2.	Trabajos futuros	87
A.	Controladores	88
A.1.	Controlador Integrado	88
A.2.	Controlador Derivativo	89
A.3.	Controlador Proporcional Integrador	89
A.4.	Controlador Proporcional Integrador Derivativo	91
B.	Parámetros del Sistema	93
C.	Desarrollo algebraico del modelo del cambiador de velocidad	94
D.	Modelos Matemáticos	98
D.1.	Modelos de dos Áreas con Control Integrador (I)	98
D.2.	Modelos de dos Áreas con Control Proporcional Integrador (PI)	100
D.3.	Modelos de dos Áreas con Control Proporcional Integrador (PID)	102
D.4.	Formulación del modelo linealizado TCSC	103
D.5.	Modelo de dos Áreas con TCSC	107

D.6. Modelos de dos Áreas con HVDC	110
--	-----

Índice de figuras

2.1. Diagrama de bloques del sistema de control lineal en tiempo continuo representado en el espacio de estados	22
2.2. Frecuencia en equilibrio, carga - generación	23
2.3. Evolución típica de la frecuencia en el sistema de potencia	24
2.4. Representación del lazo dinámico de regulación primaria de frecuencia.	25
2.5. Representación del lazo dinámico regulación carga-frecuencia con acción primaria y secundaria.	26
2.6. Sistema del cambiador de velocidad y gobernador	27
2.7. Función de transferencia del gobernador con retroalimentación proporcional asociada al estatismo.	30
2.8. Recipiente de Vapor	31
2.9. Turbina recalentamiento simple tandem compund	33
2.10. Recalentamiento simple Turbina tandem compund	33
2.11. Bloques dinámicos turbina recalentamiento simple	33
2.12. Modelo en frecuencia del cambio incremental carga-generación.	35
2.13. Modelo dinámico representativo de un área térmica empleado en estudios LFC. . . .	37
2.14. Desviación de frecuencia en Área Aislada	38
2.15. Dos áreas interconectadas	39
2.16. Transmisión de potencia en una línea desde una estación generadora	40
2.17. Modelo del flujo de potencia en la línea de interconexión entre dos áreas	41
2.18. Modelo de la desviación de frecuencia en un área interconectada	41
2.19. Modelo dinámico del sistema multiárea con interconexión y control automático de generación.	42
2.20. Respuesta dinámica del sistema de dos áreas ante una SLP del 10 %: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2 y (c) Flujo de potencia en el enlace de interconexión.	43
2.21. Respuesta dinámica del sistema de dos áreas ante una SLP del 20 %: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2 y (c) Flujo de potencia en el enlace de interconexión.	43
3.1. Modelo eléctrico equivalente del enlace interárea compensado mediante TCSC. . . .	46
3.2. Modelo dinámico del sistema multiárea con interconexión y control automático de generación + Compensación TCSC.	50

3.3. Comparación respuesta sistema TCS y AGC (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2 y (c) Flujo de potencia en la línea de interconexión.	52
3.4. Comparación de la respuesta nominal y la modificación en el sistema: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	54
3.5. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con $T_{ps} = 30$ s: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	55
3.6. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $K_{ps} = 80$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	56
3.7. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $K_{ps} = 100$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	57
3.8. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $R = 1.2$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	58
3.9. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $R = 4$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	59
3.10. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $B = 0.75$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	60
3.11. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $B = 0.25$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	61
3.12. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $T_{12} = 0.0417$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	62
3.13. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $T_{12} = 0.0625$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.	63
3.14. Configuración del sistema eléctrico de dos áreas con enlace HVDC	65
3.15. de enlace HVDC en un sistema multiarea	66

3.16. Respuesta dinámica del sistema de dos áreas ante una perturbación en escalón del 20 % con y sin enlace híbrido HVDC: (a) Desviación de frecuencia Δf_1 , (b) Desviación de frecuencia Δf_2 y (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión.	71
3.17. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $T_{PS} = 10$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	73
3.18. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $T_{PS} = 30$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	74
3.19. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $K_{PS} = 80$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	75
3.20. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $K_{PS} = 100$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	76
3.21. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $R = 1.2$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	77
3.22. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $R = 4$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	78
3.23. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $B = 0.75$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	79
3.24. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $B = 0.25$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	80
3.25. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $K_{dc} = 1.6$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	81
3.26. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $K_{dc} = 2.4$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	82

3.27. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $T_{dc} = 0.1$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	83
3.28. Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $T_{dc} = 0.4$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.	84
A.1. Diagrama de bloques del control proporcional-integral	88
A.2. Diagrama de bloques del control derivativo	89
A.3. Diagrama de bloques del control proporcional-integral	89
A.4. Representación gráfica del control proporcional-integral.	90
A.5. Diagrama de bloques del control proporcional-integral	91
A.6. Diagrama de la estructura de control PID	91

Índice de tablas

2.1. Parámetros del sistema	38
2.2. Ganancias de los controladores I, PI y PID	38
2.3. Ganancias de los controladores I, PI y PID en ambas áreas	42
3.1. Ganancias de controladores en cada área AGC y TCSC	53
3.2. Comparación dinámica del sistema con y sin TCSC	53
3.3. Ganancias de controladores en cada área AGC y HVDC	71
3.4. Comparación dinámica del sistema con y sin enlace HVDC	72

Lista de Abreviaturas

ACE Area Control Error (Error de Control de Área)

AGC Automatic Generation Control (Control Automático de Generación)

FACTS Flexible AC Transmission Systems (Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna)

HVDC High Voltage Direct Current (Alta Tensión en Corriente Directa)

TCSC Thyristor-Controlled Series Capacitor (Compensador Serie Controlado por Tiristores)

PI Proportional–Integral (Proporcional–Integral)

AC Alternating Current (Corriente Alterna)

DC Direct Current (Corriente Directa)

LFC Load–Frequency Control (Control de Frecuencia–Carga)

p.u. Per Unit (Por Unidad)

SLP Step Load Perturbation (Perturbación Escalon de Carga)

Lista de Símbolos

Símbolos

D_i Coeficiente de amortiguamiento carga–frecuencia del área i (p.u./Hz)

$E(s)$ Señal de error en el dominio de Laplace

f_i Frecuencia del área i (Hz)

$G(s)$ Función de transferencia

H_i Constante de inercia equivalente del área i (s)

K_{pi} Ganancia proporcional del controlador del área i

K_{ii} Ganancia integral del controlador del área i

K_{HVDC} Ganancia del controlador del enlace HVDC

K_{TCSC} Ganancia del modelo dinámico del TCSC

P_{mi} Potencia mecánica generada en el área i (p.u.)

P_{Li} Potencia de carga del área i (p.u.)

P_{tie} Potencia intercambiada entre áreas (p.u.)

P_{AC} Potencia transferida por el enlace AC

P_{DC} Potencia transferida por el enlace HVDC

R_i Estatismo del gobernador del área i (Hz/p.u.)

T_{gi} Constante de tiempo del gobernador (s)

T_{ti} Constante de tiempo de la turbina (s)

T_{ps_i} Constante de tiempo del sistema de potencia del área i (s)

T_{HVDC} Constante de tiempo del modelo dinámico del HVDC (s)

T_{TCSC} Constante de tiempo del modelo dinámico del TCSC (s)

V_i Magnitud de tensión en la barra i (p.u.)
 X_{12} Reactancia de la línea entre las áreas 1 y 2 (p.u.)
 β_i Factor de sesgo de frecuencia del área i
 Δ Operador de variación incremental
 δ_i Ángulo del rotor del generador del área i (rad)
 δ_{12} Diferencia angular entre áreas
 ω_i Velocidad angular del generador del área i (rad/s)
 ω_s Velocidad angular síncrona (rad/s)

Capítulo 1

Introducción

La operación segura y confiable del sistema eléctrico de potencia depende de la estabilidad de la frecuencia, ya que representa el equilibrio instantáneo entre la potencia generada y la demandada. En sistemas interconectados, además de controlar la frecuencia, es necesario regular el intercambio de potencia activa entre áreas de control a través de sus líneas de interconexión, debido a su influencia directa en la coordinación operativa y en los modos de oscilación interárea [1, 2]. De esta forma, el control automático de generación (AGC) se utiliza para el control de frecuencia y carga (LFC), cuyo control secundario se encarga de eliminar el error en estado estacionario de frecuencia y de restituir el intercambio neto de potencia a su valor de referencia modificando la potencia mecánica suministrada al generador síncrono. No obstante, el desempeño del AGC se ve limitado por restricciones físicas derivadas de la acción relativamente lenta de los actuadores primarios (el gobernador, las válvulas y la turbina). Esta limitación se acentúa en plantas térmicas convencionales, donde se observan retardos y constantes de tiempo adicionales asociados a las etapas de recalentamiento y a las turbinas [1, 3]. Por lo tanto, resulta necesario analizar estrategias complementarias que introduzcan grados de libertad adicionales en el esquema de control de frecuencia, permitiendo actuar no solo sobre la potencia mecánica de generación, sino también sobre las variables eléctricas que determinan el flujo de potencia activa en la red. Los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS) permiten modificar de forma rápida y continua parámetros eléctricos de la línea de interconexión (como la reactancia efectiva o el voltaje serie equivalente), lo que afecta al flujo de potencia activa y, por tanto, a la dinámica de la línea de interconexión. De forma específica, en esta tesis se utiliza el Compensador Serie Controlado (TCSC), el cual modifica de forma directa la reactancia serie efectiva de la línea mediante un esquema de compensación controlada; asimismo, su incorporación no incrementa significativamente la complejidad del modelo multiárea. De forma complementaria, los enlaces de Corriente Continua de Alto Voltaje (HVDC) ofrecen una vía adicional para regular el intercambio de potencia con gran rapidez, razón por la cual pueden emplearse de manera efectiva para el soporte de la estabilidad de frecuencia en sistemas multiárea [4, 5]. En esta tesis se considera un esquema híbrido en el que el enlace HVDC opera en paralelo con la línea convencional de Alto Voltaje en Corriente Alterna (HVAC), lo que permite combinar el acoplamiento natural propio del sistema en corriente alterna con la capacidad de control directo de potencia del enlace en corriente continua. Esta configuración introduce un grado adicional de flexibilidad en la regulación del intercambio de potencia entre áreas [5]. Con base en lo anterior, el análisis y el modelado dinámico del problema de control de frecuencia se realiza considerando

plantas térmicas con recalentamiento simple e incorporando el TCSC y enlace híbrido HVDC como actuadores complementarios. El propósito es evaluar, mediante modelos y simulaciones comparables, el impacto de estos dispositivos en la respuesta en frecuencia y en la potencia de intercambio entre áreas de control.

1.1. Revisión del Estado del Arte

La operación segura y confiable del sistema eléctrico de potencia depende en su mayor parte de una adecuada regulación de la frecuencia, dado que las desviaciones de la frecuencia y de la potencia intercambiada entre áreas de control reflejan desequilibrios temporales entre generación y demanda [1, 6]. Cuando estas desviaciones persisten, se deteriora la robustez operativa del sistema y se incrementa el riesgo de pérdida de estabilidad [1, 7]. De tal manera, es importante el desarrollo e inclusión de nuevos esquemas de control de frecuencia que permitan una mayor flexibilidad operativa [3]. El control de frecuencia está reglamentado por estándares y códigos de red emitidos por operadores y organismos reguladores. En sistemas interconectados de gran escala, los marcos normativos establecen criterios explícitos para evaluar el desempeño del control secundario en el cumplimiento del intercambio de potencia entre áreas de control [8-10]. En Norteamérica, la North American Electric Reliability Corporation (NERC) define los estándares de desempeño del control de frecuencia (CPS), que cuantifican la capacidad de las áreas de control para mantener la frecuencia y el intercambio de potencia dentro de límites aceptables bajo condiciones normales de operación [9]. En Europa, los códigos de red desarrollados por ENTSO-E establecen requisitos técnicos para la operación interconectada [10]. De la misma forma, en México, las bases del mercado eléctrico y el código de red, emitidos por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y operados por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), establecen obligaciones para la regulación de la frecuencia y el control del intercambio de potencia entre áreas, alineadas con prácticas internacionales [11, 12]. De esta forma, el LFC tiene por finalidad regular la frecuencia del sistema y el intercambio de potencia entre áreas interconectadas [1, 13]. Su implementación práctica se realiza mediante el AGC, que actúa como un lazo secundario añadido a la regulación primaria provista por los gobernadores de velocidad de las máquinas síncronas [1]. La regulación primaria responde de forma inmediata ante un desbalance de potencia y limita la desviación máxima de frecuencia, pero no la restaura a su valor nominal. El AGC introduce una acción más lenta y sostenida que elimina el error estacionario de frecuencia y restablece el intercambio de potencia entre áreas a los valores programados [1, 13]. En escalas de tiempo mayores, la regulación terciaria o despacho económico reajusta los puntos de operación con criterios de optimización y seguridad [1]. Desde la perspectiva de análisis dinámico, el desempeño del AGC se estudia mediante modelos dinámicos linealizados de los componentes equivalentes que integran un área de control: el generador, el sistema de potencia, el gobernador, la turbina y la carga, con el fin de evaluar la respuesta del sistema ante disturbios de potencia activa [1, 6]. El tipo de planta dominante condiciona el desempeño del lazo secundario; por lo que se considera en la literatura representaciones térmicas, hidráulicas, de gas o configuraciones mixtas bajo una estructura conceptual común [1, 3]. En configuraciones de dos o más áreas, el modelo incorpora explícitamente líneas de interconexión existentes, en las que el flujo de potencia activa entre áreas de control depende de la diferencia de ángulos eléctricos. Este acoplamiento operativo puede introducir modos oscilatorios interárea de baja frecuencia que pueden limitar el desempeño del AGC [1, 6].

La potencia mecánica se asocia a la expansión del vapor en etapas de alta, intermedia y baja presión, con la presencia de un recalentador entre las etapas de alta y de intermedia presión [1]. Por

lo tanto, se distinguen modelos simplificados, que agrupan la turbina y el recalentador mediante funciones de transferencia equivalentes de bajo orden, y modelos detallados, que representan explícitamente las distintas etapas y los retardos del circuito de potencia [3, 6]. Si bien el análisis de la configuración simplificada facilita el análisis comparativo y la sincronización de controladores, el modelo completo permite capturar con mayor fidelidad el comportamiento electromecánico del sistema [6]. Aun con su adopción generalizada, el esquema clásico de AGC basado en el Error de Control de Área (ACE) presenta limitaciones en condiciones de operación exigentes, asociadas principalmente a la respuesta relativamente lenta de los actuadores mecánicos y al acoplamiento dinámico entre áreas [1, 7]. En plantas térmicas, los retardos del enlace gobernador-válvula-turbina introducen una fase adicional en el lazo de control, lo que prolonga los tiempos de estabilización del sistema de la desviación de frecuencia y del intercambio de potencia [1]. En sistemas multiárea, estas restricciones se agravan por la presencia de modos oscilatorios interárea de baja frecuencia, cuyo amortiguamiento no queda garantizado por el AGC convencional, se producen cuando se incrementan las ganancias de los controladores Proporcional-Integral (PI) o aparecen saturaciones que inducen fenómenos de sobreimpulso [2, 13]. Cuando el sistema opera cerca de los límites de transmisión, la sensibilidad del intercambio de potencia a pequeñas variaciones angulares del voltaje nodal aumenta, lo que puede limitar la efectividad del AGC para mitigar oscilaciones interáreas [1]. Este conjunto de consideraciones ha motivado el estudio de estrategias complementarias basadas en actuadores de respuesta rápida, tales como los dispositivos FACTS y los enlaces HVDC, con el propósito de mejorar el amortiguamiento dinámico y reducir el esfuerzo requerido por los actuadores mecánicos [3, 4]. Los dispositivos FACTS, basados en electrónica de potencia, permiten regular de manera rápida y continua parámetros eléctricos del sistema, como la impedancia serie de las líneas de transmisión, los voltajes nodales o el flujo de potencia, operando en escalas de tiempo significativamente menores que las asociadas a los actuadores mecánicos del AGC [4, 14]. En particular, dentro de los dispositivos FACTS de conexión en serie, el TCSC ha sido ampliamente analizado en la literatura debido a su capacidad para influir directamente en la potencia de interconexión y en el acoplamiento eléctrico entre áreas, lo que incrementa la capacidad de control del sistema [3, 14-16]. Para el control de frecuencia, tanto el TCSC como los enlaces HVDC se integran comúnmente mediante esquemas de control suplementario que utilizan señales como el ACE, la desviación de frecuencia o el intercambio de potencia para mejorar el amortiguamiento interárea, manteniendo la estructura fundamental del AGC clásico [3]. Los enlaces HVDC de manera complementaria, se han incorporado como elementos de interconexión capaces de modular directamente la potencia activa transferida entre áreas, ofreciendo una respuesta más rápida y controlable [5, 17]; la literatura también reporta configuraciones híbridas en las que el enlace HVDC opera en paralelo con líneas HVAC convencionales, combinando el acoplamiento natural del sistema en corriente alterna con la capacidad de control directo de potencia propia de la transmisión en corriente continua [3, 5]. En la literatura se coincide en que el TCSC puede mejorar el amortiguamiento de las oscilaciones interárea de baja frecuencia y reducir las desviaciones transitorias de frecuencia; no obstante, su desempeño depende del punto de operación, de los límites físicos del dispositivo y de su adecuada coordinación con el controlador PI del AGC [3, 4, 15].

En México, el código de red y las bases del mercado eléctrico establecen objetivos claros en cuanto al desempeño de la regulación de la frecuencia y del intercambio de potencia entre áreas, sin prescribir explícitamente las tecnologías de control que deben emplearse para su cumplimiento [11, 12]. En este sentido, la incorporación del TCSC y el enlace híbrido HVDC al sistema, se reconoce como una herramienta de control y operación de la red de transmisión; sin embargo, su integración directa como actuadores suplementarios dentro del lazo del AGC no forma parte,

hasta el momento, de los esquemas operativos estandarizados. Esta flexibilidad normativa, sumada al efecto de la integración de fuentes renovables de naturaleza estocástica, que introducen mayor variabilidad y perturbaciones en la red, motiva la investigación orientada a evaluar estrategias de control avanzadas y la necesidad de actualizar la infraestructura y los esquemas de control del sistema eléctrico [18-20]. De esta forma, diversos estudios en la literatura señalan que el TCSC y el enlace HVDC, cuando se integran de manera coordinada con esquemas de control de frecuencia existentes, permiten mejorar la robustez del sistema frente a variaciones operativas, cambios topológicos y condiciones de alta incertidumbre; destacando que su integración puede mejorar la respuesta dinámica ante perturbaciones sin alterar la estructura fundamental de los lazos clásicos de control, lo cual resulta especialmente adecuado para estudios en escalas de tiempo electromecánicas [3, 21, 22]. La incorporación de estas tecnologías de control en las líneas de interconexión dentro del esquema de ACE se plantea como una extensión del AGC convencional para analizar mejoras en el amortiguamiento de las oscilaciones de frecuencia, en el comportamiento del intercambio de potencia y en la robustez del desempeño del sistema, en concordancia con criterios técnicos y regulatorios establecidos [1, 3].

1.2. Hipótesis

La incorporación de dispositivos controladores TCSC y del enlace híbrido HVDC, en la línea de interconexión de un sistema eléctrico de potencia multiárea, integrados como actuadores suplementarios dentro del esquema del AGC basado en ACE y en controladores PI, tiende a mejorar la estabilidad de frecuencia ante disturbios de carga y variaciones en la potencia de intercambio entre áreas. Lo anterior puede cuantificarse mediante la ocurrencia de: (i) menores máximos de desviación de frecuencia en ambas áreas, (ii) mayor amortiguamiento de las oscilaciones de flujo de potencia interáreas, (iii) disminución del tiempo de atenuación de las oscilaciones de frecuencia y potencia en la línea de interconexión, y (iv) mayor robustez del desempeño frente a cambios en las condiciones operativas, en comparación con un esquema AGC sin compensación flexible que aporten los FACTS.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es analizar y evaluar el impacto del uso de controladores convencionales de AGC y de la incorporación de dispositivos TCSC y enlace híbrido HVDC sobre la estabilidad de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia, mediante el desarrollo de modelos dinámicos (funciones de transferencia y representaciones en espacio de estados) que permitan simular y comparar el desempeño de sistemas de una y dos áreas bajo distintas condiciones operativas.

1.3.2. Objetivos Particulares

- Plantear, a partir del comportamiento dinámico de los elementos del sistema (generador-sistema de potencia, gobernador, turbina y carga), las funciones de transferencia necesarias para su representación en el espacio de estados, con el fin de simular el comportamiento dinámico del sistema eléctrico ante disturbios de carga.

- Desarrollar y analizar el modelo de un área aislada para una planta térmica con recalentamiento simple, evaluando su respuesta dinámica mediante la implementación y comparación de controladores Integrales (I), PI y Proporcional-Integral-Derivativo (PID), utilizando métricas de desempeño (tiempo de establecimiento y error estacionario en las desviaciones de frecuencia).
- Desarrollar y analizar el modelo de dos áreas interconectadas, incorporando la dinámica de la potencia de enlace, el ACE de cada área y el esquema de AGC correspondiente, considerando controladores de tipo I, PI y PID.
- Formular modelos dinámicos y sus funciones de transferencia representativas de los dispositivos controladores de tipo TCSC y enlace híbrido HVDC para el control de frecuencia.
- Incorporar los modelos de los dispositivos TCSC y enlace híbrido HVDC al sistema eléctrico de dos áreas, con controlador PI, y comparar su respuesta dinámica con la de un esquema AGC tradicional, manteniendo ganancias equivalentes para asegurar una comparación justa y consistente.
- Analizar comparativamente las respuestas del sistema en términos de desviaciones de frecuencia y de potencia de intercambio entre áreas, mediante gráficas y métricas cuantitativas (nadir, tiempos de estabilización del sistema), con el fin de evaluar la mejora en la estabilidad y la robustez proporcionada por los dispositivos FACTS, en este caso el TCSC.

1.4. Justificación

Bajo el problema de regulación carga-frecuencia planteado, el TCSC y el enlace híbrido HVDC pueden representar una alternativa atractiva al permitir una modulación rápida del flujo de potencia en el enlace de interconexión. Su integración como actuadores suplementarios del AGC permite mejorar el amortiguamiento de oscilaciones del flujo potencia interárea, reducir el esfuerzo requerido por los actuadores mecánicos y aumentar la robustez del sistema frente a variaciones operativas.

Si bien existen numerosos estudios sobre el LFC utilizando el concepto de AGC, persiste la necesidad de análisis integrados que consideren modelos dinámicos de otro tipo de controladores. Esta brecha motiva el presente trabajo, cuyo objetivo es analizar de forma sistemática el impacto del dispositivo TCSC y el enlace HVDC en el desempeño del AGC en un sistema de dos áreas, contribuyendo a una comprensión más clara de su efectividad en la mejora de la estabilidad de frecuencia y del intercambio de potencia.

1.5. Metodología

La metodología se desarrolló de forma secuencial con el propósito de comparar, bajo condiciones equivalentes, el desempeño del AGC convencional y del AGC asistido por actuadores basados en el TCSC y el enlace híbrido HVDC. Las etapas del trabajo se resumen a continuación:

- Se plantea el AGC convencional y se establece el esquema clásico de regulación secundaria de frecuencia basado en el ACE, definiendo las señales de interés para el análisis (Δf y ΔP_{tie}).

- Se formulan modelos dinámicos linealizados alrededor de un punto de operación para el generador, el gobernador de velocidad, la turbina térmica con recalentamiento simple y la carga. A partir de estos subsistemas se construyen los diagramas de bloques del lazo de control de frecuencia e interconexión, identificando las entradas (disturbios de carga en escalón) y las salidas (variables de respuesta) del sistema.
- Se implementan y analizan controladores I, PI y PID como parte de la regulación secundaria, actuando sobre la referencia de potencia mecánica para reducir el ACE y restituir las variables a sus valores nominales.
- Se valida progresivamente el esquema de control en sistemas de una y de dos áreas. Los controladores I, PI y PID se evalúan primero en un sistema de una sola área aislada y posteriormente en un sistema de dos áreas interconectadas. En ambos casos se aplican disturbios escalón equivalentes (incrementos de carga del 10 % en el área 1 y 20 % en el área 2) para comparar el efecto de la estructura de control.
- Se formula el modelo en el espacio de estados y se realizan simulaciones dinámicas. Para cada configuración se obtienen: (i) las funciones de transferencia y los diagramas de bloques, (ii) la representación en el espacio de estados para el análisis dinámico y (iii) los modelos de simulación. Las simulaciones se desarrollan en el entorno MATLAB/Simulink, herramienta ampliamente utilizada en la comunidad eléctrica por su capacidad para el modelado dinámico, la integración numérica de ecuaciones diferenciales y el análisis de estabilidad en sistemas de potencia, registrando Δf en cada área y ΔP_{tie} , y evaluando el desempeño mediante métricas como el nadir, sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y el amortiguamiento de oscilaciones.
- Se modela e integran el dispositivo TCSC y enlace híbrido HVDC al sistema eléctrico planteado. Se derivan modelos dinámicos y funciones de transferencia representativas del controlador TCSC y del enlace híbrido HVDC a partir de sus principios de operación, integrándolos al sistema de dos áreas para actuar sobre el corredor de interconexión mediante la modulación de la reactancia, la tensión serie o la potencia transferida, e influyendo directamente en ΔP_{tie} y, por ende, en el ACE.
- Se comparan escenarios con y sin actuadores complementarios, se analizan bajo un análisis de sensibilidades, contrastando el sistema de dos áreas con AGC tradicional con el sistema con AGC asistido por TCSC y enlace híbrido HVDC. Para asegurar consistencia, se emplean controladores PI con las mismas ganancias y se mantienen idénticas condiciones de operación y perturbaciones en todos los casos, siendo en área 1 una perturbación de carga en escalón del 10 % y en área 2 una perturbación de carga en escalón de 20 %.
- Se evalúan los resultados y se valida la hipótesis planteada mediante gráficas comparativas de Δf y ΔP_{tie} , así como mediante métricas cuantitativas, con el fin de analizar de manera sistemática el impacto del TCSC y del enlace híbrido HVDC en la estabilidad de la frecuencia y la robustez del sistema.

1.6. Estructura de la Tesis

El Capítulo 2 está dedicado al modelado dinámico y al control para la regulación de la frecuencia. En este capítulo se presentan los fundamentos del modelado en el espacio de estados, el

comportamiento dinámico de la frecuencia en sistemas de potencia y el esquema de AGC. Se desarrollan los modelos del gobernador, de la turbina térmica con recalentamiento simple, del generador y de la carga. Asimismo, se analizan sistemas de un área aislada y de dos áreas interconectadas, presentando los resultados de simulación correspondientes y las conclusiones del capítulo.

El Capítulo 3 aborda la inclusión de controladores basados en electrónica de potencia para el control de frecuencia. En este capítulo se presentan el modelado matemático y la integración del controlador TCSC y el enlace híbrido HVDC, dentro del esquema de control de frecuencia de sistemas multiarea. Para cada caso, se describe su principio de operación, su inclusión en el problema de control de frecuencia y los resultados obtenidos, así como se puede encontrar el análisis de sensibilidades.

El Capítulo 4 presenta las conclusiones generales del trabajo, en el que se evalúa el desempeño de las estrategias de control propuestas para la regulación de la frecuencia en sistemas eléctricos de potencia. Además, se plantean líneas de trabajo futuras.

Los apéndices complementan el contenido principal de la tesis. El Apéndice A presenta el desarrollo de los distintos controladores utilizados: I, PI y PID. El Apéndice B incluye los parámetros del sistema, el Apéndice C incluye el desarrollo algebraico del modelo del cambiador de velocidad; mientras que el Apéndice D incluye los modelos matemáticos completos de los sistemas de dos áreas bajo diferentes esquemas de control y con la incorporación de los dispositivos controladores considerados.

Capítulo 2

Modelado Dinámico y Control para Regulación de Frecuencia

La estabilidad de frecuencia describe la capacidad del sistema eléctrico para mantener su frecuencia cercana al valor nominal frente a variaciones en la generación o la demanda, y constituye un umbral para determinar la robustez, la seguridad y la operación continua del sistema. Como consecuencia de un desbalance entre estas magnitudes, se produce una desviación en la frecuencia nominal que afecta el desempeño de los equipos conectados, comprometiendo la estabilidad del sistema, lo que puede derivar en desconexiones automáticas o colapsos del sistema si este no se corrige apropiadamente [1, 3, 7]. Este capítulo presenta el modelado dinámico de los componentes involucrados en la regulación de frecuencia, así como las estrategias de control utilizadas para mitigar las desviaciones de frecuencia respecto de su valor nominal de operación. Se abordan los sistemas de control primario, implementados mediante gobernadores, y el mecanismo de control secundario, conocido como AGC, que busca restablecer la frecuencia nominal y corregir los intercambios de potencia entre áreas ante desbalances de potencia activa. Posteriormente, se presenta el modelado detallado de los componentes involucrados en la regulación de la potencia y la frecuencia, entre ellos el sistema de gobernanza de velocidad, la turbina y el generador síncrono. En cada caso, se describe el funcionamiento físico correspondiente y se derivan las ecuaciones dinámicas en los dominios del tiempo y de Laplace, lo que permite obtener modelos de primer orden y funciones de transferencia, que se integran en el análisis global del sistema. También se incluye el planteamiento del flujo de potencia entre áreas mediante la línea de interconexión, estableciendo la formulación del flujo de potencia P_{tie} y su linealización. Finalmente, se introduce el concepto del ACE como variable fundamental para el AGC, estableciendo el marco matemático y conceptual sobre el cual se desarrollarán, en capítulos posteriores, las estrategias de control para la estabilidad de frecuencia. Asimismo, se analiza el efecto de los controladores P, PI y PID en el problema de AGC, mediante simulaciones tanto para un área aislada como para áreas interconectadas.

2.1. Modelado de Espacio de Estados

Dado que los sistemas AGC y ACE son sistemas multivariables, es necesaria su representación mediante un modelo en el espacio de estados que permita analizar su comportamiento dinámico

interno. Esta formulación proporciona una visión estructurada del sistema e incorpora la retroalimentación de estados, lo que permite diseñar esquemas de control que preserven la estabilidad y la robustez del sistema ante perturbaciones. Mediante la teoría clásica de control [23], los sistemas AGC y ACE, utilizados en la regulación de frecuencia, se modelan como sistemas de control en lazo cerrado [1, 3, 7, 13, 24]. Con esta configuración, la salida del sistema se compara de forma continua con una señal de referencia, generando una señal de error, la cual es utilizada por el controlador para aplicar una acción correctiva, con el objetivo de reducir dicho error y llevar la salida del sistema al valor deseado, manteniendo la frecuencia dentro de márgenes aceptables y garantizando el equilibrio entre generación y demanda eléctrica. El modelo de un sistema en el espacio de estados [23-25] se define como el conjunto mínimo de cantidades físicas, denominadas variables de estado, que es necesario especificar para determinar la evolución dinámica del sistema. Estas variables permiten expresar el comportamiento del sistema mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden. Matemáticamente, los modelos físicos pueden representarse en el espacio de estados a partir de la función de transferencia obtenida aplicando la transformada de Laplace a la ecuación diferencial que describe el sistema, bajo la suposición de condiciones iniciales nulas. En un sistema dinámico de orden n , se requiere especificar n condiciones iniciales, correspondientes a las n variables de estado que caracterizan el estado interno del sistema. Estas variables permiten representar la dinámica del sistema mediante ecuaciones diferenciales de orden n , de la forma.

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_0 u(t) \quad (2.1)$$

El modelo (2.1) puede representarse de forma matricial. Para ello, se debe definir el conjunto de variables de estado $x_i(t)$ de modo que el sistema quede expresado mediante ecuaciones diferenciales de primer orden. La forma canónica de fase consiste en definir las variables de estado como.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= y(t) \\ x_2(t) &= \dot{y}(t) \\ x_3(t) &= \ddot{y}(t) \\ &\vdots \\ x_n(t) &= y^{(n-1)}(t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

De tal forma que se pueda expresar como.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) &= x_n(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

A partir de la ecuación original (2.1), se despeja el término $\frac{d^n y(t)}{dt^n}$ para expresar la derivada de orden n en función de las variables de estado y de la entrada.

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} = -a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} - a_{n-2} \frac{d^{n-2} y(t)}{dt^{n-2}} - \dots - a_0 y(t) + b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_0 u(t) \quad (2.4)$$

En términos de las variables de estado, se expresa como.

$$\dot{x}_n(t) = -a_{n-1} x_n(t) - a_{n-2} x_{n-1}(t) - \dots - a_1 x_2(t) - a_0 x_1(t) + u(t) \quad (2.5)$$

De este modo, el sistema puede representarse en su forma canónica de variables de fase, construyendo un modelo de estado del tipo.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.6)$$

Donde.

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

La matriz A generalizada es,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Donde.

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Y su salida está dada por.

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.10)$$

La matriz C en su forma canónica de fase se expresa como.

$$C = [b_0 \quad b_1 \quad \cdots \quad b_m \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \quad (2.11)$$

La matriz D representa la contribución directa de la entrada a la salida. Su valor depende de la estructura del sistema, y generalmente es nula. Para representar las entradas y salidas del sistema, a la ecuación (2.1) se le aplica la transformada de Laplace y se asumen condiciones iniciales nulas, obteniéndose la siguiente relación algebraica entre $Y(s)$ y $U(s)$:

$$Y(s) (s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_0) = U(s) (b_ms^m + \cdots + b_0) \quad (2.12)$$

La ecuación anterior puede ser expresada en forma de una función de transferencia que relaciona las entradas con las salidas del sistema al sistema de retroalimentación:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_ms^m + \cdots + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_0} \quad (2.13)$$

De forma generalizada la dinámica del sistema en el espacio de estados se caracteriza mediante los siguientes vectores y matrices.

$\dot{x}$	Vector de variables de estado de dimensión n .
u	Vector de variables de entrada de dimensión m .
y	Vector de salida de dimensión p .
$A_{n \times n}$	Matriz de estado del sistema.
$B_{n \times m}$	Matriz de entrada.
$C_{p \times n}$	Matriz de salida.
$D_{p \times m}$	Matriz que representa un acoplamiento directo entre la entrada y la salida.

Además de la representación algebraica descrita anteriormente, la estructura de un sistema en el espacio de estados puede representarse gráficamente mediante un diagrama de bloques como el que se muestra en la Figura 2.1. Este diagrama muestra la relación de las variables de estado con la entrada del sistema, y como la salida se genera a partir de dichas variables y de la entrada directa, si existe.

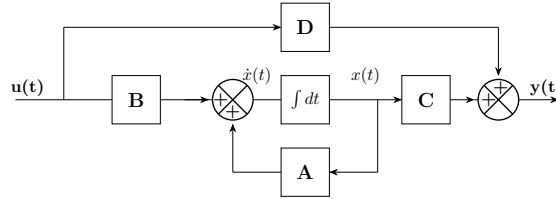


Figura 2.1: Diagrama de bloques del sistema de control lineal en tiempo continuo representado en el espacio de estados

La relación entre la entrada y la salida de un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI) puede representarse mediante su función de transferencia, la cual describe matemáticamente como el sistema transforma una señal de entrada en una respuesta de salida. Esta función se obtiene a partir de las ecuaciones diferenciales que modelan la dinámica del sistema, y al expresarse mediante la transformada de Laplace, permite analizar el comportamiento del sistema en el dominio de la frecuencia. A través de esta representación, es posible estudiar características del sistema, tales como el error en estado estacionario, la estabilidad y la respuesta dinámica ante señales tipo escalón o perturbaciones externas.

$$G(s) = \frac{y(s)}{r(s)} \quad (2.14)$$

- $G(s)$ es la función de transferencia del sistema en el dominio de Laplace.
- $y(s)$ representa la salida del sistema.
- $r(s)$ es la entrada o referencia del sistema.

2.2. Comportamiento Dinámico de la Frecuencia en Sistemas de Potencia

La frecuencia en un sistema eléctrico de potencia representa la velocidad a la que oscilan las señales sinusoidales de tensión y corriente y está directamente relacionada con la velocidad de rotación de los generadores síncronos conectados a la red [26]. En condiciones normales de operación, esta frecuencia se mantiene prácticamente constante y actúa como indicador del equilibrio entre la potencia activa generada y la demandada [1]. Este principio puede ilustrarse mediante la analogía de una balanza, como se muestra en la Figura 2.2, donde un platillo representa la potencia generada y el otro la potencia consumida por las cargas del sistema. Mientras ambos lados permanezcan en equilibrio, la frecuencia se mantiene estable. Sin embargo, cuando ocurre una perturbación, ya sea por una variación repentina en la carga o por la salida inesperada de una unidad generadora, este balance se rompe, por lo que si la demanda supera a la generación, la frecuencia disminuye; en caso contrario, aumenta. Aunque estas desviaciones pueden ser pequeñas, sus efectos pueden comprometer la estabilidad del sistema, afectar el desempeño de equipos sensibles e incluso derivar en contingencias más graves si no se controlan adecuadamente. En sistemas eléctricos cuya frecuencia nominal es de 60 Hz, las variaciones bajo condiciones normales de operación son muy reducidas, típicamente dentro de un rango aproximado de ± 0.05 Hz alrededor del valor nominal. Ante una perturbación moderada, la frecuencia puede descender hasta valores cercanos a 59.7 Hz sin comprometer la seguridad operativa del sistema. Sin embargo, un evento más severo puede provocar una disminución hasta aproximadamente 59.5 Hz, nivel que ya se considera crítico desde el punto de vista operativo. Si la frecuencia continúa descendiendo, se activan esquemas automáticos de protección por baja frecuencia, diseñados para desconectar carga de manera escalonada y evitar una caída mayor. Valores por debajo de aproximadamente 58.5–59.0 Hz pueden situar al sistema en una zona de alto riesgo, con posibilidad de colapso en frecuencia si no se restablece rápidamente el equilibrio entre generación y demanda [1, 7, 12].

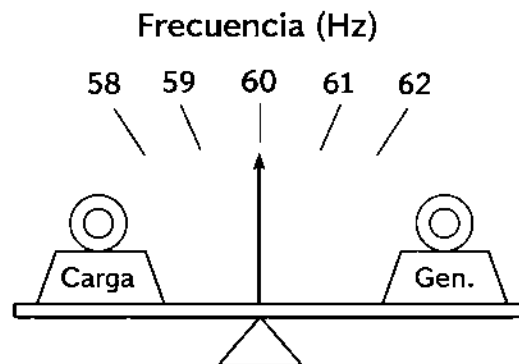


Figura 2.2: Frecuencia en equilibrio, carga - generación

La frecuencia se convierte en un indicador global del estado dinámico del sistema, dado que existe una relación estrecha entre la potencia activa y la frecuencia, la cual se describe mediante la

ecuación de oscilación, que modela el comportamiento de los generadores síncronos ante desbalances de potencia [1, 7]. Esta ecuación (2.15) establece que toda diferencia entre la potencia mecánica y la eléctrica se traduce en una aceleración o desaceleración del rotor, lo que afecta directamente la frecuencia del sistema [27].

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = \Delta P \quad (2.15)$$

donde:

- H es la constante de inercia del generador,
- ω_s es la velocidad síncrona,
- δ es el ángulo del rotor respecto a un eje de referencia,
- P_m y P_e representan la potencia mecánica de entrada y la potencia eléctrica de salida, respectivamente.

Ante una perturbación en el sistema eléctrico de potencia, como se describe previamente y se muestra en la Figura 2.3, se produce un desequilibrio entre la potencia activa generada y la demandada. Este desequilibrio se refleja de inmediato en la frecuencia del sistema [1]. Como respuesta inherente, el sistema actúa a través de las masas giratorias de los generadores síncronos, manifestando el fenómeno físico de la inercia, que constituye el primer mecanismo de mitigación frente a variaciones de frecuencia [7]. Esta inercia permite liberar o absorber energía cinética, amortiguando el impacto inicial del desbalance y limitando la rapidez con la que varía la frecuencia [6].

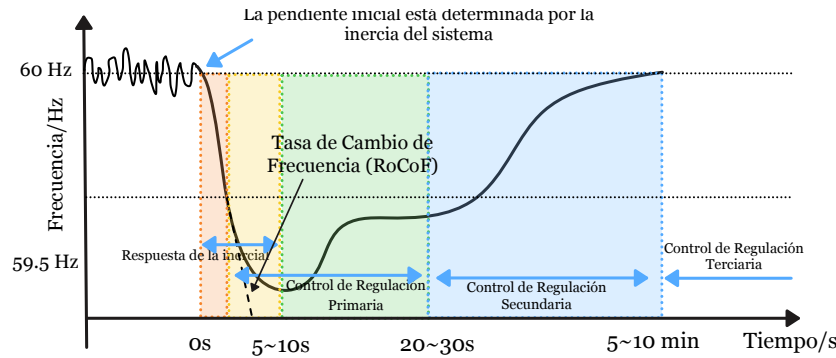


Figura 2.3: Evolución típica de la frecuencia en el sistema de potencia

La rapidez con la que cambia la frecuencia en los primeros instantes posteriores a un disturbio se cuantifica mediante el parámetro conocido como la Tasa de Variación de Frecuencia (RoCoF), el cual representa la derivada temporal de la frecuencia del sistema [3, 6, 26].

$$\text{RoCoF} = \frac{\Delta P}{P_{\text{LOAD}}} \cdot \frac{f_0}{2H}$$

Donde:

- ΔP es el desbalance de potencia activa,
- P_{LOAD} es la carga total del sistema,
- f_0 es la frecuencia nominal (50 o 60 Hz dependiendo la región),
- H es la constante de inercia (en segundos),

El valor inicial del RoCoF refleja la respuesta inercial inmediata del sistema eléctrico, antes de que actúen los mecanismos de control como los gobernadores o el AGC [6]. En sistemas con alta inercia, típicamente dominados por generación síncrona térmica o hidráulica, las variaciones de frecuencia se atenúan de forma más gradual, mientras que en sistemas con una elevada penetración de generación renovable no síncrona, la menor inercia efectiva ocasiona cambios más bruscos, lo que se traduce en valores elevados de RoCoF [3]. Entre los primeros 5 a 10 segundos posteriores al disturbio que ocasiona un desbalance carga-generación, comienza a operar la regulación primaria de frecuencia, también conocida como control carga-frecuencia de primer lazo. Este mecanismo se modela mediante una dinámica de primer orden que actúa localmente y de forma automática ante desviaciones de la frecuencia [1, 7]. Su función principal es frenar la caída súbita de la frecuencia, aunque no está diseñada para restaurarla por completo a su valor nominal. En este proceso intervienen el gobernador, las válvulas de control y la turbina, que ajustan la potencia mecánica entregada al generador según el desbalance entre la generación y la demanda [1]. De esta forma, se ralentiza la variación de frecuencia, se atenúa la desviación inicial y se otorga el tiempo necesario para que la regulación secundaria actúe y corrija el error en estado estacionario.

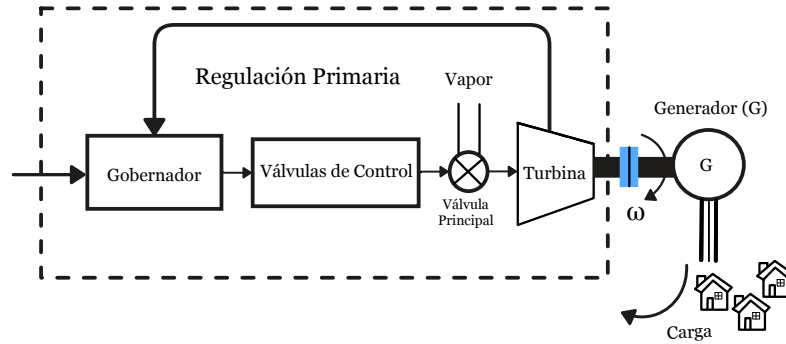


Figura 2.4: Representación del lazo dinámico de regulación primaria de frecuencia.

La relación entre cambio de frecuencia y potencia está determinada por el parámetro del estatismo. El estatismo se expresa en la ecuación (2.16) y representa la sensibilidad del generador a variaciones de frecuencia, así como la capacidad del sistema para ajustar su potencia mecánica en respuesta a desviaciones de frecuencia, con el fin de contrarrestar el desbalance entre generación y demanda.

$$\Delta P = -\frac{1}{R} \Delta f \quad (2.16)$$

Donde:

- ΔP es el cambio en la potencia mecánica entregada por el generador,
- Δf es la desviación de la frecuencia del sistema con respecto al valor nominal,
- R es el parámetro de estatismo (droop)

Un valor bajo de estatismo implica una mayor sensibilidad del generador a las desviaciones de frecuencia, lo que permite una respuesta más reactiva para contener la perturbación y estabilizar la frecuencia. Sin embargo, es importante señalar que el control de regulación primaria actúa de forma descentralizada y proporcional a la desviación de frecuencia, estabilizando el sistema en torno a un nuevo punto de operación, pero sin restaurar el valor nominal de la frecuencia. Posteriormente, entre los 20 y 30 segundos, se activa la regulación secundaria de frecuencia, mecanismo encargado de restaurar la frecuencia del sistema a su valor nominal y de restablecer los intercambios de potencia programados entre áreas interconectadas, una vez que la acción inicial de la regulación primaria ha contenido la excursión de frecuencia [1, 7]. A diferencia del lazo de regulación primaria, esta regulación actúa de forma centralizada y coordinada, operando en una escala temporal más lenta. Su implementación se realiza mediante el sistema AGC, que utiliza como señal de entrada el ACE, definido como una señal proporcional a la desviación de frecuencia Δf y a los desbalances de potencia en las interconexiones, y que constituye la base para generar la acción correctiva del control [13].

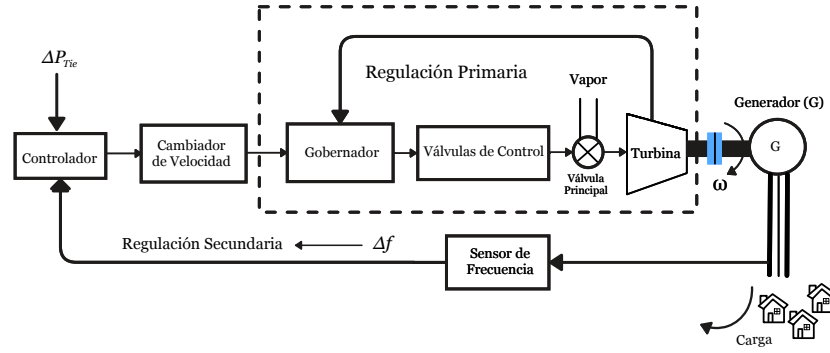


Figura 2.5: Representación del lazo dinámico regulación carga-frecuencia con acción primaria y secundaria.

Finalmente, a lo largo de varios minutos (típicamente entre 5 y 10 minutos), entra en funcionamiento el control terciario de frecuencia, cuyo objetivo es optimizar el despacho económico del sistema, reasignando la generación comprometida según criterios de eficiencia y de operación programada [1, 6, 13]. Esta secuencia coordinada de mecanismos de control permite que el sistema eléctrico mantenga su estabilidad y su operación continua, incluso ante eventos perturbadores significativos.

2.3. Control Automático de Generación

2.3.1. Sistema del cambiador de velocidad y gobernador

El control automático de generación (AGC) se conforma por medio del sistema de cambiador de velocidad y gobernador [1, 7].

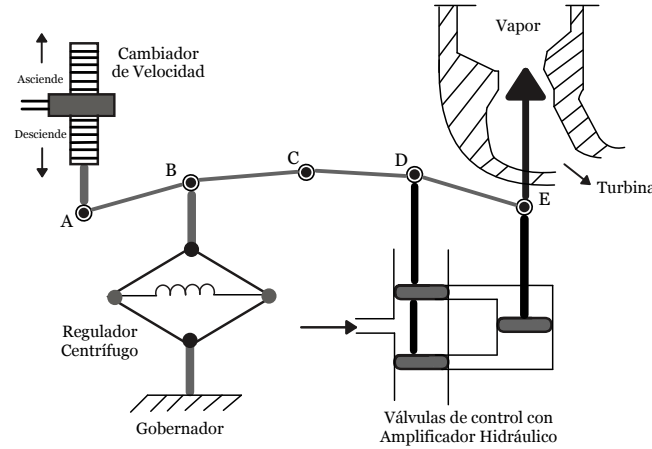


Figura 2.6: Sistema del cambiador de velocidad y gobernador

El sistema de gobernador de velocidad, representado en la Figura 2.6, está compuesto por el cambiador de velocidad, el gobernador, el amplificador hidráulico y el sistema de control de vapor hacia la turbina [1]. El sistema del cambiador de velocidad y el gobernador, cuando se requiere un ajuste de potencia en el sistema, responde automáticamente mediante una cadena de eventos mecánicos que ajustan la apertura de la válvula principal de vapor, tal como se describe en el modelo clásico del sistema de gobierno de velocidad [28]. En condiciones de estado estacionario, el cambiador de velocidad establece el punto de operación de la turbina en términos de potencia. Un desplazamiento descendente del cambiador provoca la apertura de la válvula piloto superior, lo que permite el desplazamiento del pistón principal, aumenta la apertura de la válvula de vapor hacia la turbina y produce un incremento sostenido en la potencia de salida. El movimiento ascendente genera el efecto contrario, reduciendo la admisión de vapor y, por ende, la potencia generada [7]. El gobernador actúa como elemento de corrección frente a las variaciones en la frecuencia del sistema. Ante una disminución de la frecuencia, es necesario que la turbina inyecte una mayor potencia, lo cual se logra aumentando el flujo de vapor. En este proceso, el pivote de conexión B desciende respecto a su posición de equilibrio, lo que provoca que las bolas del regulador centrífugo se desplacen radialmente hacia afuera debido a la reducción de la fuerza centrífuga [6]. Este desplazamiento activa el amplificador hidráulico, lo que genera un movimiento ascendente del pivote D, que a su vez eleva la válvula piloto. Como resultado, el aceite a alta presión se redirige, lo que permite que el pistón principal se desplace y aumente la apertura de la válvula de vapor. Esto incrementa el flujo de vapor hacia la turbina, aumenta su velocidad de rotación y contribuye a restablecer la frecuencia del sistema a su valor nominal [1, 7]. Al describir el comportamiento del sistema en condiciones estacionarias, en las que la potencia generada es igual a la demandada y la frecuencia se mantiene

dentro de sus valores nominales, no se produce desplazamiento en los elementos mecánicos. Por tanto, se cumple [28],

$$\Delta y_A = \Delta y_C = \Delta y_D = \Delta y_E = 0 \quad (2.17)$$

En caso de que se solicite al sistema generar una potencia mayor o menor, se desarrolla un modelo matemático de incremento lineal que represente cualquiera de estas condiciones. En este desarrollo, y con base en la Figura 2.6, se asume que una dirección positiva de movimiento de los pivotes corresponde a un movimiento decreciente con respecto al eje vertical, y una dirección negativa de movimiento corresponde a un movimiento creciente con respecto al eje vertical. La posición de la válvula piloto y, por ende, de la potencia generada, se ve afectada por el mecanismo de enlace de la siguiente manera:

- Directamente, al cambiar la posición espacial del pivote A mediante una consigna de ajuste del cambiador de velocidad.
- Indirectamente, mediante un proceso de retroalimentación, debido al cambio de posición del pistón principal.
- Indirectamente, mediante un proceso de retroalimentación, debido al cambio de posición espacial del pivote B como resultado de los cambios de velocidad.

Con la finalidad de explicar cualitativamente el sistema del cambiador y gobernador de velocidad, se asume que el sistema opera en un estado estable, caracterizado por una frecuencia nominal f^0 , posiciones constantes de los pivotes A, B, C, D y E, así como una potencia de generación constante P_g^0 . Debido que el pivote A es afectado directamente por el cambiador de velocidad, aquel presentará un desplazamiento descendente proporcional a la consigna de incremento de generación de potencia, representando la acción inicial del sistema por (2.18) [28],

$$\Delta y_A = k_c \Delta P_C \quad (2.18)$$

El movimiento del punto pivote A causará pequeños cambios de posición en los pivotes C y D, que se moverán hacia arriba. Dado que en este momento aún no se ha producido un cambio en la velocidad de giro del rotor del generador, la posición del pivote B permanece inalterada. Estos movimientos harán que la válvula piloto se mueva hacia arriba, de modo que el aceite de alta presión circulará por la parte superior del amplificador hidráulico y el pistón principal se moverá hacia abajo. Esto último provocará la apertura de la válvula de vapor, lo que dará lugar a un mayor flujo de vapor hacia la turbina, a una aceleración angular de la turbina y, por ende, del rotor del generador. Esta secuencia de eventos incrementará el valor de frecuencia. Con base en el análisis geométrico del mecanismo gobernador-turbina presentado en [28], los desplazamientos de los pivotes A, C, D y E se relacionan a través de las razones geométricas de la palanca usando l_1 , l_2 , l_3 y l_4 , se agrupan en constantes adimensionales k_1 , k_2 , k_3 , y k_4 , que representan los factores de transmisión del mecanismo. Considerando que ΔP_C corresponde a la consigna de cambio incremental de potencia, el pivote C se desplazará en dirección ascendente, de forma que su relación con respecto al movimiento descendente del pivote A está dada por:

$$\Delta y_C = -k_1 k_c \Delta P_c \quad (2.19)$$

Donde k_1 responde al factor de transmisión de A hacia C: $\frac{l_1}{l_2}$. El incremento de la frecuencia hace que las bolas centrífugas se muevan hacia afuera, alejándose longitudinalmente de su eje vertical,

lo que provoca un descenso del punto pivote B. Este movimiento provoca que el punto pivote C se desplace hacia abajo en un valor de $k_2 \Delta f$, donde $k_2 = (\frac{l_1 + l_2}{l_1} k_2')$. Note que, en este caso, el punto pivote A se mantiene fijo en su posición Δy_A , dada por (2.18), ya que la consigna ΔP_C no ha cambiado [1, 6, 7, 28]. Con base a lo descrito anteriormente, cambio espacial neto del pivote C con relación al cambio espacial de los pivotes A y B es dado por

$$\Delta y_C = -k_1 k_c \Delta P_C + k_2 \Delta f \quad (2.20)$$

El pivote D se mueve como resultado de los desplazamientos de C y del émbolo principal en E, lo cual se expresa matemáticamente por.

$$\Delta y_D = \left(\frac{l_4}{l_3 + l_4} \right) \Delta y_C + \left(\frac{l_3}{l_3 + l_4} \right) \Delta y_E \quad (2.21)$$

Sustituyendo las razones de palanca por constantes, se obtiene.

$$\Delta y_D = k_3 \Delta y_C + k_4 \Delta y_E \quad (2.22)$$

El movimiento Δy_D acciona el amplificador hidráulico que permite la entrada de aceite a alta presión para mover el pistón principal en el pivote E, el cual controla la válvula de vapor. Para simplificar el modelo dinámico de este movimiento, se desprecian las fuerzas de inercia del pistón y de la válvula frente a las fuerzas ejercidas por el aceite a alta presión. De esta forma, la tasa de admisión de aceite es proporcional a Δy_D [28]. El volumen de aceite a alta presión admitido en el cilindro se calcula como la integral temporal de Δy_D . La razón entre este volumen de aceite y el área de la sección transversal del pistón principal representa el desplazamiento de Δy_E , dado por (2.23), donde el coeficiente k_5 es el inverso del área referida. Nótese que los movimientos espaciales de ambos puntos pivote son contrarios, lo cual se refleja en el signo negativo en (2.23).

$$\Delta y_E = k_5 \int_0^t (-\Delta y_D) dt \quad (2.23)$$

Una vez establecidos el modelo físico y el dinámico del sistema de gobernación en el dominio del tiempo, resulta conveniente aplicar la transformada de Laplace para convertir dichas expresiones en ecuaciones algebraicas en el dominio s , lo que facilita su análisis. De tal manera, a las ecuaciones (2.20), (2.22) y (2.23) se les aplica la transformada de Laplace, resultando en.

$$\Delta Y_C(s) = -k_1 k_c \Delta P_C(s) + k_2 \Delta F(s) \quad (2.24)$$

$$\Delta Y_D(s) = k_3 \Delta Y_C(s) + k_4 \Delta Y_E(s) \quad (2.25)$$

Resolviendo el par de ecuaciones anteriores para $\Delta Y_E(s)$ al eliminar $\Delta Y_C(s)$ y $\Delta Y_D(s)$, se obtiene.

$$\Delta Y_E(s) = \frac{k_1 k_3 k_c \Delta P_C(s) - k_2 k_3 \Delta F(s)}{\left(k_4 + \frac{s}{k_5} \right)} \quad (2.26)$$

Definiendo las siguientes constantes en la ecuación (2.26), se obtiene (2.27):

$$\begin{aligned}
R = \frac{k_1 k_C}{k_2} & \quad \text{representa la constante de regulación de velocidad del gobernador, o estatismo.} \\
K_{sg} = \frac{k_1 k_3 k_C}{k_4} & \quad \text{representa la ganancia de velocidad del gobernador.} \\
T_{sg} = \frac{1}{k_4 k_5} & \quad \text{representa la constante de tiempo del gobernador de velocidad.}
\end{aligned}$$

$$\Delta Y_E(s) = \left[\Delta P_C(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right] \left(\frac{K_{sg}}{1 + T_{sg} s} \right) \quad (2.27)$$

De esta forma, la ecuación (2.27) es representado por la Figura 2.7.

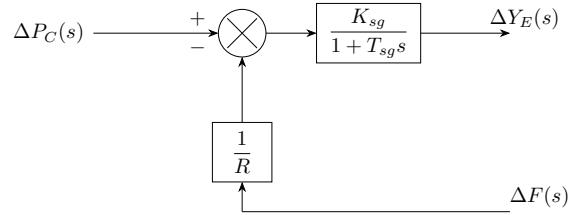


Figura 2.7: Función de transferencia del gobernador con retroalimentación proporcional asociada al estatismo.

La señal ΔP_C representa la referencia de potencia que debe seguir el sistema AGC, es decir, ΔP_{ref} . A partir de esta referencia, la potencia generada por el gobernador se determina dinámicamente mediante.

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta f(s) \quad (2.28)$$

La dinámica interna del gobernador se modela como un sistema de primer orden, siendo.

$$G_g(s) = \frac{\Delta P_v(s)}{\Delta P_g(s)} = \frac{1}{1 + sT_g} \quad (2.29)$$

Donde T_g es la constante de tiempo del gobernador.

2.3.2. Modelado de Turbina

La velocidad del gobernador y el cambiador de velocidad determinan la posición del pivote ΔY_E , que indica el grado de apertura de la válvula de control encargada de regular el ingreso de vapor a la turbina, o, en su caso, de restringir dicho flujo cuando sea necesario [1, 7]. Las turbinas de vapor convierten la energía contenida en el vapor de alta presión y alta temperatura en energía rotatoria, la cual posteriormente se transforma en energía eléctrica mediante un generador acoplado [1, 6]. Estas turbinas pueden construirse en distintas configuraciones, dependiendo del tamaño de la unidad y

de las condiciones del vapor de entrada. Cada etapa de la turbina se compone de un conjunto de álabes móviles fijados al rotor y de otro conjunto de álabes estacionarios. El vapor, al impactar estos álabes, transmite su energía cinética y genera un par de torsión sobre el eje de la turbina [6, 7]. Las unidades generadoras alimentadas por combustibles fósiles suelen utilizar turbinas de tipo tandem-compound o cross-compound, organizadas en secciones de alta presión (HP), presión intermedia (IP) y baja presión (LP). En las turbinas con recalentamiento simple, el vapor que sale de la sección de alta presión regresa a la caldera para ser recalentado (RH) antes de ingresar a la sección intermedia, lo que incrementa la eficiencia del ciclo termodinámico [1, 6]. El gobernador es el encargado de controlar el flujo de vapor que pasa por las válvulas de admisión, manteniendo la potencia de salida de la turbina en condiciones nominales. Por otro lado, las válvulas de intercepción actúan como dispositivos de protección que responden ante excesos de velocidad ocasionados por eventos como la pérdida repentina de carga, aunque no participan en la operación continua del sistema [1, 7]. El modelado dinámico de las turbinas inicia con la formulación de la función de transferencia que describe el comportamiento del recipiente de vapor. En este contexto, se asume que la variación de potencia está relacionada con la variación de la masa de vapor contenida en dicho recipiente, lo cual se expresa mediante un balance entre el flujo de entrada y el de salida de vapor [1, 6, 7].

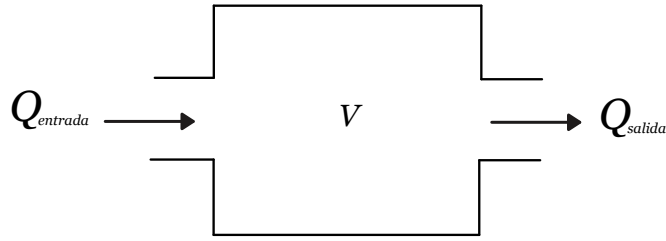


Figura 2.8: Recipiente de Vapor

La evaluación de la continuidad de flujo en el recipiente es.

$$\frac{dW}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.30)$$

Donde.

W = peso del vapor en el recipiente (kg) = $V\rho$

V = volumen del recipiente (m^3)

ρ = densidad del vapor (kg/m^3)

Q = caudal másico de vapor (kg/s)

t = tiempo (s)

Asumiendo que el flujo del recipiente a la salida es proporcional a la presión dentro de la misma.

$$Q_{out} = \frac{Q_0}{P_0} P \quad (2.31)$$

Donde.

P = presión del vapor en el recipiente (kPa)

P_0 = presión nominal

Q_0 = caudal nominal de salida del recipiente

Considerando que la temperatura en el recipiente es constante.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt} \frac{d\rho}{dP} \quad (2.32)$$

El cambio de la densidad con respecto a la presión, $\frac{d\rho}{dP}$, se obtiene a partir de las propiedades termodinámicas del vapor reportadas en tablas de vapor o ecuaciones de estado aceptadas. A partir de estos valores, y empleando las ecuaciones (2.30), (2.31) y (2.33), es posible relacionar dicha variación con el comportamiento dinámico del recipiente de vapor dentro del modelo de la turbina [1, 6, 7].

$$\begin{aligned} Q_{in} - Q_{out} &= V \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{dP}{dt} \\ &= V \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{P_0}{Q_0} \frac{dQ_{out}}{dt} \\ &= T_V \frac{dQ_{out}}{dt} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Donde.

$$T_V = \frac{P_0}{Q_0} V \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (2.34)$$

En su forma de Laplace (2.33) se puede simplificar como.

$$Q_{in} - Q_{out} = T_V s Q_{out}$$

O, también.

$$\frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{1}{1 + T_V s} \quad (2.35)$$

Donde (2.35) representa la función de transferencia del recipiente de vapor, y T_V corresponde a la constante de tiempo asociada al volumen efectivo de vapor en el steam chest [1, 7]. Partiendo del análisis anterior, se introduce el modelo detallado de la turbina en su configuración completa, considerando una unidad fósil de vapor con recalentamiento simple y disposición tándem-compuesto. Este tipo de turbinas está compuesto por múltiples secciones: presión alta (HP), intermedia (IP) y baja (LP), dispuestas en un solo eje mecánico, como se muestra en la Figura 2.9. En este esquema, el vapor entra a la sección de alta presión (HP) a través del control ejercido por la válvula de admisión, regulada por el sistema de gobernador [1, 6].

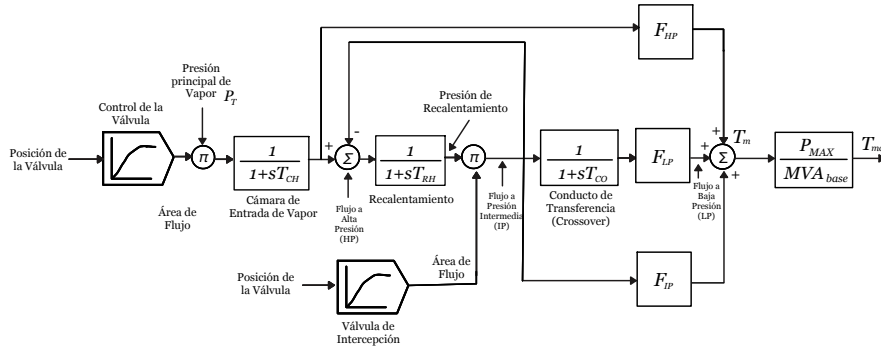


Figura 2.9: Turbina recalentamiento simple tandem compund

De forma generalizada, la representación esquemática de una turbina de vapor es.

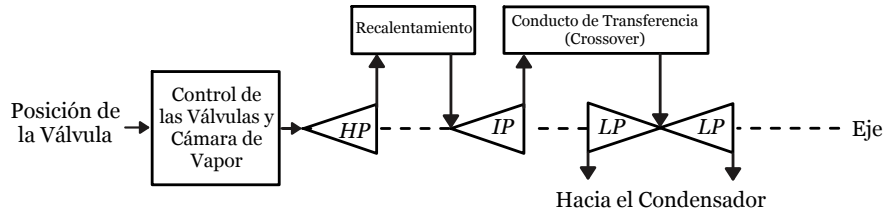


Figura 2.10: Recalentamiento simple Turbina tandem compund

Por lo que su modelo dinámico es dado por.

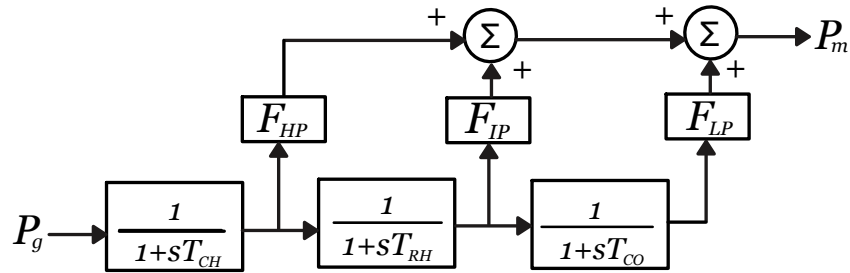


Figura 2.11: Bloques dinámicos turbina reclaentamiento simple

Los retardos considerados en el modelo corresponden a dinámicas de primer orden asociadas al tiempo de tránsito del vapor a través de volúmenes definidos dentro del sistema. Estas secciones incluyen la cámara de válvulas, el recalentador y la tubería de cruce. Cada uno de estos retardos

se modela mediante una función de transferencia de primer orden como la expresada en (2.35), donde la constante de tiempo representa el volumen efectivo asociado a cada sección de la turbina [1, 6, 7]. Por otro lado, las constantes F_{HP} , F_{IP} y F_{LP} representan las ganancias fraccionarias unitarias asociadas a las etapas de la turbina (alta, intermedia y baja presión, respectivamente). Estas constantes expresan la proporción relativa de la potencia entregada por cada etapa respecto al total generado por la turbina, lo que asegura una representación equilibrada del sistema [1, 6, 7].

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta V_{CV}} = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (2.36)$$

2.3.3. Modelo del Generador y Carga

Al ocurrir un cambio en la carga del sistema, la diferencia incremental generación-carga es dada por,

$$\Delta P_G - \Delta P_L \quad (2.37)$$

Donde $\Delta P_G = \Delta P_m$ y ΔP_L es el incremento de la potencia demandada por la carga [28]. El cambio de generación puede expresarse como una variación de la energía cinética almacenada en el generador. En este contexto, la energía almacenada en el rotor del generador a la frecuencia nominal f^0 se expresa como.

$$W_{ke}^0 = H * P_r \quad (2.38)$$

Donde, P_r es la potencia nominal del conjunto turbina-generador y H es la constante de inercia. La energía cinética a una frecuencia $(f^0 + \Delta f)$ es dada por [28].

$$W_{ke} = W_{ke}^0 \left(\frac{f^0 + \Delta f}{f^0} \right)^2 \quad (2.39)$$

Desarrollando el trinomio cuadrado perfecto y asumiendo pequeñas variaciones de frecuencia, se obtiene la siguiente expresión [28],

$$W_{ke} \approx HP_r \left(1 + \frac{2\Delta f}{f^0} \right) \quad (2.40)$$

Por último, ante la perturbación en la demanda, el generador cambiará su velocidad y, por ende, su energía cinética. Lo anterior se expresa matemáticamente por

$$\frac{d}{dt}(W_{ke}) = \frac{2HP_r}{f^0} \frac{d}{dt}(\Delta f) \quad (2.41)$$

A medida que varía la frecuencia, la potencia demandada también varía, ya que los parámetros reactivos de la demanda son sensibles a la frecuencia y las cargas motrices son sensibles a la velocidad. Para pequeñas variaciones de frecuencia Δf , la razón de cambio de la carga con respecto a la frecuencia puede considerarse aproximadamente constante; es decir, $\partial P_D / \partial f$ puede considerarse constante en el entorno de operación. Por lo tanto, la variación incremental de carga puede expresarse como:

$$\left(\frac{\partial P_L}{\partial f} \right) \Delta f = B \Delta f \quad (2.42)$$

Donde la constante B se determina empíricamente en función de la potencia demandada. En sistemas donde predomina la carga motriz, B es positiva. Con base en lo descrito anteriormente, la diferencia incremental generación-carga se puede expresar en función del cambio en la energía cinética del generador y la razón de cambio de la demanda con respecto a la frecuencia la diferencia incremental generación-carga [28]:

$$\Delta P_G - \Delta P_L = \frac{2HP_r}{f^0} \frac{d}{dt}(\Delta f) + B \Delta f \quad (2.43)$$

Expresando la ecuación anterior en por unidad y reordenando.

$$\Delta P_G^{(pu)} - \Delta P_L^{(pu)} = \frac{2H}{f^0} \frac{d}{dt}(\Delta f) + B^{(pu)} \Delta f \quad (2.44)$$

Por último, la ecuación anterior se transforma al dominio de Laplace.

$$\Delta F(s) = \frac{\Delta P_G(s) - \Delta P_L(s)}{B + \left(\frac{2H}{f^0}\right)s} \quad (2.45)$$

$$\Delta F(s) = [\Delta P_G(s) - \Delta P_L(s)] \left(\frac{K_{ps}}{1 + T_{ps}s} \right) \quad (2.46)$$

$$T_{ps} = \frac{2H}{Bf^0} \quad (2.47)$$

$$K_{ps} = \frac{1}{B} \quad (2.48)$$

Donde T_{ps} representa la constante de tiempo equivalente del sistema de potencia, H es la constante de inercia, B el coeficiente de amortiguamiento carga-frecuencia y f^0 la frecuencia nominal del sistema. Físicamente, T_{ps} determina la rapidez con la que la frecuencia responde ante una perturbación de potencia [28]. Finalmente, la representación de (2.46) en un diagrama de bloques se muestra en la Fig. 2.12.

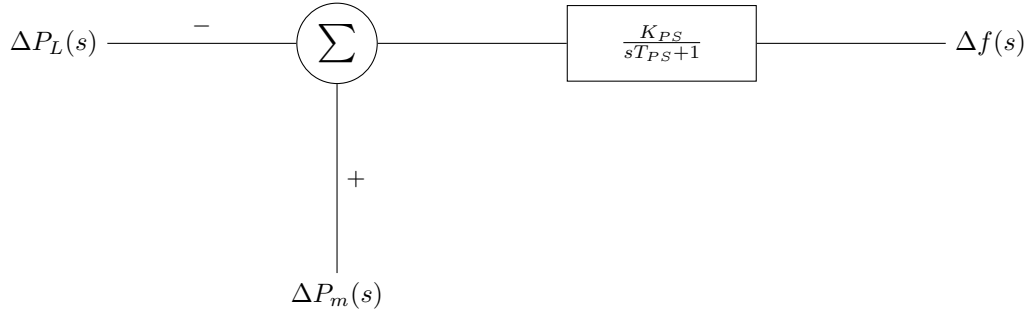


Figura 2.12: Modelo en frecuencia del cambio incremental carga-generación.

2.4. Áreas de Control

Un área de control se define como una región del sistema eléctrico conformada por un conjunto de generadores estrechamente acoplados que operan de forma coordinada. Esta operación implica que los generadores responden colectivamente ante variaciones en la carga o en los ajustes de los reguladores de velocidad, lo que permite suponer que la frecuencia es prácticamente uniforme en toda el área, tanto en condiciones estacionarias como transitorias. En sistemas eléctricos de gran escala, como redes nacionales, es común dividir la infraestructura en múltiples áreas operativas, cada una considerada un área de control independiente. Cada área puede representarse mediante su propio modelo de AGC.

2.4.1. Área Aislada

Un área aislada es un sistema que opera sin interconexión eléctrica con otras áreas operativas o de control, por lo que debe mantener el equilibrio entre generación y demanda utilizando únicamente sus propios recursos. La dinámica de un área aislada se modela como un sistema de control en lazo cerrado, como se muestra en la Figura 2.1. El ACE se define únicamente en función de la desviación de frecuencia como:

$$ACE_{\text{aislado}}(s) = -\beta \Delta f(s) \quad (2.49)$$

Donde β representa el *bias* de frecuencia, parámetro que define la sensibilidad del área ante desviaciones de frecuencia y determina el nivel de acción correctiva que debe ejercer el AGC. La acción correctiva del AGC es modulada mediante un controlador proporcional-integral (PI), cuya función de transferencia es:

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (2.50)$$

Por tanto, la señal de control generada por la regulación secundaria es:

$$\Delta P_c(s) = G_{PI}(s) ACE(s) \quad (2.51)$$

La entrada al gobernador incorpora la acción proporcional asociada al estatismo del gobernador siendo la regulación primaria, por lo que,

$$\Delta P'_c(s) = \Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta f(s) \quad (2.52)$$

Donde $\frac{1}{R}$ representa la característica de droop del gobernador. El comportamiento dinámico del gobernador se modela como un sistema de primer orden:

$$G_g(s) = \frac{1}{1 + sT_g} \quad (2.53)$$

La salida del gobernador, asociada a la apertura de la válvula de vapor, es:

$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1 + sT_g} \Delta P'_c(s) \quad (2.54)$$

La potencia mecánica entregada al generador es,

$$\Delta P_m(s) = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (2.55)$$

El modelo generador-carga previamente obtenido se expresa como:

$$\Delta f(s) = \frac{K_{ps}}{1 + sT_{ps}} [\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s)] \quad (2.56)$$

2.4.2. Resultados de Área Aislada

A continuación se presentan y discuten los resultados de las simulaciones dinámicas realizadas sobre distintos esquemas de AGC en un sistema de potencia de una sola área con generación térmica de recalentamiento simple, con el fin de establecer un punto de referencia sobre el comportamiento de la frecuencia ante perturbaciones de carga. La simulación presentada evalúa la respuesta con distintos tipos de controladores: I, PI y el PID, ante una perturbación de carga en escalón (SLP) del 1%. En este contexto, se compara el desempeño de los controladores en términos de estabilidad, tiempo de establecimiento y sobreimpulso de la respuesta transitoria de desviación de frecuencia. Para lo anterior, se integran los elementos del gobernador, la turbina térmica de recalentamiento simple correspondiente al modelo detallado en [25], la carga, el sistema de potencia, su respectivo controlador y sus retroalimentaciones, como se muestra en la Figura 2.13. Los parámetros del sistema se muestran en la Tabla 2.1. Mientras que las ganancias utilizadas en el controlador son las reportadas en la Tabla 2.3. Por último, la potencia de referencia, que se incluyó por generalidad del modelo, es nula en las simulaciones presentadas en esta tesis.

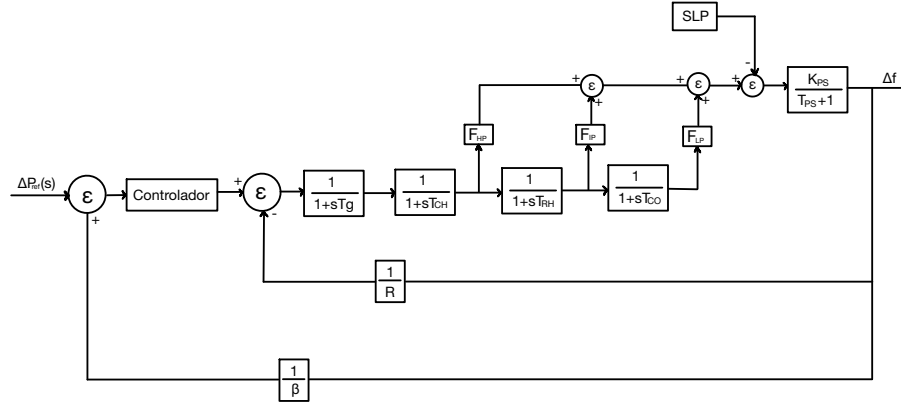


Figura 2.13: Modelo dinámico representativo de un área térmica empleado en estudios LFC.

Tabla 2.1: Parámetros del sistema

Área de Control	Governador	Turbina	Sistema de Potencia	Constantes de Regulación
Área #1	$T_g = 0.08$	$T_{CH} = 0.3$ $F_{HP} = 0.3$ $T_{RH} = 4$ $F_{IP} = 0.4$ $T_{CO} = 0.3$ $F_{LP} = 0.3$	$T_{ps} = 20$ $K_{ps} = 120$	$R = 2.4$ $B = 0.425$

Tabla 2.2: Ganancias de los controladores I, PI y PID

Ganancias	I	PI	PID
K_I	0.89	0.7605	0.59
K_P	/	0.18	1.674
K_D	/	/	1.875

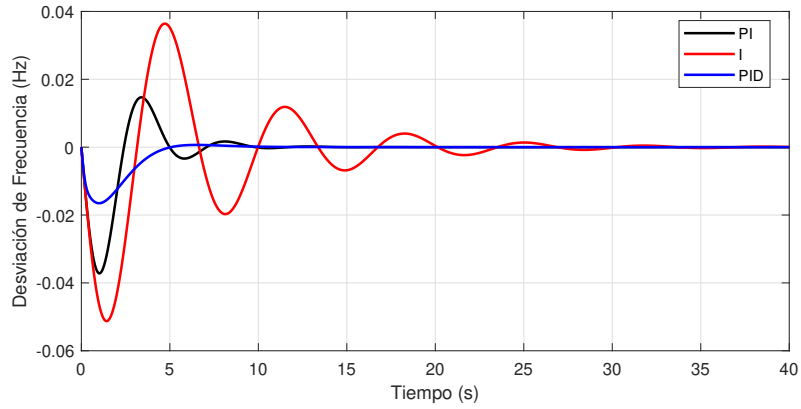


Figura 2.14: Desviación de frecuencia en Área Aislada

Al analizar la gráfica de la Figura 2.14, se observa que el controlador PID presentó el mejor desempeño dinámico, alcanzando el estado estacionario en aproximadamente cinco segundos. El control PI mostró, de igual forma, una buena respuesta, alcanzando el estado estable en aproximadamente 10 segundos. En contraste, el controlador integrador exhibió una respuesta más lenta y oscilante, con mayores amplitudes de desviación de frecuencia ante la perturbación, lo que es poco deseable.

2.4.3. Áreas Interconectadas

Los sistemas eléctricos multiarea están compuestos por varias regiones o áreas geográficas interconectadas mediante líneas de transmisión, que permiten el intercambio de energía entre ellas.

En este contexto, los acuerdos de intercambio de potencia establecen la necesidad de regular simultáneamente la frecuencia en cada área, así como el intercambio programado de flujo de potencia activa entre las áreas de control para mantener la estabilidad operativa del sistema eléctrico.

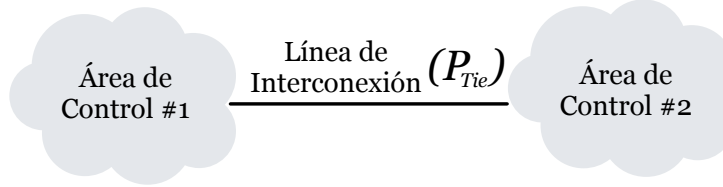


Figura 2.15: Dos áreas interconectadas

Considerando la Figura 2.15, y tomando el área 1 como referencia, donde el flujo de potencia activa del área 1 al área 2 a través de la línea de transmisión ideal es dado por

$$P_{\text{tie},12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0) \quad (2.57)$$

donde

- $P_{\text{tie},1}$: Potencia activa que fluye desde el área 1 hacia el área 2 a través de la línea de interconexión (tie line).
- $|V_1|$: Magnitud del voltaje en el nodo equivalente del área 1.
- $|V_2|$: Magnitud del voltaje en el nodo equivalente del área 2.
- X_{12} : Reactancia equivalente de la línea de interconexión entre las áreas 1 y 2.
- δ_1^0 : Ángulo de fase del generador equivalente del área 1 en condiciones de equilibrio.
- δ_2^0 : Ángulo de fase del generador equivalente del área 2 en condiciones de equilibrio.

La ecuación (2.57) representa el modelo clásico del flujo de potencia activa entre dos nodos interconectados por una línea de transmisión. La Figura 2.16 muestra la representación esquemática de una estación generadora acoplada a otro nodo del sistema eléctrico. En este esquema, $V_1 \angle \theta_1$ denota el nodo emisor, mientras que $V_2 \angle \theta_2$ representa el nodo receptor, ambos enlazados a través de la reactancia de la línea, donde se produce efectivamente la transferencia de potencia que describe la ecuación (2.57).

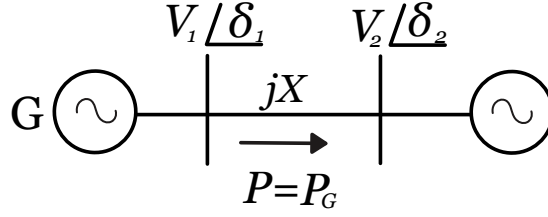


Figura 2.16: Transmisión de potencia en una línea desde una estación generadora

Considerando que el ángulo eléctrico $\delta_1(t)$ es proporcional a la integral de la desviación de frecuencia respecto a la frecuencia nominal, es decir, $\delta_1(t) = \int 2\pi\Delta f_1(t) dt$, $\delta(t)$ se expresa en el dominio de Laplace por.

$$\delta_1(s) = \frac{2\pi}{s} \Delta F_1(s) \quad (2.58)$$

La linealización de (2.57), asumiendo pequeños ángulos de diferencia: $\sin(\delta_1 - \delta_2) \approx \delta_1 - \delta_2$, permite analizar el comportamiento del sistema ante pequeñas perturbaciones. Esta linealización da lugar al concepto de coeficiente de sincronismo, representado por (2.59), que cuantifica la sensibilidad del flujo de potencia en la línea de interconexión ante pequeñas variaciones en los ángulos del rotor de las áreas 1 y 2. Además, este coeficiente proporciona una medida de la robustez del acoplamiento entre ambas áreas del sistema.

$$T_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{P_r X_{12}} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0) \quad (2.59)$$

Un análisis similar puede realizarse para el área de control 2, lo que da lugar al modelo dinámico, mostrado en la figura 2.17, donde el coeficiente de sincronización establece la relación entre el flujo incremental de potencia y la integral de las desviaciones de frecuencia que ocurren en cada área tras una perturbación. Dado que cada área está normalizada con su propia potencia base, es necesario introducir un factor de escalamiento que permita expresar el coeficiente de sincronismo desde una sola referencia. En este caso, considerando como referencia el área 1, dicho escalamiento se define como el cociente entre las potencias base dado por.

$$a_{12} = \frac{P_{r1}}{P_{r2}} \quad (2.60)$$

Lo que permite expresar el coeficiente equivalente en el área 2 como.

$$T_{21} = a_{12} T_{12} \quad (2.61)$$

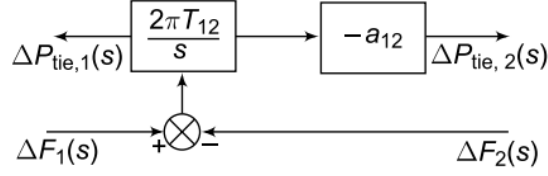


Figura 2.17: Modelo del flujo de potencia en la línea de interconexión entre dos áreas

Incorporando el efecto de P_{tie} al sistema, se tendrá a la salida del generador y carga.

$$\Delta F_1(s) = \frac{1}{2H_1s + B_1} [\Delta P_{G1}(s) - \Delta P_{L1}(s) - \Delta P_{tie,1}(s)] \quad (2.62)$$

Aproximando la dinámica de frecuencia con un modelo de primer orden, como se muestra en la figura 2.18, la ecuación puede expresarse como.

$$\Delta F_1(s) = [\Delta P_{G1}(s) - \Delta P_{L1}(s) - \Delta P_{tie,1}(s)] \times \frac{K_{ps1}}{1 + T_{ps1}s} \quad (2.63)$$

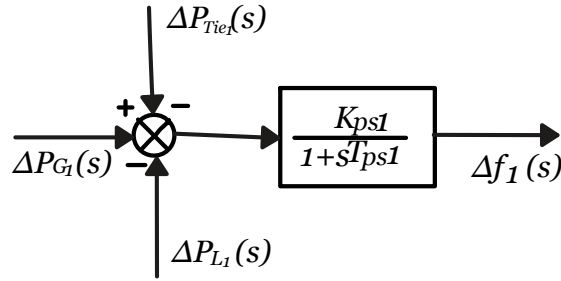


Figura 2.18: Modelo de la desviación de frecuencia en un área interconectada

2.5. Resultados de Sistema de Dos Áreas Interconectadas

En este caso se analiza un sistema AGC de dos áreas, siendo cada área integrada por el mismo tipo de turbina y controlador, como se muestra en la Figura 2.13. Los parámetros de los componentes son los indicados en la Tabla 2.1 para el área 1 y el área 2, respectivamente. Las ganancias utilizadas se ajustaron a las presentadas en Tabla 2.3. Por último, las ecuaciones de espacio de estado se reportan en el Apéndice D.1, D.2 y D.3.

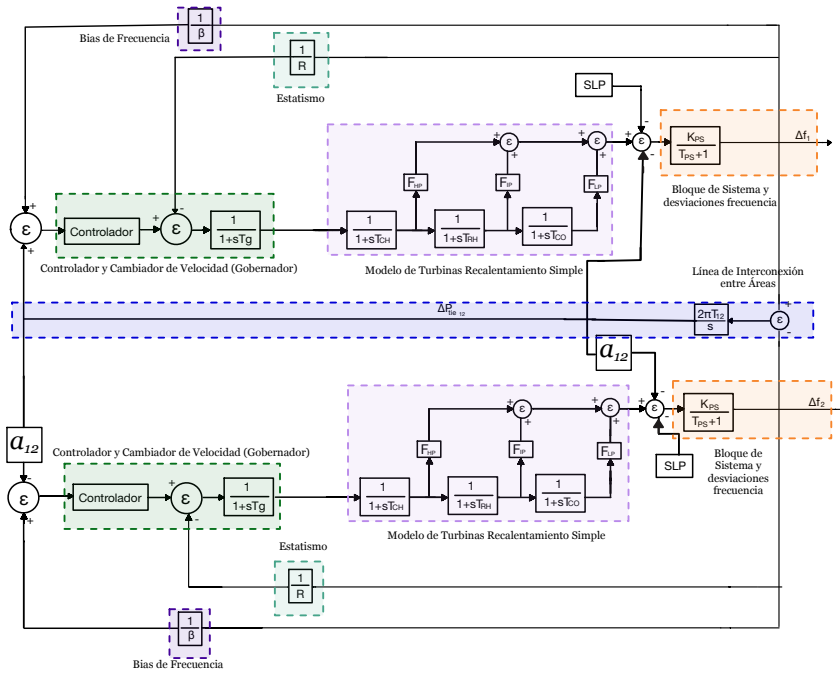


Figura 2.19: Modelo dinámico del sistema multiárea con interconexión y control automático de generación.

Tabla 2.3: Ganancias de los controladores I, PI y PID en ambas áreas

Ganancias	Área #1			Área #2		
	I	PI	PID	I	PI	PID
K_I	0.129	1.3	2.9839	0.25	3.5	2.29
K_P	/	0.98	1.9563	/	3.5	1.963
K_D	/	/	1.8516	/	/	0.8516

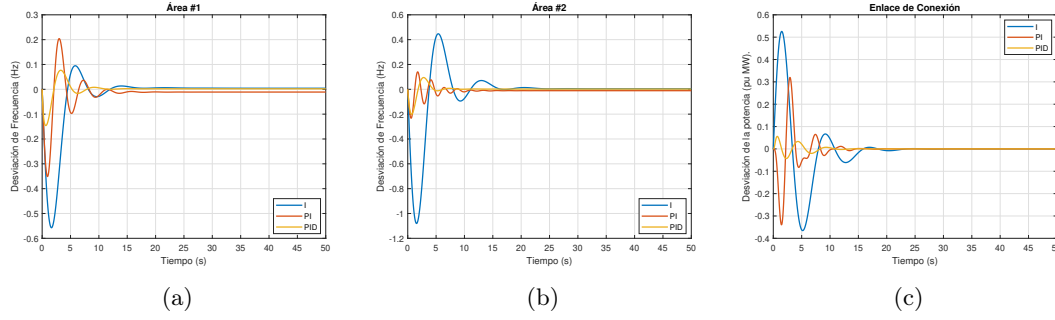


Figura 2.20: Respuesta dinámica del sistema de dos áreas ante una SLP del 10 %: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2 y (c) Flujo de potencia en el enlace de interconexión.

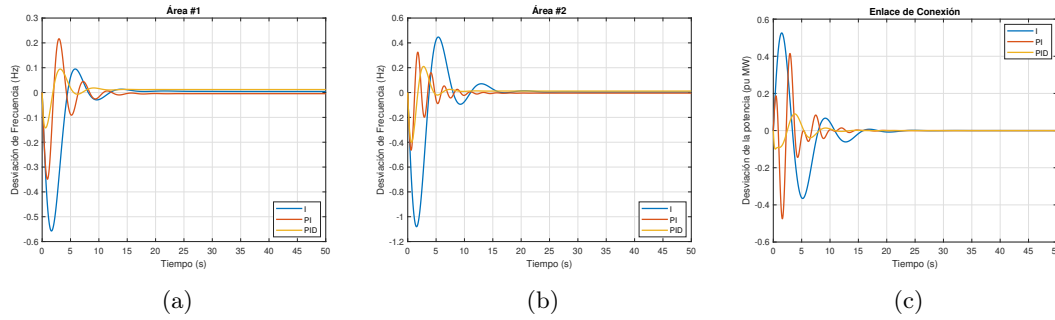


Figura 2.21: Respuesta dinámica del sistema de dos áreas ante una SLP del 20 %: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2 y (c) Flujo de potencia en el enlace de interconexión.

La respuesta dinámica del sistema ante un incremento simultaneo de carga en escalón (SLP) del 10 % en ambas áreas de control, se muestra en la Figura 2.20, donde la evolución del cambio de frecuencia en las áreas 1 y 2 se muestran en las Figuras 2.20a y 2.20b, respectivamente, para diferentes tipos de controladores utilizados en el AGC. De estos resultados es claro que la variación de frecuencia se amortigua dentro de rangos de tiempo aceptables, siendo el controlador integrador el de menor rendimiento, ya que tarda más en estabilizar el sistema y se tienen mayores excursiones de frecuencia. Por el contrario, el controlador PI y el PID logran una mejoría en el tiempo de estabilización y sobre impulsos de frecuencia, siendo el PID el que tiene un mejor desempeño. La figura 2.20c muestra el intercambio de potencia en el enlace de conexión interárea, donde los tres controladores logran llevar el error de la potencia a un valor nulo en estado estacionario; sin embargo, sus respuestas dinámicas difieren, siendo el controlador I el que presenta un desempeño más lento y con mayores oscilaciones de potencia. El controlador PI reacciona con mayor rapidez pero con mayores oscilaciones que tardan en amortiguarse, mientras que el controlador PID denota rapidez con buen amortiguamiento, mostrando menor sobre impulso y alcanzando la estabilidad en menor tiempo. Los resultados reportados en la Figura 2.21 son las respuestas dinámicas del mismo sistema analizado con dos áreas, pero con un incremento de carga del 20 %, solo en el

área de control 2. Para este análisis se usan las mismas ganancias reportadas en la Tabla 2.3. En el caso del Área 1, mostrado en la Figura 2.21a, se puede observar un comportamiento parecido al previamente analizado, mientras que en la Figura 2.21b se observa mayores excursiones de la desviación de frecuencia con los controladores PI y PID, mientras que para el controlador I se mantuvo prácticamente igual. Por último, de la Figura 2.21c se infiere que hubo un cambio en comportamiento con el controlador PI con respecto a su desempeño con una menor carga.

2.6. Conclusiones

En este capítulo se estableció la base para el análisis dinámico de la regulación de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia. Se mostró que la frecuencia es un indicador directo del equilibrio entre generación y demanda, y que su variación ante perturbaciones puede describirse mediante la ecuación de oscilación o ecuación de oscilación, la cual constituye la base del comportamiento dinámico del generador síncrono. Asimismo, se reportó el modelo matemático del sistema de gobernanza, de la turbina y del generador, lo que permite representar sus interacciones mediante funciones de transferencia adecuadas para estudios de estabilidad de frecuencia. Lo cual permite analizar la acción de los mecanismos de control primario y secundario involucrados en la regulación de la frecuencia. Posteriormente, se analizó el flujo de potencia entre dos áreas de control mediante la formulación y linealización de la ecuación de potencia activa que fluye a través del enlace: P_{tie} , lo que permitió introducir el concepto de ACE como la variable central en la regulación secundaria. Este conjunto de formulaciones constituye la base del modelado matemático empleado en sistemas multiárea. Finalmente, se evalúa el comportamiento dinámico del sistema bajo distintos esquemas de control y condiciones de operación, tanto en un área aislada como en sistemas interconectados. Los resultados obtenidos permiten identificar diferencias claras en el desempeño dinámico de las estrategias de control consideradas, así como su impacto en la estabilidad de la frecuencia y en el intercambio de potencia entre áreas, sentando las bases para la incorporación y evaluación de mecanismos de soporte adicionales en capítulos posteriores.

Capítulo 3

Inclusión de Controladores Basados en Electrónica de Potencia para el Control de Frecuencia

El panorama energético se encuentra en constante evolución, impulsado por el incremento sostenido de la demanda eléctrica, que genera estrés en las líneas de transmisión, por la integración progresiva de fuentes de generación renovable de carácter estocástico, así como por el aumento de la variabilidad y la incertidumbre operativa. Estas condiciones aumentan las exigencias sobre la operación del sistema eléctrico de potencia, que debe garantizar niveles adecuados de calidad, confiabilidad y estabilidad, al mismo tiempo que optimiza el uso de los recursos económicos y de la infraestructura existente. A partir de las líneas de interconexión, se plantean estrategias de control que permitan regular el flujo de potencia entre áreas, sin requerir modificaciones estructurales significativas en la red de transmisión, y que favorezcan el equilibrio entre generación y demanda, mejorando así la seguridad operativa. En este capítulo se introduce y analiza la incorporación del TCSC y el enlace híbrido HVDC en la línea de interconexión entre áreas, con el propósito de evaluar su contribución al control del intercambio de potencia activa, así como su impacto en la regulación de frecuencia y estabilidad operativa del sistema eléctrico interconectado.

3.1. Descripción del Compensador Serie Controlador por Tiristores (TCSC)

El TCSC es un dispositivo FACTS en serie que ajusta la reactancia del circuito mediante el control que proporcionan los ángulos de disparo de los tiristores. El análisis se desarrolla a partir de la configuración del TCSC integrada al esquema AGC, mostrada en la Figura 3.1, donde se observa en la rama superior un capacitor, mientras que en la inferior se aprecia un reactor controlador por tiristores, el cual está constituido por un inductor conectado en serie con un par de tiristores en antiparalelo. Este esquema contribuye en su operación a regular la contribución inductiva al modificar el ángulo de disparo, el cual opera de forma inductiva o capacitiva, lo que permite regular el intercambio de potencia entre áreas, y con ello, reducir las desviaciones de frecuencia [1, 3, 4].

3.1.1. Modelado Matemático del Dispositivo

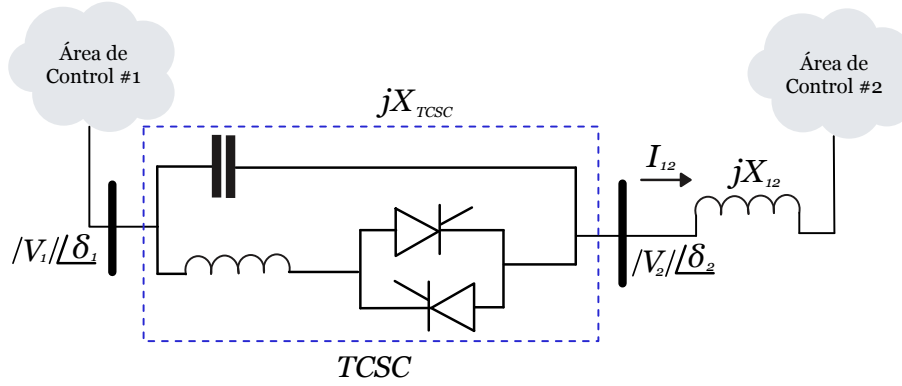


Figura 3.1: Modelo eléctrico equivalente del enlace interárea compensado mediante TCSC.

El TCSC se incorpora en serie con la línea de interconexión en el problema de áreas de control, con el objetivo de mejorar el comportamiento dinámico de la potencia interárea P_{tie} ante perturbaciones: su acción directa sobre la reactancia serie de la línea permite regular el flujo de potencia intercambiada entre áreas. Asimismo, debido a su respuesta rápida, el TCSC puede actuar como un soporte dinámico para el AGC, lo que permite mitigar transitorios severos de frecuencia [3, 4, 13]. Regresando a la ecuación (2.57), que describe el flujo de potencia en la línea de interconexión entre áreas planteada en el capítulo anterior, se incorpora el efecto del dispositivo TCSC mediante un término adicional que representa la modificación de la reactancia serie efectiva de la línea. La potencia de intercambio entre áreas, además de depender de los parámetros del sistema, se determina por la acción del TCSC [1, 4, 29]. En el sistema de dos áreas de control interconectadas como se muestra en la Figura 3.1, los fasores de voltaje del área 1 y área 2 se representan por.

$$V_1 = |V_1| \angle \delta_1 = V_1 e^{j\delta_1} \quad (3.1)$$

$$V_2 = |V_2| \angle \delta_2 = V_2 e^{j\delta_2} \quad (3.2)$$

Además, la impedancia equivalente del enlace serie compensado por el TCSC se expresa como.

$$Z_{eq} = j(X_{12} - X_{TCSC}) \quad (3.3)$$

Con base en las ecuaciones anteriores, el flujo de corriente a través de la línea de transmisión del enlace es dada por.

$$\bar{I}_{12} = \frac{V_1 e^{j\delta_1} - V_2 e^{j\delta_2}}{j(X_{12} - X_{TCSC})} = \frac{-j(V_1 e^{j\delta_1} - V_2 e^{j\delta_2})}{(X_{12} - X_{TCSC})} \quad (3.4)$$

El conjugado complejo de la corriente queda dado por.

$$\bar{I}_{12}^* = \frac{j(V_1 e^{-j\delta_1} - V_2 e^{-j\delta_2})}{(X_{12} - X_{TCSC})} \quad (3.5)$$

Utilizando el concepto de potencia compleja y la identidad de Euler, el flujo de potencia activa y reactiva que fluye a través de la línea de transmisión desde el área 1 hacia el área 2 se calcula por medio de.

$$\bar{S}_{12} = \frac{j}{(X_{12} - X_{TCSC})} [V_1^2 - V_1 V_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) - j V_1 V_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)] \quad (3.6)$$

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{(X_{12} - X_{TCSC})} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.7)$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos(\delta_1 - \delta_2)}{(X_{12} - X_{TCSC})}. \quad (3.8)$$

Con el objetivo de expresar el efecto de la compensación serie en forma normalizada, se define el factor de compensación del TCSC como.

$$X_{TCSC} = T_c X_{12}, \quad (3.9)$$

Por lo que.

$$X_{12} - X_{TCSC} = X_{12}(1 - T_c) \quad (3.10)$$

Incorporando (3.10) en (3.7) se obtiene la potencia activa en función del factor de compensación.

$$P_{12} = P_{tie12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}(1 - T_c)} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.11)$$

El flujo de potencia activa del enlace compensado es una función no lineal de las variables angulares y del nivel de compensación serie $(\delta_1^0, \delta_2^0, T_c^0)$. Para analizar el comportamiento dinámico ante pequeñas perturbaciones, se debe linealizar, por lo que se usa la expansión de Taylor alrededor de los puntos de operación ya mencionados, obteniendo.

$$\Delta P_{tie12} = \left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial \delta_1} \right|_0 \Delta \delta_1 + \left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial \delta_2} \right|_0 \Delta \delta_2 + \left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial T_c} \right|_0 \Delta T_c \quad (3.12)$$

Al derivar parcialmente la expresión no lineal del flujo de potencia respecto a las variables angulares y al nivel de compensación, y evaluar dichas derivadas en el punto de operación, se obtiene la expresión incremental linealizada.

$$\Delta P_{tie12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}(1 - T_c^0)} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0) (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) + \frac{V_1 V_2}{X_{12}(1 - T_c^0)^2} \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0) \Delta T_c \quad (3.13)$$

La ecuación anterior se simplifica al considerar lo siguiente,

$$T_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0), \quad (3.14)$$

$$J_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0), \quad (3.15)$$

De esa forma, si se sustituye (3.14) y (3.15) en (3.13) se obtiene la ecuación incremental del sistema:

$$\Delta P_{Tie12} = \frac{T_{12}}{(1 - T_C)} (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) + \frac{J_{12}}{(1 - T_C)^2} \Delta T_C \quad (3.16)$$

Donde el primer término representa la contribución de sincronización del enlace. Mientras que el segundo termino incorpora la contribución directa del TCSC sobre el intercambio de potencia a través de la variación incremental de T_c . La diferencia angular incremental entre áreas se define como:

$$\Delta \delta_{12} = \Delta \delta_1 - \Delta \delta_2 \quad (3.17)$$

Los incrementos angulares $\Delta \delta_1$ y $\Delta \delta_2$ se expresan en función de las desviaciones de frecuencia como,

$$\Delta \delta_1(t) = 2\pi \int_0^t \Delta f_1(\tau) d\tau \quad (3.18)$$

$$\Delta \delta_2(t) = 2\pi \int_0^t \Delta f_2(\tau) d\tau \quad (3.19)$$

Al aplicar la transformada de Laplace a (3.18) y (3.19) bajo condiciones iniciales nulas, y sustituyendo las expresiones resultantes en (3.16), se obtiene:

$$\Delta \delta_1(s) - \Delta \delta_2(s) = \frac{2\pi}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (3.20)$$

Sustituyendo (3.20) en (3.16), se obtiene la siguiente expresión en el dominio de Laplace,

$$\Delta P_{tie12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{(1 - T_c^0)s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] + \frac{J_{12}}{(1 - T_c^0)^2} \Delta T_c(s) \quad (3.21)$$

El comportamiento dinámico del TCSC se representa mediante una función de transferencia corresponde a un controlador proporcional dinámico de primer orden.

$$\frac{K_{TCSC}}{1 + sT_{TCSC}} \quad (3.22)$$

Por tanto, el cambio incremental del factor de compensación puede expresarse como,

$$\Delta T_C(s) = \frac{K_{TCSC}}{1 + sT_{TCSC}} \Delta Error(s) \quad (3.23)$$

Donde $\Delta Error(s)$ representa la señal de entrada del controlador. En aplicaciones de control de frecuencia en sistemas multiárea, cuando el TCSC se instala en el área de control 1, se selecciona como señal de control la desviación de frecuencia en esta área [3, 4, 13]:

$$\Delta Error(s) = \Delta f_1(s) \quad (3.24)$$

Bajo esta consideración, la variación del factor de compensación del TCSC puede expresarse como

$$\Delta T_C(s) = \frac{K_{TCSC}}{1 + sT_{TCSC}} \Delta f_1(s) \quad (3.25)$$

Sustituyendo la expresión (3.25) en la ecuación de la desviación de potencia de la línea de interconexión (3.21), se obtiene,

$$\Delta P_{Tie12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s(1 - T_c^0)} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] + \frac{J_{12}}{(1 - T_c^0)^2} \left(\frac{K_{TCSC}}{1 + sT_{TCSC}} \right) \Delta f_1(s) \quad (3.26)$$

La derivación detallada de las ecuaciones del modelo del TCSC puede consultarse en el Apéndice D.4.

3.1.2. Inclusión en el Problema de Control de Frecuencia

Considerando un sistema multiarea simétrico con controladores PI, se integra un TCSC en la línea de interconexión entre el área 1 y el área 2, como se muestra en la Figura 3.2. La inclusión del TCSC introduce una reactancia serie efectiva variable en el enlace de interconexión, lo cual impacta directamente el flujo de potencia activa entre áreas y permite incorporar una acción suplementaria sobre la dinámica del control carga-frecuencia [3, 15, 16]. Las ecuaciones de estado que describen el sistema completo se presentan en el Apéndice D.5.

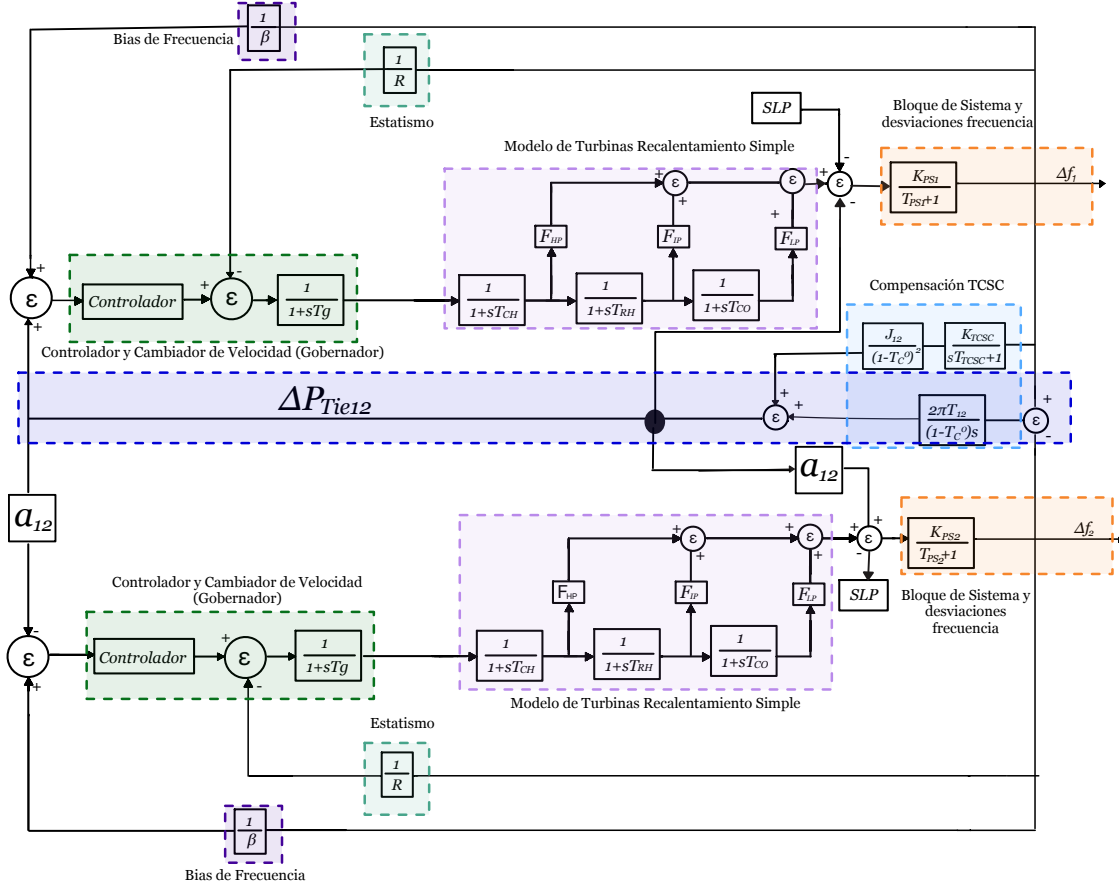


Figura 3.2: Modelo dinámico del sistema multiárea con interconexión y control automático de generación + Compensación TCSC.

Con el objetivo de asegurar la homogeneidad dimensional y la concordancia con el esquema estándar de control carga-frecuencia, las magnitudes de potencia se expresan en sistema por unidad (p.u.). Sean P_{r1} y P_{r2} las potencias base de las áreas 1 y 2, respectivamente. La variación de potencia en la línea de interconexión se define como.

$$\Delta P_{tie,pu}(s) = \frac{\Delta P_{tie}(s)}{P_{r1}} \quad (3.27)$$

Los coeficientes de sincronización y sensibilidad del enlace se normalizan como.

$$T_{12,pu} = \frac{T_{12}}{P_{r1}} \quad (3.28)$$

$$J_{12,pu} = \frac{J_{12}}{P_{r1}} \quad (3.29)$$

De esta forma, la expresión incremental del enlace en presencia del TCSC, previamente obtenida mediante linealización, puede escribirse en forma general como.

$$\Delta P_{tie12,pu}(s) = \frac{2\pi T_{12,pu}}{(1 - T_c^0)s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] + \frac{J_{12,pu}}{(1 - T_c^0)^2} \Delta T_c(s) \quad (3.30)$$

El análisis del flujo de potencia activa del área 2 hacia el área 1, desarrollado en el Apéndice D.4, da como resultado la siguiente ecuación en p.u.

$$\Delta P_{tie21,pu}(s) = \frac{2\pi T_{21,pu}}{(1 - T_c^0)s} [\Delta f_2(s) - \Delta f_1(s)] + \frac{J_{21,pu}}{(1 - T_c^0)^2} \Delta T_c(s) \quad (3.31)$$

Al introducir el factor de conversión entre nodos.

$$a_{12} = \frac{P_{r1}}{P_{r2}} \quad (3.32)$$

Por último, considerando que $X_{21} = X_{12}$, los coeficientes de sincronización normalizados se relacionan mediante.

$$T_{21,pu} = a_{12} T_{12,pu} \quad (3.33)$$

$$J_{21,pu} = -a_{12} J_{12,pu} \quad (3.34)$$

De tal manera.

$$\Delta P_{tie21,pu}(s) = -a_{12} \Delta P_{tie12,pu}(s) \quad (3.35)$$

En consecuencia, ambas expresiones, (3.26) y (3.35), se integran en el modelo clásico de dos áreas en AGC, como se aprecia en la Figura 3.2. Definida la interacción dinámica entre las áreas de control mediante el enlace compensado, se establecen las entradas que excitan el sistema en el problema de control de frecuencia. Partiendo de la teoría clásica del control carga-frecuencia, las perturbaciones que excitan al sistema corresponden a variaciones de carga en cada área, las cuales se agrupan en el vector de entradas como.

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \Delta P_{L1}(t) \\ \Delta P_{L2}(t) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

donde $\Delta P_{L1}(t)$ y $\Delta P_{L2}(t)$ representan las variaciones de carga en el área 1 y el área 2, respectivamente. Por su parte, el vector de salidas se define como.

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \Delta f_1(t) \\ \Delta f_2(t) \\ \Delta P_{tie12pu}(t) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Donde $\Delta f_1(t)$ y $\Delta f_2(t)$ corresponden a las desviaciones de frecuencia en las áreas de control 1 y 2, respectivamente, y $\Delta P_{tie12pu}(t)$ describe la variación del flujo de potencia activa en la línea de interconexión. Definidas las entradas y salidas del sistema, el modelo dinámico se construye a partir del balance de potencia en cada área, en el que la potencia de interconexión vincula ambos subsistemas. Siendo que, como se describe en (2.63) La desviación de frecuencia en el área 1 es descrita por.

$$\dot{\Delta f}_1(t) = -\frac{1}{T_{PS1}} \Delta f_1(t) + \frac{K_{PS1}}{T_{PS1}} \left(\Delta P_{m1}(t) - \Delta P_{L1}(t) - \Delta P_{tie12pu}(t) \right) \quad (3.38)$$

Donde la variación de frecuencia depende del desbalance entre potencia mecánica y potencia eléctrica, modulado por la inercia y amortiguamiento del sistema. De igual manera, la expresión de cambio de frecuencia para el área 2 es.

$$\dot{\Delta f}_2(t) = -\frac{1}{T_{PS2}} \Delta f_2(t) + \frac{K_{PS2}}{T_{PS2}} \left(\Delta P_{m2}(t) - \Delta P_{L2}(t) - \Delta P_{tie21pu}(t) \right) \quad (3.39)$$

$$\dot{\Delta f}_2(t) = -\frac{1}{T_{PS2}} \Delta f_2(t) + \frac{K_{PS2}}{T_{PS2}} \left(\Delta P_{m2}(t) - \Delta P_{L2}(t) + a_{12} \Delta P_{tie12pu}(t) \right) \quad (3.40)$$

La acción del control secundario de frecuencia se incorpora mediante la definición del error de control de área (ACE) [8, 13]. Para el área 1, el ACE se define como

$$ACE_1(t) = \beta_1 \Delta f_1(t) + \Delta P_{tie12pu}(t) \quad (3.41)$$

Donde β_1 es el sesgo de frecuencia del área 1, y el término asociado a la potencia de enlace de interconexión permite que el control secundario actúe sobre el intercambio de potencia entre áreas. El Error de Control de área correspondiente al área 2 se define como.

$$ACE_2(t) = \beta_2 \Delta f_2(t) + \Delta P_{tie21pu}(t) = \beta_2 \Delta f_2(t) - a_{12} \Delta P_{tie12pu}(t) \quad (3.42)$$

Estas ecuaciones constituyen la base para la formulación completa en espacio de estados del sistema multiarea con TCSC, la cual se presenta de forma detallada y matricial en el Apéndice D.5.

3.1.3. Resultados

Los resultados de la simulación fueron obtenidos por medio de simulación en MATLAB-Simulink; con los parámetros del sistema pertinentes al TCSC reportados en el Apéndice B.

Los resultados obtenidos para el sistema multiárea con la inclusión del TCSC se muestran en la Figura 3.3, al aplicar una perturbación de carga del 10 % en el área 1, mientras que en el área 2 se aplica una carga SLP del 20 %. En esta figura se presenta la comparación entre el esquema convencional AGC de dos áreas y el esquema con la incorporación del TCSC a la línea de interconexión; las ganancias incluidas en el controlador PI son reportadas en la Tabla 3.1.

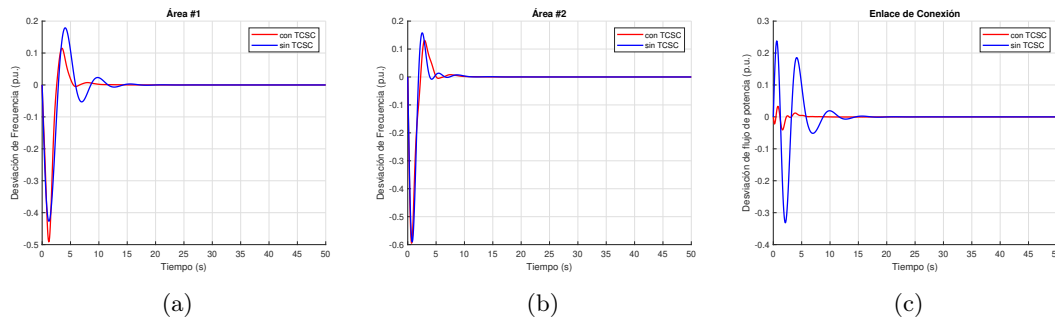


Figura 3.3: Comparación respuesta sistema TCS y AGC (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2 y (c) Flujo de potencia en la línea de interconexión.

Tabla 3.1: Ganancias de controladores en cada área AGC y TCSC

Ganancias	área #1	área #2
K_i	0.5	1
K_p	0.5	2

En la Tabla 3.2 se muestran los indicadores de desempeño obtenidos para cada escenario mostrado en la Figura 3.3. En este caso, el Nadir de frecuencia cuantifica la mayor desviación negativa de la frecuencia del sistema tras la perturbación. El tiempo al Nadir indica el instante en que se alcanza dicha condición extrema. Finalmente, el tiempo de asentamiento corresponde al intervalo requerido para que la respuesta permanezca de manera sostenida dentro de una banda de tolerancia reducida alrededor de su valor en régimen permanente.

Tabla 3.2: Comparación dinámica del sistema con y sin TCSC

Señal	AGC convencional		AGC con TCSC	
Área 1	Nadir	-0.4266 Hz	Nadir	-0.4914 Hz
	Tiempo de Nadir	1.156 s	Tiempo de Nadir	1.156 s
	Tiempo de asentamiento	11.012 s	Tiempo de asentamiento	5.219 s
Área 2	Nadir	-0.5904 Hz	Nadir	-0.5949 Hz
	Tiempo de Nadir	0.810 s	Tiempo de Nadir	0.655 s
	Tiempo de asentamiento	5.923 s	Tiempo de asentamiento	4.855 s
P_{tie}	Nadir	-0.3317 pu	Nadir	-0.0407 pu
	Tiempo de Nadir	2.135 s	Tiempo de Nadir	1.659 s
	Tiempo de asentamiento	10.955 s	Tiempo de asentamiento	4.171 s

Los resultados obtenidos permiten evaluar el impacto dinámico de la inclusión del dispositivo TCSC en el esquema de AGC. A partir de las respuestas gráficas de la Figura 3.3 y sus datos cuantitativos de la Tabla 3.2 se realiza la siguiente comparativa. En la dinámica de desviación de frecuencia del área 1, mostrada en la Figura 3.3a, se aprecia que el Nadir de la desviación de frecuencia con la incorporación del TCSC fue ligeramente mayor (-0.4914Hz) con respecto al esquema tradicional de AGC (-0.4266 Hz). El Nadir ante la perturbación ocurrió en el mismo momento en ambos casos (1.156 s), pero su tiempo de asentamiento en el esquema tradicional fue mayor (11.012s) si se compara con el tiempo de asentamiento del AGC con TCSC (5.129s), de forma que esto indica que el esquema de control suplementario con el TCSC presenta una menor componente oscilatoria. En la evolución de la desviación de frecuencia del área 2, reportada en la Figura 3.3b, se observa que ambos casos presentaron el mismo nadir (-0.5904 Hz) en distintos momentos: primero ocurre cuando la línea es compensada con el TCSC. Asimismo, el tiempo de asentamiento fue más bajo en el caso del TCSC (4.855 s) si se compara con el esquema convencional, que fue de 5.923 s. La mejora más significativa se encuentra en la línea de interconexión P_{tie} , como se aprecia en la Figura 3.3c, donde se observa el verdadero efecto del dispositivo FACTS; sin la incorporación del TCSC, la respuesta presenta oscilaciones de mayor amplitud (-0.3317 pu con el AGC convencional y -0.0407 pu con el TCSC), ya que el efecto del TCSC sobre la línea consiste en reducir la reactancia equivalente entre áreas de control. El tiempo en el que ocurre el Nadir es

menor (1.659s, a diferencia del AGC, con 2.135s), y la perturbación se corrige en menos tiempo (4.171s) que el tiempo de asentamiento del esquema tradicional (10.955s).

3.2. Análisis de Sensibilidades considerando el TCSC

El análisis de sensibilidades se realizó con el propósito de evaluar la robustez del sistema ante variaciones en parámetros clave del modelo dinámico y del esquema de control. Con ello se permite identificar el grado de influencia de cada parámetro sobre la respuesta del sistema, así como determinar cuáles variables tienen mayor impacto en el desempeño del sistema. De esta manera, se valida su consistencia bajo diferentes escenarios de operación y se establecen los rangos de parámetros en los que la incorporación del dispositivo resulta más efectiva.

3.2.1. Modificación en la Constante de tiempo del Sistema $T_{ps} = 10$

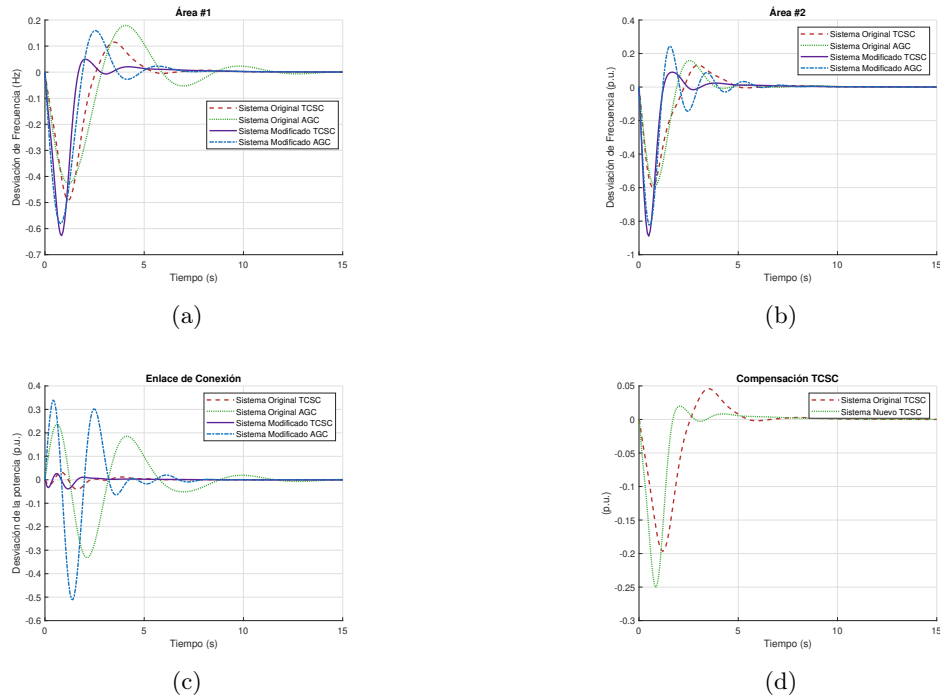


Figura 3.4: Comparación de la respuesta nominal y la modificación en el sistema: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

La reducción de la constante de tiempo del sistema de potencia, $T_{ps}(s)$, de 20 s a 10 s equivale a reducir la inercia del sistema, y con ello se observa una excursión de la frecuencia del sistema más abrupta, como se muestra en la Figura 3.4. En el área 1 se observa un nadir más grande que en el caso nominal; en el área 2, el sistema con TCSC presenta un sobreimpulso menor y una

recuperación más rápida que el esquema convencional. Con respecto a la potencia de enlace de interconexión ΔP_{tie} , se aprecia una reducción significativa del nadir y del sobreimpulso cuando se emplea el TCSC. La compensación del TCSC muestra una acción de control más rápida en los instantes inmediatamente posteriores a la perturbación. Al disminuir T_{ps} se acelera la dinámica del sistema, pero se incrementa la perturbación inicial. De esta forma, el TCSC permite mitigar el efecto indeseable de las oscilaciones por baja inercia, pero se observa un nadir mayor.

3.2.2. Modificación en la Constante de tiempo del Sistema $T_{ps} = 30$

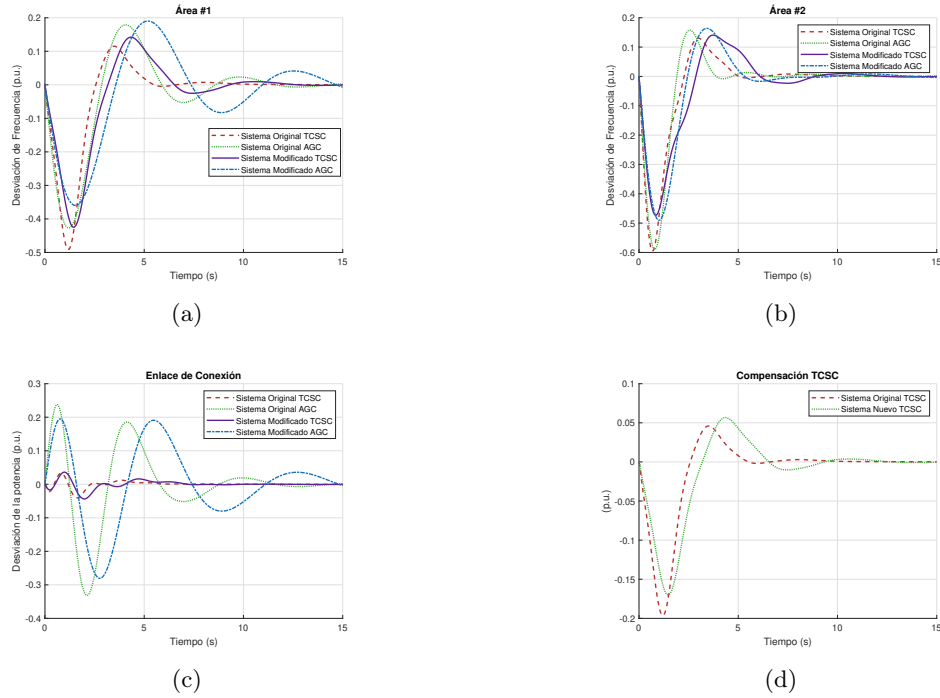


Figura 3.5: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con $T_{ps} = 30$ s: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

El incremento de la constante de tiempo del sistema de potencia de 20 s a 30 s produce una respuesta dinámica más lenta en el sistema. Esta modificación reduce la rapidez con la que el sistema reacciona ante la perturbación aplicada, generando una respuesta más amortiguada, pero con mayor retardo, como se observa en la Figura 3.5. En el área 1 se observa una disminución del nivel de oscilaciones respecto al caso nominal; sin embargo, el nadir presenta una ligera variación, siendo más grande debido a la menor velocidad de reacción del sistema. La recuperación hacia el estado estacionario es más suave, aunque con un tiempo de asentamiento ligeramente mayor; en el área 2 se observa, a la par, una respuesta más gradual y con menores oscilaciones en comparación con los casos de menor T_{ps} ; en la línea de interconexión, ΔP_{tie} , se aprecia una dinámica más lenta.

De tal forma, también se aprecia que el intercambio de potencia tarda más en estabilizarse debido al mayor retardo introducido por el aumento de la constante de tiempo. Finalmente, la compensación del TCSC muestra un comportamiento más tardío. Aunque la acción de control es menos oscilatoria, el sobreimpulso final resulta mayor y aparece en un instante posterior que en el caso nominal.

3.2.3. Modificación en la Ganancia del Sistema $K_{PS} = 80$

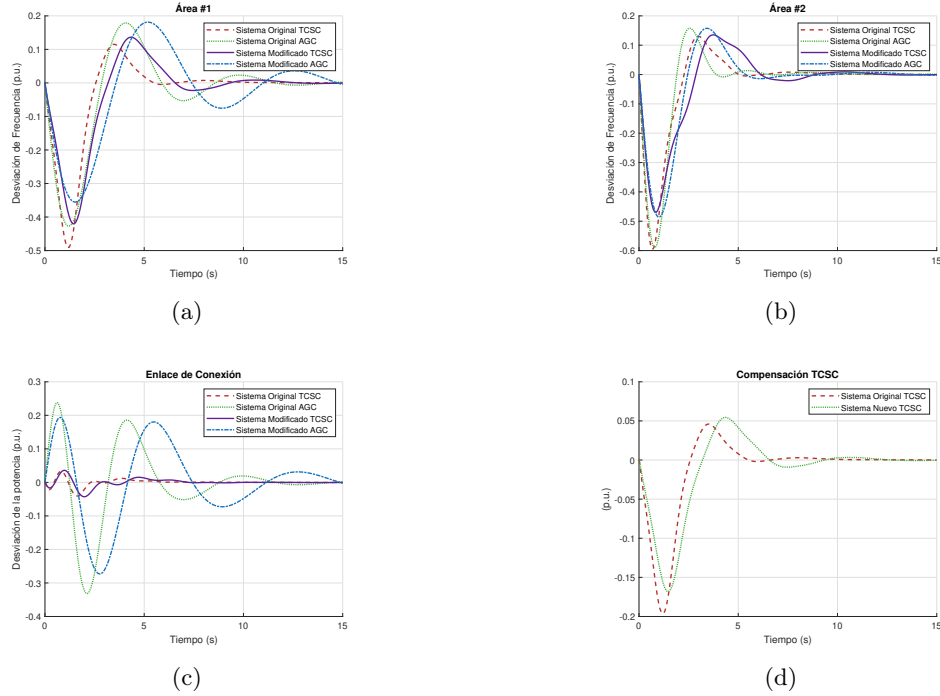


Figura 3.6: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $K_{ps} = 80$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

Con el fin de evaluar el efecto de una reducción de la ganancia del bloque equivalente del sistema de potencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $K_{ps} = 120$, a $K_{ps} = 80$. Esto equivale a incrementar el amortiguamiento de la carga y, por ende, a que el sistema tenga una "mayor masa rodante". En la señal de frecuencia del área 1, se observa que el sistema modificado con TCSC presenta un nadir menor que el del caso nominal, como se ilustra en la Figura 3.6. No obstante, el sobreimpulso es ligeramente más elevado y se observa un desplazamiento en el tiempo de asentamiento. Al comparar el sistema modificado con TCSC frente al esquema convencional modificado (AGC sin TCSC), se observa que el esquema convencional presenta un nadir ligeramente más bajo que el sistema con TCSC modificado, sin embargo, exhibe un sobreimpulso más pronunciado y su tiempo de asentamiento o de estabilización es considerablemente mayor. En el área 2 se observa un nadir menor y un sobreimpulso en el sistema modificado con TCSC con respecto al sistema AGC

modificado. Sin embargo, en el caso del TCSC se aprecia que el sobreimpulso se mantiene durante un intervalo más prolongado. En el enlace de interconexión se observa un ligero desplazamiento temporal del nadir, acompañado de variaciones en el sobreimpulso. En la Compensación del TCSC correspondiente al caso $K_{ps} = 80$, se observa un nadir menor en magnitud, acompañado de un sobreimpulso más elevado y un desplazamiento en el tiempo de asentamiento.

3.2.4. Modificación en la Ganancia del Sistema $K_{ps} = 100$

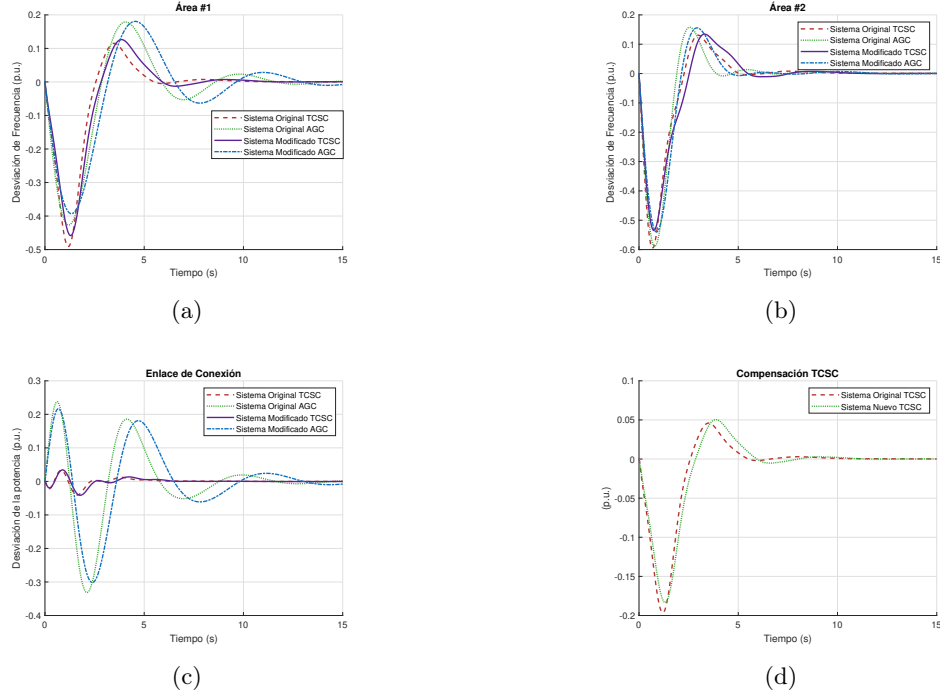


Figura 3.7: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $K_{ps} = 100$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

Con el propósito de analizar el efecto de una reducción moderada en la ganancia del bloque equivalente del sistema de potencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $K_{ps} = 120$, a $K_{ps} = 100$. Con referencia a la Figura 3.7, en la señal de frecuencia del área 1 se observa que el sistema modificado con TCSC presenta un nadir ligeramente menor respecto al caso nominal, siendo esta diferencia poco pronunciada; no obstante, el sobreimpulso resulta ligeramente más elevado y se observa un desplazamiento en el tiempo de asentamiento, a su vez, logra reducir las oscilaciones del sistema convencional. En el área 2 se identifica un nadir ligeramente menor que el del caso nominal del sistema TCSC. Se observa además un sobreimpulso ligeramente mayor, el cual tiende a mantenerse durante un intervalo más prolongado en comparación con el esquema convencional, por lo que, el tiempo de asentamiento asociado a este sobreimpulso es mayor que el del sistema conven-

cional. En el enlace de interconexión no se observan variaciones significativas en la forma general del transitorio. Las diferencias respecto al caso nominal son leves y no alteran sustancialmente la dinámica del intercambio de potencia entre áreas. En la compensación se aprecia un menor nadir en magnitud, aunque de forma muy ligera, acompañado de un sobreimpulso ligeramente más elevado y de un pequeño desplazamiento en el tiempo de asentamiento, lo que refleja una variación moderada en la evolución temporal de la acción correctiva del dispositivo.

3.2.5. Modificación en el estatismo del gobernador $R = 1.2$

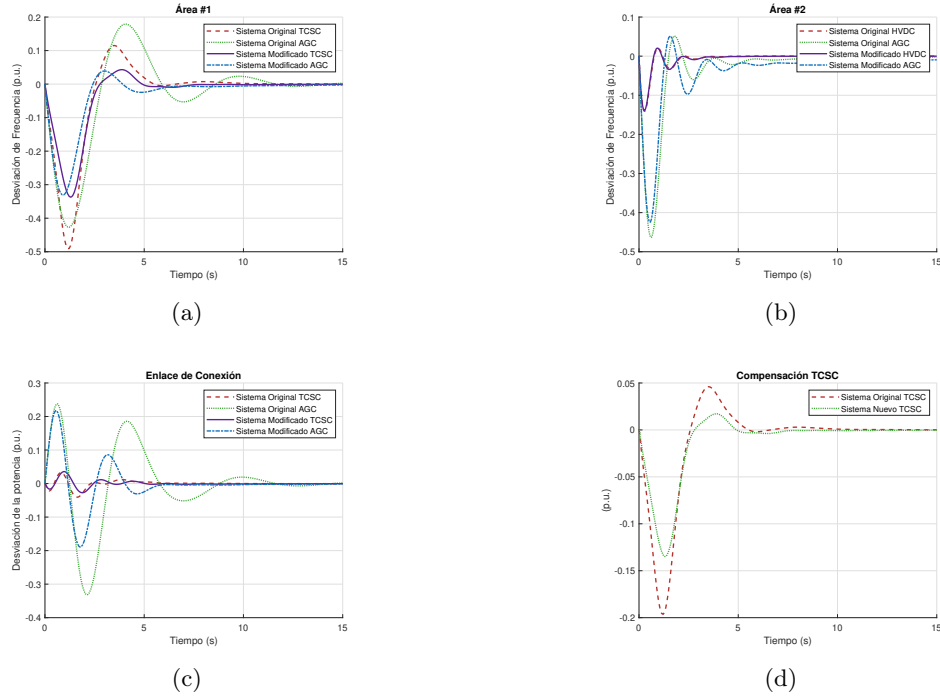


Figura 3.8: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $R = 1.2$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

Con el propósito de evaluar el efecto de una reducción del estatismo del gobernador, el parámetro se modificó de su valor nominal, $R = 2.4$, a $R = 1.2$. Esta reducción incrementa la sensibilidad del gobernador ante variaciones de carga, de tal manera que, ante una perturbación, el gobernador responde de manera más rápida. En la señal de frecuencia del área 1 se observa que, al reducir el estatismo, el sistema con TCSC presenta un nadir menos severo, así como un menor tiempo de asentamiento respecto al caso nominal. Lo anterior se ilustra esquemáticamente en la Figura 3.8. Asimismo, se aprecia una disminución de la amplitud de las oscilaciones. Al comparar con el sistema modificado bajo AGC convencional, se observa que este último presenta un nadir ligeramente menor que el del esquema con TCSC, así como una oscilación menor. En el área 2, el sistema compensado

muestra una reducción tanto en el nadir como en el sobreimpulso respecto al caso nominal. En el enlace de interconexión se aprecia un nadir menos severo y una reducción de la amplitud de las oscilaciones respecto al sistema nominal con TCSC. Se observa, además, que la compensación del TCSC requiere un menor esfuerzo, mientras que el desempeño dinámico mejora.

3.2.6. Modificación en el estatismo del gobernador $R = 4$

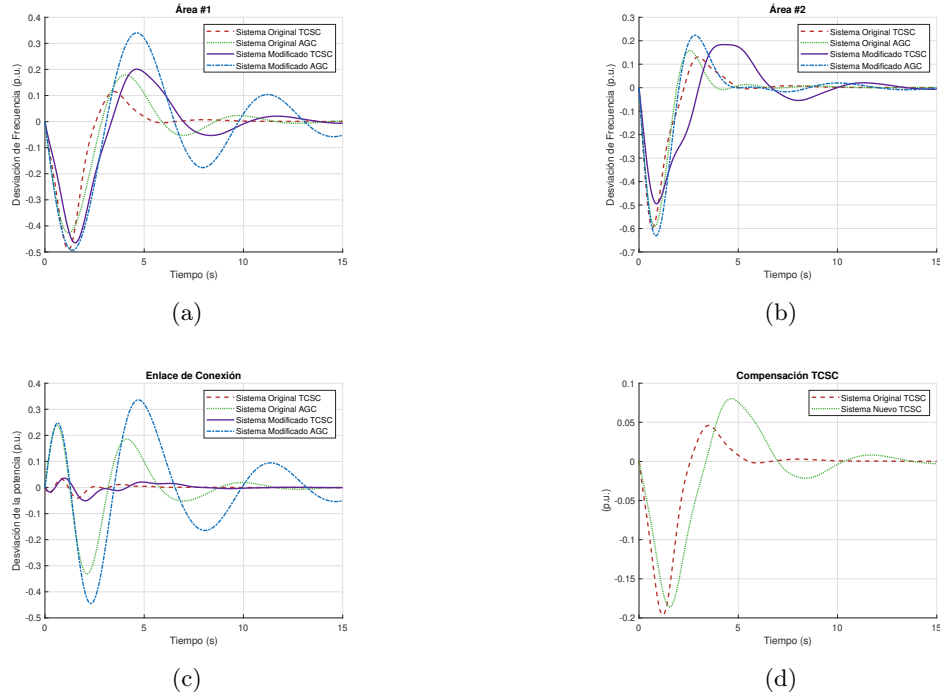


Figura 3.9: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $R = 4$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

Con el propósito de analizar el efecto de un incremento en el estatismo del gobernador, que reduzca la sensibilidad del gobernador frente a cambios de carga, el parámetro se modificó de su valor nominal, $R = 2.4$, a $R = 4$. En la señal de frecuencia del área 1 bajo el esquema con TCSC, se observa en la Figura 3.9 que el nadir disminuye ligeramente respecto al caso nominal; sin embargo, el instante de ocurrencia del nadir se presenta en un mayor tiempo. Asimismo, el sobreimpulso aumenta significativamente y se observa un mayor tiempo de asentamiento, lo que se refleja en una respuesta más prolongada en el transitorio. En comparación, el sistema modificado bajo AGC convencional presenta un incremento en el nadir y, en particular, un sobreimpulso más elevado, lo que evidencia una mayor excursión respecto al esquema con TCSC. En el área 2 se observa un comportamiento similar en términos de tendencia. No obstante, en el caso del TCSC modificado, el sobreimpulso se prolonga durante un intervalo mayor. En el enlace de interconexión se aprecia que el

sistema con TCSC requiere un mayor tiempo para alcanzar el estado estacionario en comparación con el caso nominal. En la compensación del TCSC se observa que la excursión inicial es de menor magnitud; sin embargo, el sobreimpulso se incrementa considerablemente, lo que evidencia una acción correctiva más pronunciada y extendida en el tiempo.

3.2.7. Modificación en el sesgo de frecuencia $\beta = 0.75$

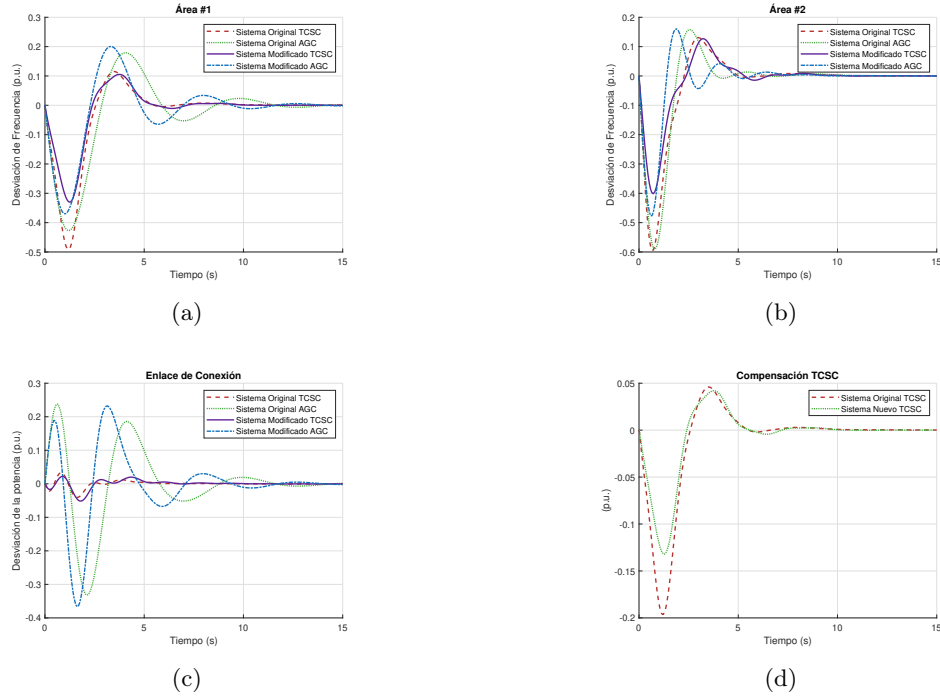


Figura 3.10: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $B = 0.75$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

Con el propósito de evaluar el efecto de un incremento del sesgo de frecuencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $\beta = 0.425$, a $\beta = 0.75$. Con base en la Figura 3.10, en la señal de frecuencia del área 1 se observa que el sistema modificado con TCSC presenta un nadir menor incluso en comparación con el sistema modificado bajo AGC convencional. Este comportamiento contrasta con el caso original, en el que el esquema con TCSC presentaba un nadir mayor que el convencional; en esta condición, la tendencia se invierte. En el área 2 se aprecia que el sistema modificado con TCSC presenta un nadir considerablemente menor; sin embargo, las oscilaciones son ligeramente mayores. Asimismo, se identifica un sobreimpulso más pronunciado y una forma transitoria con una componente oscilatoria más marcada, acompañados de un desplazamiento temporal en el tiempo de asentamiento respecto al caso nominal. En el enlace de interconexión se observa un comportamiento general similar al del sistema con TCSC nominal; no obstante, se aprecia un

desplazamiento temporal en el instante del nadir. En la compensación correspondiente, se observa que la acción correctiva es menor en magnitud que la del sistema TCSC nominal, lo que se refleja en una menor excursión del sistema compensado.

3.2.8. Modificación en el sesgo de frecuencia $\beta = 0.25$

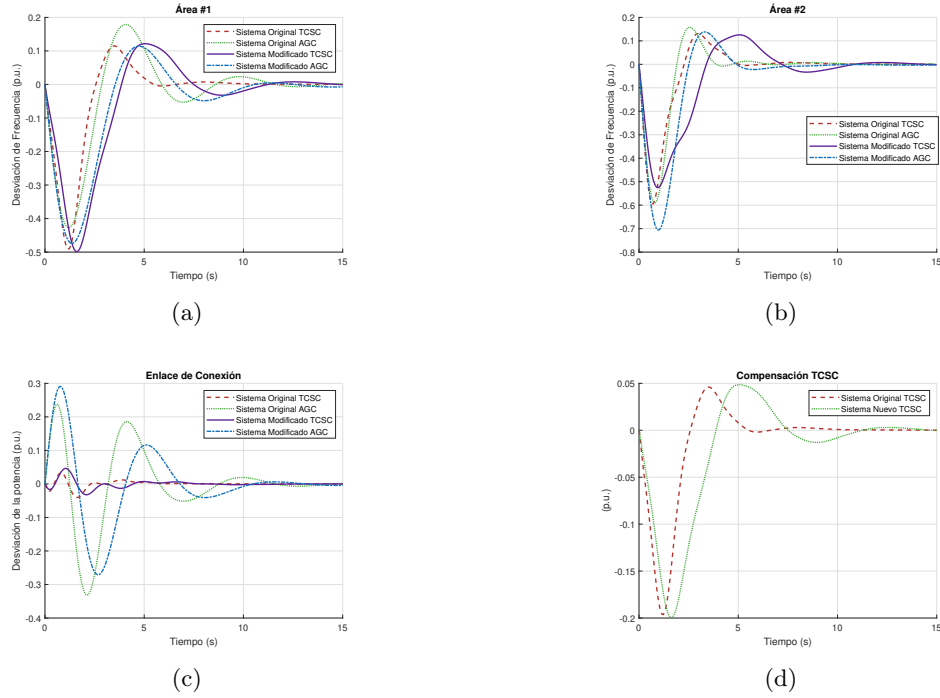


Figura 3.11: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $B = 0.25$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

Con el propósito de analizar el efecto de una reducción del sesgo de frecuencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $\beta = 0.425$, a $\beta = 0.25$. En la señal de frecuencia del área 1, se observa que el sistema con TCSC presenta un nadir ligeramente mayor que el del caso nominal, acompañado de un desplazamiento temporal del evento. Lo anterior se ilustra en la Figura 3.11. Asimismo, el sobreimpulso se prolonga en el tiempo y el tiempo de asentamiento aumenta, lo que se refleja en una respuesta transitoria más prolongada. En el área 2 se identifica un nadir menor en el sistema modificado con TCSC respecto al caso nominal; sin embargo, el sobreimpulso se mantiene durante un intervalo considerablemente mayor. En el enlace de interconexión se aprecia que la excursión asociada al mínimo ocurre más tarde en el tiempo, acompañada de mayores sobreimpulsos y oscilaciones respecto al sistema nominal con TCSC. En la Compensación se observa una acción de magnitud similar a la del sistema nominal; no obstante, el sobreimpulso presenta menor amortiguamiento y un desplazamiento temporal.

3.2.9. Incremento del coeficiente de sincronización

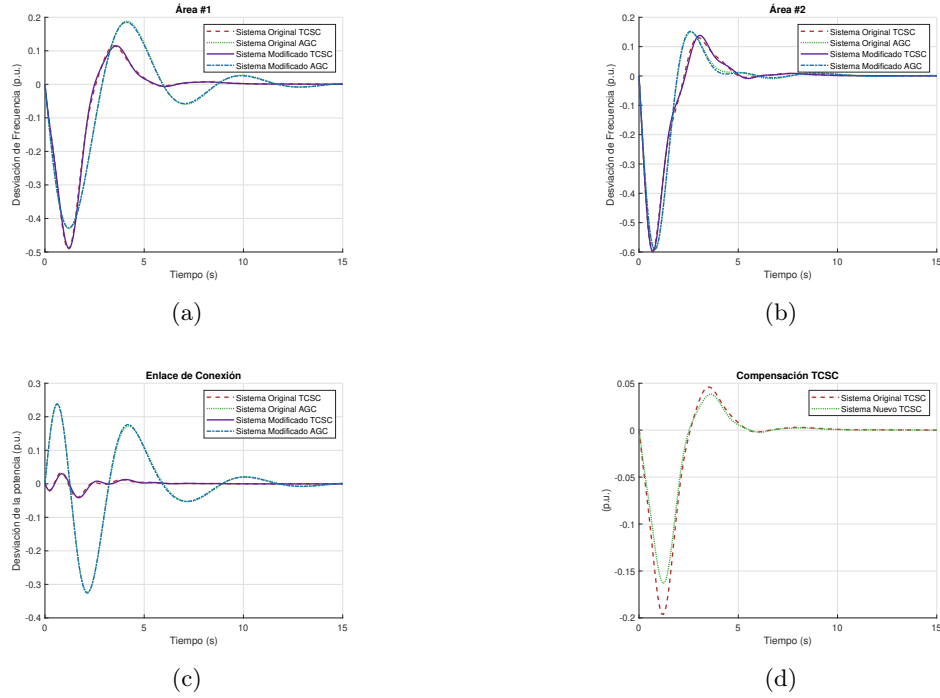


Figura 3.12: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $T_{12} = 0.0417$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

El coeficiente de sincronización T_{12} representa la robustez de la interconexión entre el área 1 y el área 2 a través del enlace AC. Para una línea puramente reactiva jX_{12} , el intercambio de potencia en estado estacionario puede expresarse como,

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2). \quad (3.43)$$

Linealizando alrededor del punto de operación $\delta_0 = \delta_1 - \delta_2$ se obtiene la relación incremental,

$$\Delta P_{tie} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos(\delta_0) \Delta \delta \quad , \quad T_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos(\delta_0), \quad (3.44)$$

Donde $\Delta \delta = \Delta(\delta_1 - \delta_2)$. Considerando $V_1 = V_2 = 1$ p.u. y $\delta_0 = 30^\circ$, para el valor nominal $X_{12} = 10 \Omega$ se tiene,

$$T_{12} = \frac{1 \cdot 1}{10} \cos(30^\circ) = \frac{0.8660}{10} = 0.0866. \quad (3.45)$$

Posteriormente, al reducir la reactancia de la línea a $X_{12} = 8 \Omega$, el acoplamiento se fortalece y el coeficiente de sincronización incrementa a,

$$T_{12} = \frac{1 \cdot 1}{8} \cos(30^\circ) = \frac{0.8660}{8} = 0.1083. \quad (3.46)$$

Con el propósito de evaluar el efecto de una reducción de la reactancia de la línea de interconexión, el parámetro se modificó de su valor nominal, $X_{12} = 10 \Omega$, a $X_{12} = 8 \Omega$. Esta modificación implica un incremento del coeficiente de sincronización T_{12} , lo que fortalece la interconexión eléctrica entre las áreas. Con referencia a la Figura 3.46, en la señal de frecuencia del área 1 no se observan variaciones significativas respecto al caso nominal. El comportamiento transitorio, incluidos el nadir, el sobreimpulso y el tiempo de asentamiento, resulta prácticamente similar al del sistema original. De la misma forma, en el área 2 la respuesta dinámica se mantiene casi inalterada. Las diferencias en el nadir, el sobreimpulso y la evolución temporal del transitorio son mínimas y no modifican de forma apreciable la dinámica general del sistema. En el enlace de interconexión, el comportamiento también es muy similar al del caso nominal, sin cambios relevantes en la forma general del transitorio. La diferencia más notable se observa en la compensación del TCSC. Al reducir la reactancia de la línea, se observa una menor magnitud de la acción de compensación, lo que evidencia un esfuerzo menor del dispositivo. Por lo tanto, el nadir y el sobreimpulso asociados a la compensación son ligeramente menores, aunque el comportamiento, de forma general, conserva una forma similar a la del caso nominal.

3.2.10. Reducción del coeficiente de sincronización

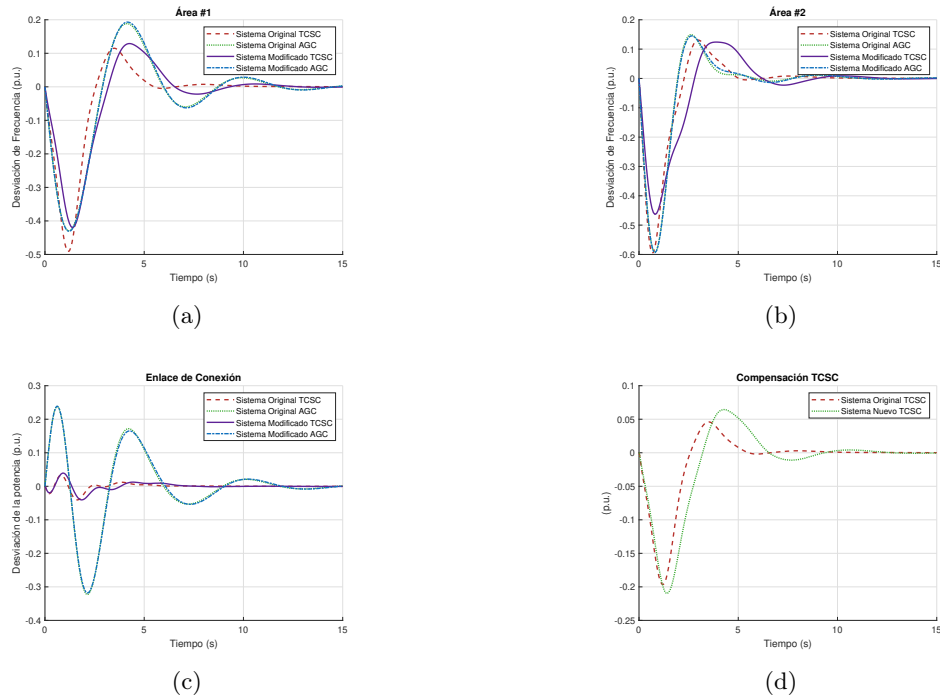


Figura 3.13: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema para $T_{12} = 0.0625$: (a) Desviación de frecuencia en el Área 1, (b) Desviación de frecuencia en el Área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Compensación del TCSC.

El coeficiente de sincronización T_{12} depende de la reactancia del enlace de interconexión. A partir de la linealización del flujo de potencia en el enlace AC, se define como,

$$T_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos(\delta_0), \quad (3.47)$$

donde V_1 y V_2 son las magnitudes de tensión en las barras equivalentes de cada área y δ_0 es el ángulo de operación. Considerando $V_1 = V_2 = 1$ p.u. y $\delta_0 = 30^\circ$, para el caso nominal $X_{12} = 10 \Omega$ se obtiene,

$$T_{12} = \frac{1 \cdot 1}{10} \cos(30^\circ) = 0.0866. \quad (3.48)$$

Al incrementar la reactancia de la línea a $X_{12} = 12 \Omega$, el acoplamiento eléctrico entre el área 1 y el área 2 se debilita, lo que reduce el coeficiente de sincronización a,

$$T_{12} = \frac{1 \cdot 1}{12} \cos(30^\circ) = \frac{0.8660}{12} = 0.0722. \quad (3.49)$$

Con el propósito de analizar el efecto de un incremento de la reactancia de la línea de interconexión, el parámetro se modificó de su valor nominal, $X_{12} = 10 \Omega$, a $X_{12} = 12 \Omega$. Esta variación implica una reducción del coeficiente de sincronización T_{12} , lo que debilita la interacción sincrónica entre las áreas. En el área 1, el sistema modificado con TCSC presenta cambios apreciables respecto al caso nominal, como se ilustra en la Figura 3.13. Se observa un nadir menos severo que el del sistema nominal; sin embargo, el sobreimpulso aumenta y se identifica un desplazamiento en el tiempo de asentamiento. En contraste, el esquema convencional muestra un comportamiento muy similar al del caso nominal, con variaciones poco significativas en sus indicadores dinámicos. El efecto es más evidente en el área 2. El sistema modificado con TCSC presenta un nadir menor que el nominal, acompañado de un mayor sobreimpulso y de un desplazamiento temporal en el asentamiento. Por lo tanto, se observa una mayor sensibilidad del dispositivo ante la reducción del coeficiente de sincronización. En el enlace de interconexión se observa un gran impacto en la dinámica del intercambio de potencia, particularmente asociado al desplazamiento temporal del transitorio y a la cantidad de potencia intercambiada entre áreas de control. No obstante, en el esquema convencional las diferencias respecto al caso nominal son mínimas. La compensación del TCSC muestra un efecto más pronunciado bajo esta condición, con variaciones más notables en la magnitud del sobreimpulso y en la evolución temporal del transitorio.

3.3. Enlace de Corriente Continua en Alta Tensión (HVDC)

La transmisión en corriente directa de alta tensión (HVDC) es una tecnología de transporte de energía eléctrica que emplea corriente continua para transferir potencia en el sistema eléctrico [1, 6]. Esta tecnología permite la transmisión de potencia a largas distancias, los enlaces submarinos y la interconexión de sistemas que no operan de manera síncrona [3, 17]. Un sistema HVDC, como se muestra en la Figura 3.14, está compuesto por dos estaciones convertidores: una estación rectificadora en el extremo emisor y otra inversora en el extremo receptor. Ambas estaciones se conectan mediante un enlace en corriente directa [1, 3, 6].

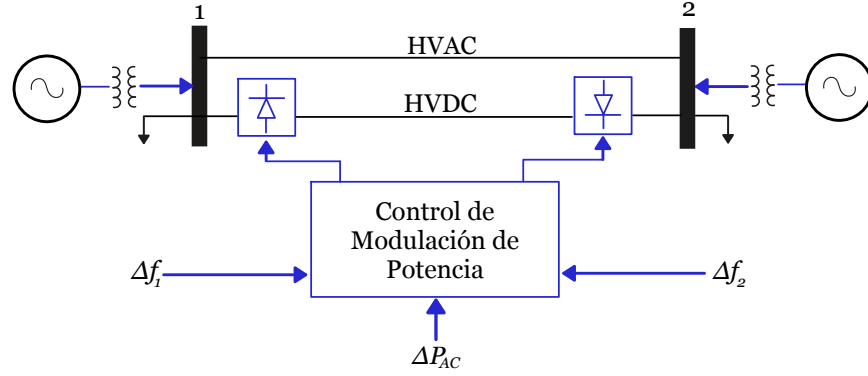


Figura 3.14: Configuración del sistema eléctrico de dos áreas con enlace HVDC

La estación rectificadora convierte la energía de corriente alterna (AC) en corriente directa (DC), mientras que la estación inversora realiza el proceso inverso, lo que permite la inyección de potencia en la red receptora [1, 6]. En los sistemas de transmisión en corriente alterna, el flujo de potencia depende del ángulo de fase entre tensiones y de la impedancia de la línea; mientras que en un enlace HVDC la potencia activa transferida puede controlarse directamente mediante la acción de los convertidores electrónicos de potencia, puesto que permite regular tanto la magnitud como el sentido del flujo de potencia entre sistemas eléctricos [1, 3, 4, 29]. Existen dos configuraciones principales para el HVDC: los enlaces basados en convertidores conmutados por línea (LCC-HVDC), que emplean tiristores, y los enlaces basados en convertidores conmutados por tensión (VSC-HVDC), que utilizan dispositivos autoconmutados como IGBTs [3, 4, 14]. En la presente tesis se adopta la configuración VSC-HVDC.

3.3.1. Incorporación del Enlace HVDC en Sistemas Multiarea

Cuando un enlace HVDC se instala en paralelo al enlace AC que interconecta dos áreas de control, como se muestra en el diagrama de la Figura 3.15, la potencia intercambiada entre ellas deja de depender solo del acoplamiento sincrónico determinado por el coeficiente de sincronización del enlace AC [1, 3, 5]. En estas condiciones, el intercambio total de potencia pasa a estar influenciado adicionalmente por la variación de potencia controlada del enlace HVDC, representada por ΔP_{dc} .

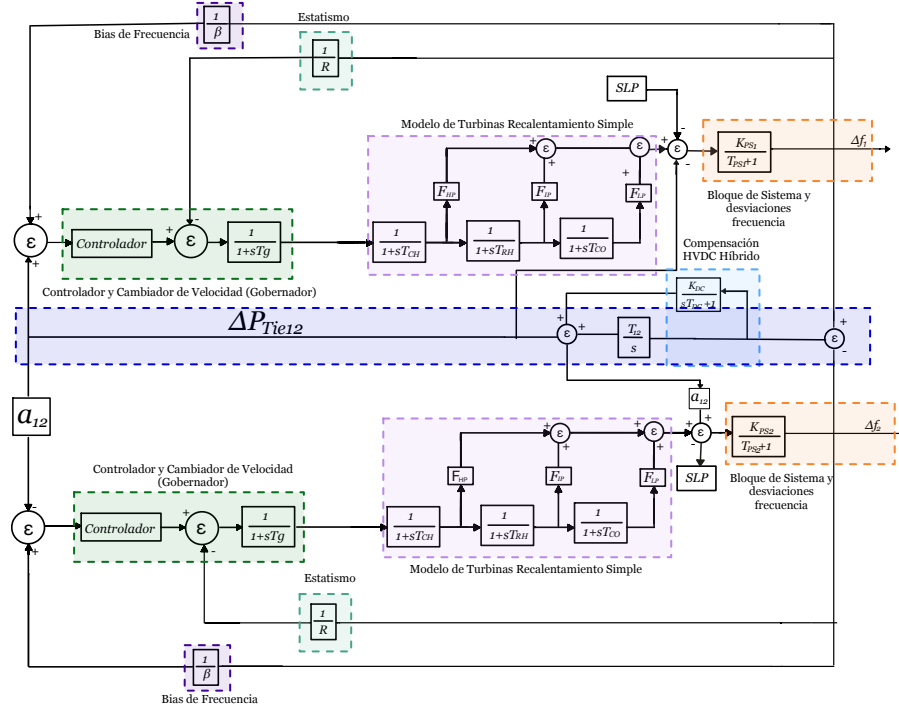


Figura 3.15: de enlace HVDC en un sistema multiárea

De esta forma, la potencia incremental total transferida entre áreas puede expresarse como,

$$\Delta P_{tie12}(s) = \Delta P_{AC}(s) + \Delta P_{DC}(s), \quad (3.50)$$

Donde $\Delta P_{AC}(s)$ representa la contribución del enlace AC y $\Delta P_{DC}(s)$ la potencia modulada por el enlace HVDC. De esta manera, el HVDC añade un grado adicional de control sobre el intercambio de potencia entre áreas, actuando como un lazo suplementario.

3.3.1.1. Enlace AC

Dado que el enlace HVDC se integra en paralelo con la línea de transmisión en corriente alterna, el análisis debe considerar la contribución del enlace AC al intercambio de potencia entre áreas. Por ello, se considera un sistema de dos áreas interconectadas mediante una línea puramente reactiva jX_{12} . Las tensiones fasoriales en las barras 1 y 2 se definen como.

$$\bar{V}_1 = V_1 \angle \delta_1, \quad \bar{V}_2 = V_2 \angle \delta_2 \quad (3.51)$$

La corriente de la línea que fluye desde el área 1 hacia el área 2 es.

$$\bar{I}_{ac,12} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{jX_{12}} \quad (3.52)$$

La potencia compleja transferida desde la barra 1 hacia la barra 2 se obtiene como.

$$\bar{S}_{tie,ac_{12}} = \bar{V}_1 \bar{I}_{ac,12}^* \quad (3.53)$$

Sustituyendo (3.52) en (3.53).

$$\bar{S}_{tie,ac_{12}} = \bar{V}_1 \left(\frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{jX_{12}} \right)^* = \frac{j}{X_{12}} \bar{V}_1 (\bar{V}_1^* - \bar{V}_2^*) \quad (3.54)$$

Expresando los fasores en forma exponencial.

$$\bar{V}_1 \bar{V}_2^* = V_1 V_2 e^{j(\delta_1 - \delta_2)} = V_1 V_2 [\cos(\delta_1 - \delta_2) + j \sin(\delta_1 - \delta_2)] \quad (3.55)$$

y

$$\bar{V}_1 \bar{V}_1^* = V_1^2 \quad (3.56)$$

Sustituyendo en (3.54) y separando parte real e imaginaria, la potencia activa transferida resulta.

$$P_{AC} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.57)$$

Linealizando (3.57) alrededor del punto de operación, donde $\delta = \delta_1 - \delta_2$ y δ_0 es el punto de operación:

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta, \quad (3.58)$$

Aplicando expansión de Taylor de primer orden.

$$\sin(\delta_0 + \Delta\delta) = \sin \delta_0 + \cos \delta_0 \Delta\delta \quad (3.59)$$

La potencia en equilibrio es.

$$P_{tie,ac,0} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin \delta_0 \quad (3.60)$$

Por tanto, la variación incremental de potencia es.

$$\Delta P_{AC} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos \delta_0 \Delta\delta. \quad (3.61)$$

Definiendo el coeficiente de sincronización.

$$T_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos \delta_0 \quad (3.62)$$

Y considerando que $\Delta\delta = \Delta\delta_1 - \Delta\delta_2$, se obtiene.

$$\Delta P_{AC} = T_{12} (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (3.63)$$

Considerando $\Delta\dot{\delta}_i(t) = 2\pi \Delta f_i(t)$, $i = 1, 2$, la desviación angular se relaciona con la velocidad angular mediante.

$$\Delta\dot{\delta}_i(t) = \Delta\omega_i(t), \quad i = 1, 2 \quad (3.64)$$

Considerando que la velocidad angular incremental se expresa como.

$$\Delta\omega_i(t) = 2\pi\Delta f_i(t) \quad (3.65)$$

Finalmente, se obtiene.

$$\Delta\dot{\delta}_i(t) = 2\pi\Delta f_i(t) \quad (3.66)$$

Partiendo de la expresión linealizada.

$$\Delta P_{AC} = T_{12} (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (3.67)$$

A partir de la expresión linealizada del flujo de potencia activa del enlace AC.

$$\Delta P_{AC}(t) = T_{12} (\Delta\delta_1(t) - \Delta\delta_2(t)) \quad (3.68)$$

La diferencia angular incremental entre áreas se define como.

$$\Delta\delta_{12} = \Delta\delta_1 - \Delta\delta_2 \quad (3.69)$$

Los incrementos angulares pueden expresarse en función de las desviaciones de frecuencia.

$$\Delta\delta_1(t) = 2\pi \int_0^t \Delta f_1(\tau) d\tau, \quad (3.70)$$

$$\Delta\delta_2(t) = 2\pi \int_0^t \Delta f_2(\tau) d\tau. \quad (3.71)$$

Aplicando la transformada de Laplace bajo condiciones iniciales nulas, se obtiene directamente.

$$\Delta\delta_i(s) = \frac{2\pi}{s} \Delta f_i(s), \quad i = 1, 2 \quad (3.72)$$

Sustituyendo en la expresión linealizada del flujo de potencia, resulta.

$$\Delta P_{AC}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (3.73)$$

Controlador HVDC

En un enlace VSC–HVDC, el lazo externo suele controlar la potencia activa, donde.

$$P_{DC}(t) = V_{DC}(t) I_{DC}(t) \quad (3.74)$$

Linealizando alrededor del punto de operación (V_{DC0}, I_{DC0}) :

$$\Delta P_{DC}(t) = V_{DC0} \Delta I_{DC}(t) + I_{DC0} \Delta V_{DC}(t) \quad (3.75)$$

Considerando que el VSC suele mantener V_{DC} aproximadamente constante en el esquema de AGC, se asume.

$$\Delta P_{DC}(t) = V_{DC0} \Delta I_{DC}(t) \quad (3.76)$$

Definiendo la señal de error como la diferencia de desviaciones de frecuencia.

$$e_f(t) = \Delta f_1(t) - \Delta f_2(t) \quad (3.77)$$

Se propone un control proporcional donde la referencia de potencia HVDC es.

$$\Delta P_{DC}^*(t) = K_{dc} e_f(t) \quad (3.78)$$

Pasando al dominio de Laplace.

$$\Delta P_{DC}^*(s) = K_{dc} (\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)) \quad (3.79)$$

Por lo tanto, la señal interna del enlace puede definirse como.

$$X_{DC}(s) = \Delta P_{DC}^*(s) = K_{dc} (\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)) \quad (3.80)$$

El modelo dinámico del convertidor se representa mediante una función de transferencia de primer orden.

$$G_{dc}(s) = \frac{1}{1 + sT_{dc}} \quad (3.81)$$

Si se asume que la potencia inyectada sigue la referencia, se obtiene.

$$\Delta P_{DC}(s) = G_{dc}(s) \Delta P_{DC}^*(s) \quad (3.82)$$

Con base en lo anterior, el modelo simplificado de modulación de potencia corresponde a la contribución incremental del enlace HVDC y es dado por .

$$\Delta P_{DC}(s) = \frac{K_{dc}}{1 + sT_{dc}} (\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)) \quad (3.83)$$

Dado que el enlace HVDC se conecta en paralelo con la interconexión AC, la potencia incremental total intercambiada entre áreas queda dada por (3.50).

$$\Delta P_{tie12}(s) = \Delta P_{AC}(s) + \Delta P_{DC}(s). \quad (3.84)$$

Sustituyendo (3.73) y (3.83) en (3.50), se obtiene.

$$\Delta P_{tie12}(s) = \left(\frac{2\pi T_{12}}{s} + \frac{K_{dc}}{1 + sT_{dc}} \right) [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (3.85)$$

Con el propósito de mantener la consistencia dimensional dentro del esquema de AGC, las potencias se expresan en sistema por unidad (p.u.) con respecto a la potencia base de cada área. Sean P_{r1} y P_{r2} las potencias base del área 1 y del área 2, respectivamente, entonces el factor de conversión entre bases es dado por.

$$a_{12} = \frac{P_{r1}}{P_{r2}} \quad (3.86)$$

Si la potencia incremental de la línea de interconexión se expresa en base del área 1.

$$\Delta P_{tie12,pu}^{(1)} = \frac{\Delta P_{tie12}}{P_{r1}} \quad (3.87)$$

Entonces, la potencia incremental en por unidad del área de control 2 corresponde a.

$$\Delta P_{tie12,pu}^{(2)} = \frac{\Delta P_{tie12}}{P_{r2}} = \frac{P_{r1}}{P_{r2}} \frac{\Delta P_{tie12}}{P_{r1}} = a_{12} \Delta P_{tie12,pu}^{(1)} \quad (3.88)$$

Dado que el enlace físico es el mismo visto desde ambas áreas, esto es.

$$X_{21} = X_{12}$$

Su coeficiente de sincronización en p.u. se expresa como.

$$T_{12,pu} = \frac{T_{12}}{P_{r1}} \quad (3.89)$$

Entonces el coeficiente visto desde el área 2 es.

$$T_{21,pu} = \frac{T_{12}}{P_{r2}} = \frac{P_{r1}}{P_{r2}} \frac{T_{12}}{P_{r1}} = a_{12} T_{12,pu} \quad (3.90)$$

Sustituyendo (3.50) en el balance incremental de potencia del área 1, se obtiene.

$$\dot{\Delta f}_1(t) = -\frac{1}{T_{PS1}} \Delta f_1(t) + \frac{K_{PS1}}{T_{PS1}} \left(\Delta P_{m1}(t) - \Delta P_{L1}(t) - \Delta P_{AC}(t) - \Delta P_{DC}(t) \right) \quad (3.91)$$

Partiendo del balance incremental de potencia del área 2, se tiene.

$$\dot{\Delta f}_2(t) = -\frac{1}{T_{PS2}} \Delta f_2(t) + \frac{K_{PS2}}{T_{PS2}} \left(\Delta P_{m2}(t) - \Delta P_{L2}(t) + \Delta P_{tie12}(t) \right) \quad (3.92)$$

Sustituyendo (3.50), es decir $\Delta P_{tie12}(t) = \Delta P_{AC}(t) + \Delta P_{DC}(t)$, se obtiene.

$$\dot{\Delta f}_2(t) = -\frac{1}{T_{PS2}} \Delta f_2(t) + \frac{K_{PS2}}{T_{PS2}} \left(\Delta P_{m2}(t) - \Delta P_{L2}(t) + \Delta P_{AC}(t) + \Delta P_{DC}(t) \right) \quad (3.93)$$

Se representa el flujo de potencia desde el área 1 hacia el área 2. Las señales de Error de Control de Área (ACE) se definen como.

$$ACE_1(t) = B_1 \Delta f_1(t) + \Delta P_{tie12}(t) \quad (3.94)$$

$$ACE_2(t) = B_2 \Delta f_2(t) - a_{12} \Delta P_{tie12}(t) \quad (3.95)$$

Donde $a_{12} = P_{r1}/P_{r2}$ se utiliza cuando $\Delta P_{tie12}(t)$ está expresada en la base del área 1. Dado que el intercambio total de potencia entre áreas se compone de las contribuciones de los enlaces AC y HVDC en paralelo,

$$\Delta P_{tie12}(t) = \Delta P_{AC}(t) + \Delta P_{DC}(t) \quad (3.96)$$

Sustituyendo (3.96) en (3.94) y (3.95), se obtiene.

$$ACE_1(t) = B_1 \Delta f_1(t) + \Delta P_{AC}(t) + \Delta P_{DC}(t) \quad (3.97)$$

$$ACE_2(t) = B_2 \Delta f_2(t) - a_{12} \left(\Delta P_{AC}(t) + \Delta P_{DC}(t) \right) \quad (3.98)$$

Aplicando transformada de Laplace bajo condiciones iniciales nulas.

$$ACE_1(s) = B_1 \Delta f_1(s) + \Delta P_{tie12}(s) \quad (3.99)$$

$$ACE_2(s) = B_2 \Delta f_2(s) - a_{12} \Delta P_{tie12}(s) \quad (3.100)$$

Sustituyendo (3.73) y (3.83),

$$ACE_1(s) = B_1 \Delta f_1(s) + \left[\frac{2\pi T_{12}}{s} + \frac{K_{dc}}{1 + sT_{dc}} \right] \left(\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s) \right), \quad (3.101)$$

$$ACE_2(s) = B_2 \Delta f_2(s) - a_{12} \left[\frac{2\pi T_{12}}{s} + \frac{K_{dc}}{1 + sT_{dc}} \right] \left(\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s) \right) \quad (3.102)$$

3.3.2. Resultados

La Figura 3.15 corresponde a un sistema de AGC de dos áreas, en el que en la línea de interconexión se incorpora en paralelo un enlace de corriente directa (HVDC). Los parámetros de este sistema se presentan en el Apéndice B, mientras que las ganancias de los controladores PI se presentan en la Tabla 3.3.

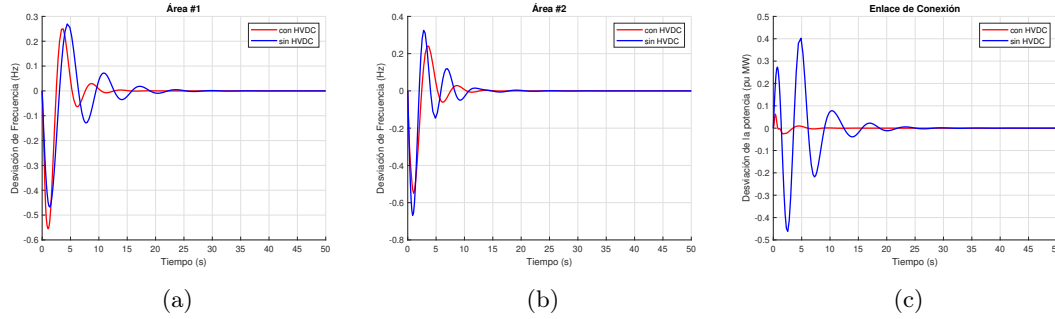


Figura 3.16: Respuesta dinámica del sistema de dos áreas ante una perturbación en escalón del 20 % con y sin enlace híbrido HVDC: (a) Desviación de frecuencia Δf_1 , (b) Desviación de frecuencia Δf_2 y (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión.

Tabla 3.3: Ganancias de controladores en cada área AGC y HVDC

Ganancias	área #1	área #2
K_i	0.5	1
K_p	0.25	1.25

Tabla 3.4: Comparación dinámica del sistema con y sin enlace HVDC

Señal	AGC convencional		AGC con HVDC	
Área 1	Nadir	-0.4677 Hz	Nadir	-0.5548 Hz
	Tiempo de Nadir	1.345 s	Tiempo de Nadir	1.037 s
	Tiempo de asentamiento	18.387 s	Tiempo de asentamiento	10.066 s
área 2	Nadir	-0.6681 Hz	Nadir	-0.5497 Hz
	Tiempo de Nadir	0.863 s	Tiempo de Nadir	1.037 s
	Tiempo de asentamiento	13.044 s	Tiempo de asentamiento	10.066 s
P_{tie}	Nadir	-0.4617 pu	Nadir	-0.0255 pu
	Tiempo de Nadir	2.550 s	Tiempo de Nadir	1.681 s
	Tiempo de asentamiento	20.762 s	Tiempo de asentamiento	3.066 s

La respuesta del sistema ante una perturbación simultánea de incremento de carga del 10 % y del 20 % en las áreas de control 1 y 2, respectivamente, se reporta gráficamente en la Figura 3.16 y cuantitativamente en la Tabla 3.4. En el área 1, mostrada en la Figura 3.16a, se aprecia una excursión de frecuencia más prominente en el escenario del AGC con HVDC (-0.5548 Hz) si se le compara con el nadir del AGC convencional (-0.4667 Hz). Esta excursión de frecuencia ocurre primero en el AGC HVDC (1.037 s), mientras que el esquema de solo AGC ocurre en un instante posterior (1.345 s). La mejora que se debe destacar al comparar estos dos sistemas es el tiempo de asentamiento del AGC con HVDC (10.066 s), frente a (18.387 s). El efecto que tiene el HVDC en el sistema sobre el área 1 es el amortiguamiento de las oscilaciones y la rápida convergencia al equilibrio. En el área 2, Figura 3.16b, se obtiene una respuesta de desviación de frecuencia más óptima del nadir con la incorporación del dispositivo HVDC, ya que el HVDC presenta una excursión de frecuencia menor (-0.5497 Hz) en comparación con el esquema AGC normal (-0.6681 Hz); asimismo, se observa que su tiempo de asentamiento es menor, así como las oscilaciones que presenta. La potencia activa transmitida entre las áreas de control 1 y 2 presenta la respuesta más significativa, donde el HVDC presenta un nadir inferior al del esquema convencional y un menor tiempo de asentamiento, como se muestra en la Figura 3.16c. Asimismo, el esquema convencional presenta sobreimpulsos más pronunciados. Significando, bajo estas consideraciones, que el enlace HVDC presenta un mayor amortiguamiento dinámico entre las áreas.

3.4. Análisis de Sensibilidades

3.4.1. Modificación en la constante de tiempo del sistema $T_{ps1} = 10$

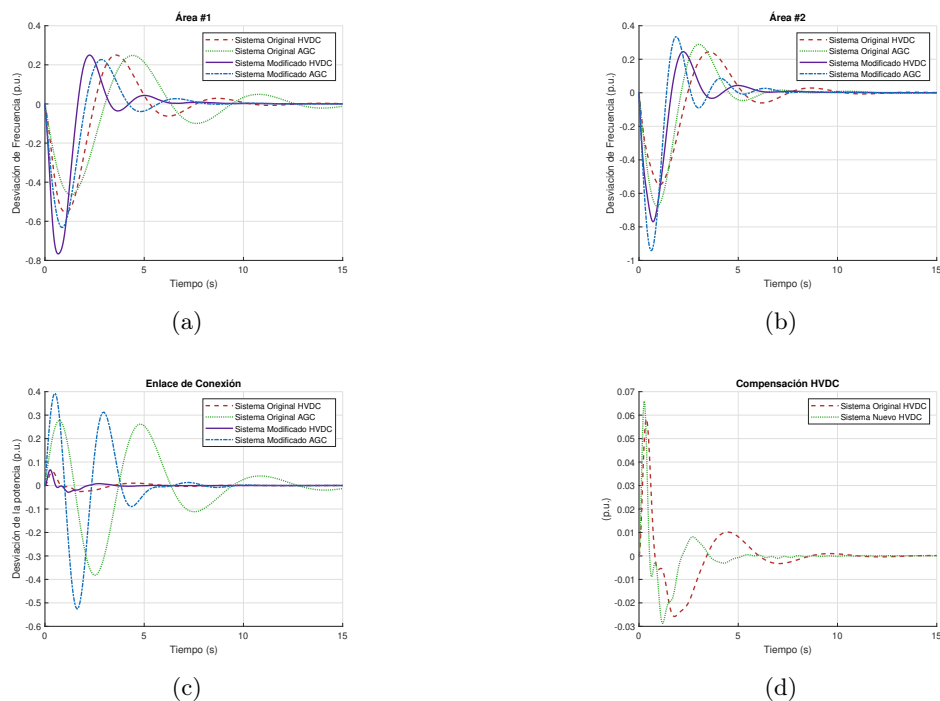


Figura 3.17: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $T_{PS} = 10$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Con el propósito de analizar la sensibilidad del sistema con enlace HVDC ante una variación en la constante de tiempo del bloque equivalente del sistema de potencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $T_{ps} = 20$, a $T_{ps} = 10$. Con referencia a la Figura 3.17, en la señal de frecuencia del área 1 se observa que el sistema con HVDC modificado presenta un nadir mayor que el caso nominal con HVDC; sin embargo, el tiempo de asentamiento se reduce, lo que se traduce en una recuperación más rápida hacia el estado estacionario pese a la mayor excursión inicial. En el área 2 se aprecia que, en comparación con el sistema convencional, la excursión de frecuencia no alcanza valores tan elevados. No obstante, al compararlo con el caso nominal de HVDC, el sistema modificado presenta un nadir mayor. En el enlace de interconexión se identifica un mayor sobreimpulso, acompañado de un menor tiempo de asentamiento, lo que refleja una dinámica más rápida en el intercambio transitorio de potencia entre áreas. En la compensación del enlace HVDC se observa un ligero incremento del sobreimpulso, mientras que los tiempos de asentamiento son menores. Asimismo, se aprecian pequeñas oscilaciones durante la fase final del transitorio, que desaparecen conforme el sistema alcanza el estado estacionario.

3.4.2. Modificación en la constante de tiempo del sistema $T_{ps} = 30$

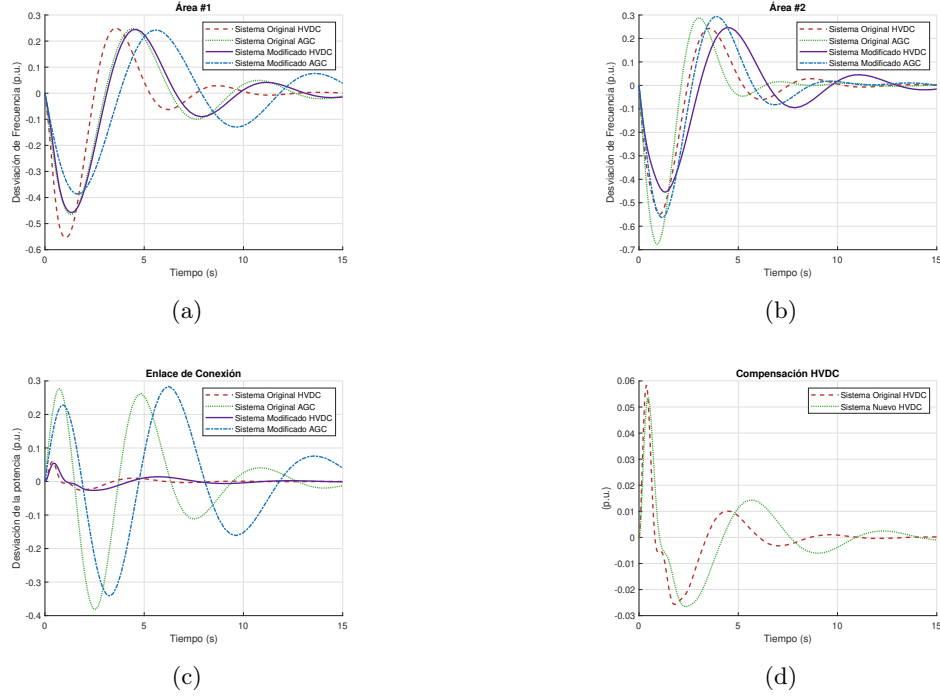


Figura 3.18: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $T_{PS} = 30$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Con el propósito de evaluar el efecto de un incremento de la constante de tiempo del bloque equivalente del sistema de potencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $T_{ps} = 20$, a $T_{ps} = 30$. En el área 1 se observa que el sistema con HVDC modificado presenta un nadir menor en comparación con el caso nominal con HVDC; sin embargo, dicho nadir es mayor que el correspondiente al sistema bajo AGC convencional, como se ilustra en la Figura 3.18. En el área 2 se identifica un nadir menor en el sistema modificado con HVDC, acompañado de un desplazamiento en el tiempo de asentamiento. La reducción del mínimo de frecuencia es más evidente en este caso, siendo el nadir más bajo el correspondiente al sistema con HVDC modificado. En el enlace de interconexión se aprecia un ligero cambio en el comportamiento oscilatorio, con una tendencia a un mayor amortiguamiento de las oscilaciones. En la compensación del enlace HVDC se observa inicialmente un ligero menor sobreimpulso; sin embargo, conforme avanza el transitorio, se presentan sobreimpulsos de mayor magnitud y un tiempo de asentamiento mayor en comparación con el caso nominal.

3.4.3. Modificación en la ganancia del sistema $K_{PS} = 80$

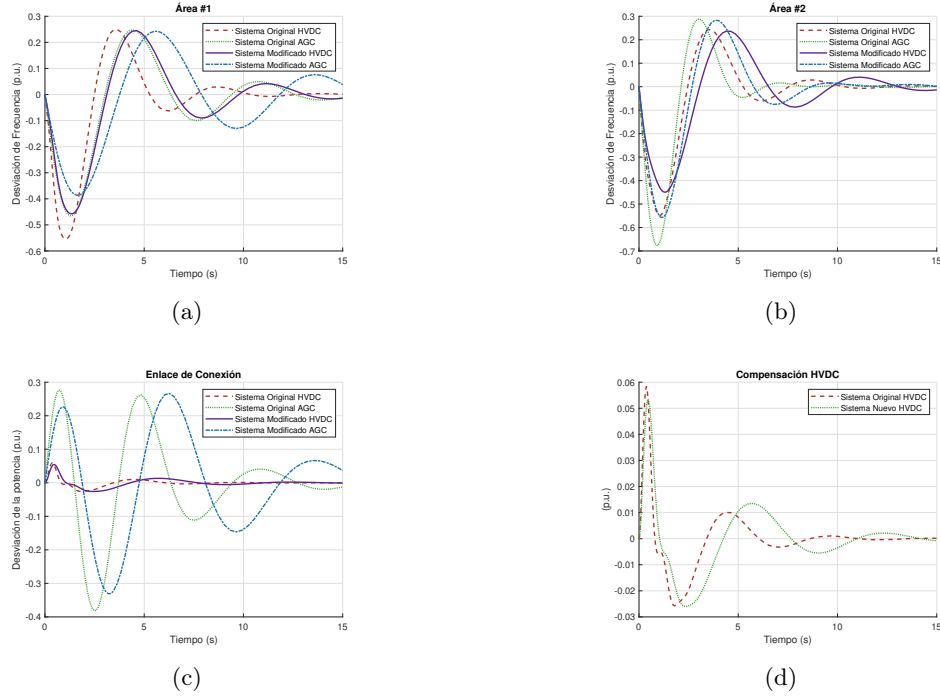


Figura 3.19: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $K_{PS} = 80$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Con el propósito de analizar la sensibilidad del sistema con enlace HVDC ante una reducción de la ganancia del bloque equivalente del sistema de potencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $K_{ps} = 120$, a $K_{ps} = 80$. En el área 1 se observa que el sistema con HVDC modificado presenta un nadir menor en comparación con el caso nominal con HVDC, acompañado de un desplazamiento en el tiempo de asentamiento. No obstante, según la Figura 3.19, al compararlo con el sistema modificado bajo AGC convencional, el esquema con HVDC presenta una excursión de frecuencia ligeramente mayor. En el área 2 se aprecia que la excursión negativa de frecuencia no alcanza valores tan pronunciados, lo que se traduce en un nadir menor. Sin embargo, el sobreimpulso se mantiene durante un intervalo más prolongado. En el enlace de interconexión se observa un mayor tiempo de asentamiento, mientras que los sobreimpulsos ocurren en instantes posteriores que en el caso nominal. En la compensación del enlace HVDC se observa un sobreimpulso inicial menor; sin embargo, posteriormente se presentan sobreimpulsos de mayor magnitud, acompañados de un desplazamiento temporal más amplio que el del caso nominal.

3.4.4. Modificación en la ganancia del sistema $K_{ps} = 100$

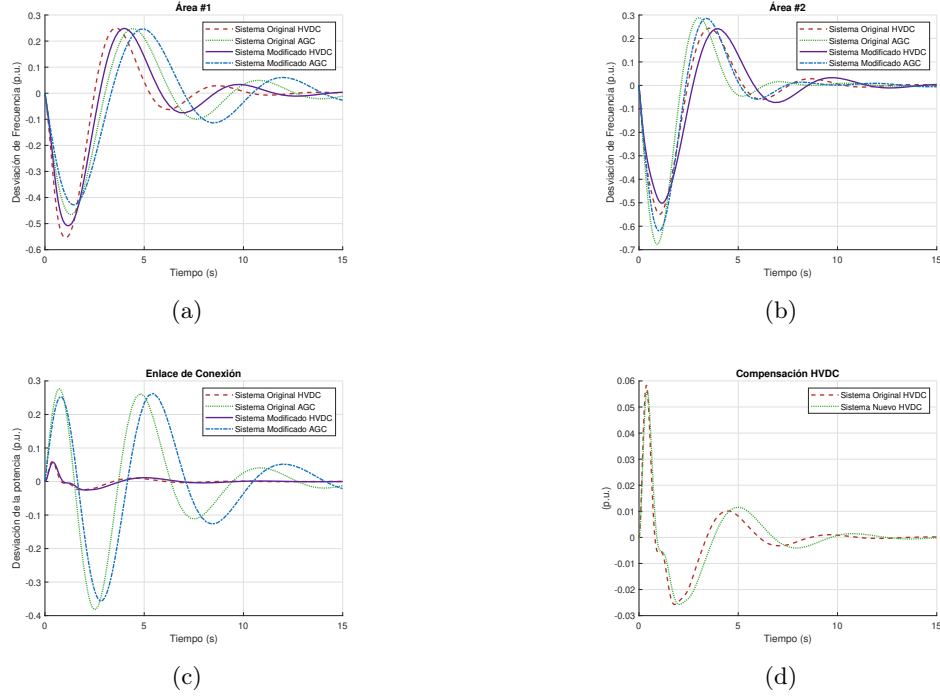


Figura 3.20: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $K_{PS} = 100$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Con el propósito de evaluar el efecto de una reducción moderada en la ganancia del bloque equivalente del sistema de potencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $K_{ps} = 120$, a $K_{ps} = 100$. Como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.20, en el área 1 se observa que el sistema con HVDC modificado presenta un nadir mayor que el sistema modificado bajo AGC convencional. No obstante, dicha excursión es menor que la observada en el HVDC nominal. Asimismo, se aprecia únicamente un ligero desplazamiento en el tiempo de asentamiento, sin cambios significativos en la forma general del transitorio. En el área 2, el sistema con HVDC modificado presenta un nadir menor en comparación con el caso nominal con HVDC. De manera similar, el sistema modificado bajo AGC convencional también muestra un nadir menor que su condición convencional original. En el enlace de interconexión, el comportamiento es muy similar al del caso nominal, observándose únicamente ligeros incrementos en el tiempo de asentamiento, sin alteraciones significativas en la forma del transitorio. En la compensación del enlace HVDC se aprecia un menor sobreimpulso inicial respecto al caso nominal; sin embargo, se identifica un desplazamiento en el tiempo de asentamiento, reflejando una variación leve en la dinámica temporal de la acción correctiva.

3.4.5. Modificación en el estatismo del gobernador $R = 1.2$

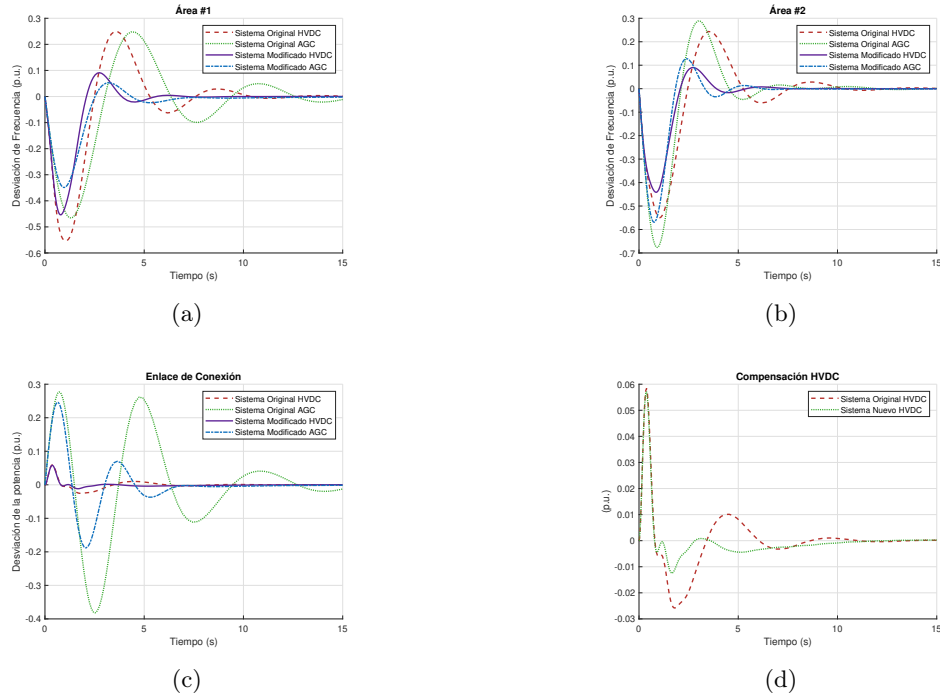


Figura 3.21: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $R = 1.2$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Con el propósito de analizar el efecto de una reducción del estatismo del gobernador, el parámetro se modificó de su valor nominal, $R = 2.4$, a $R = 1.2$. De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 3.21, en el área 1 se observa que el sistema con HVDC modificado presenta un nadir menor que el del caso nominal con HVDC; sin embargo, dicho nadir es mayor que el del sistema con AGC convencional modificado. Asimismo, el esquema con HVDC exhibe un sobreimpulso mayor con respecto al sistema AGC modificado. En el área 2, el sistema con HVDC modificado presenta un nadir menor, incluso inferior al del sistema AGC convencional modificado. El sobreimpulso también es menor; no obstante, se mantiene durante un intervalo más prolongado. Además, se identifica un menor tiempo de asentamiento en comparación con los demás esquemas evaluados. En el enlace de interconexión se observa que el sistema HVDC modificado presenta oscilaciones menores en el intercambio de potencia al compararlo con el sistema HVDC nominal. En la compensación del enlace HVDC se observan mayores oscilaciones respecto al caso nominal; sin embargo, los sobreimpulsos son menores y el nadir resulta considerablemente menor.

3.4.6. Modificación en el estatismo del gobernador $R = 4$

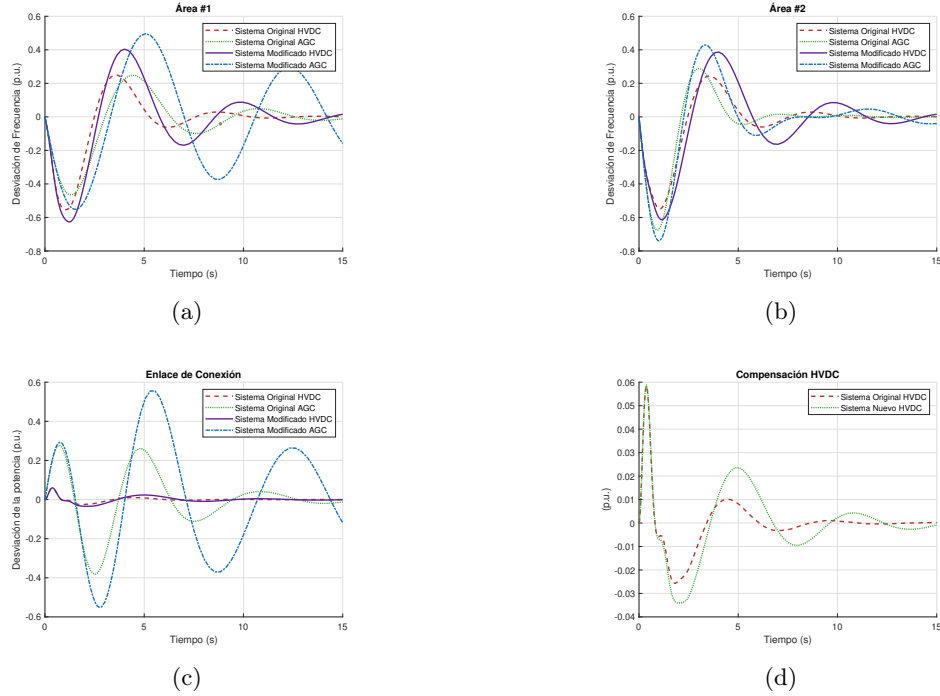


Figura 3.22: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $R = 4$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Con el propósito de analizar el efecto de un incremento en el estatismo del gobernador, el parámetro se modificó de su valor nominal, $R = 2.4$, a $R = 4$. En el área 1, se observa que el sistema con HVDC modificado presenta un nadir mayor y mayores sobreimpulsos que el caso nominal con HVDC. Lo anterior se ilustra esquemáticamente en la Figura 3.22. No obstante, al compararlo con el sistema modificado bajo AGC convencional, se aprecia que, aunque el nadir del HVDC modificado es ligeramente mayor, los sobreimpulsos posteriores son menores y el tiempo de asentamiento es inferior. En el área 2, el sistema con HVDC modificado presenta un nadir mayor, acompañado de mayores sobreimpulsos y un mayor tiempo de asentamiento que el HVDC nominal. Sin embargo, al compararlo con el sistema modificado bajo AGC convencional, se observan un nadir menor y un sobreimpulso menor, aunque el tiempo de asentamiento resulta ligeramente mayor. En el enlace de interconexión se observan pocas oscilaciones en comparación con los esquemas convencionales. En la compensación del enlace HVDC se aprecia una mayor excursión, así como un nadir de sobreimpulso más pronunciado, lo que indica una acción correctiva más pronunciada bajo esta condición de mayor estatismo.

3.4.7. Modificación en el sesgo de frecuencia $\beta = 0.75$

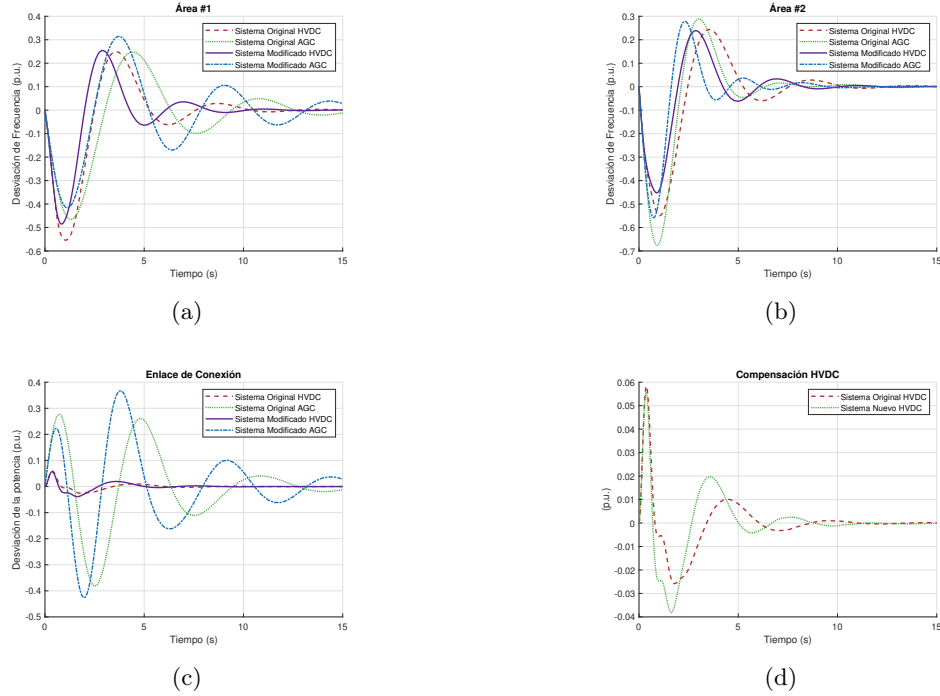


Figura 3.23: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $B = 0.75$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Con el propósito de evaluar el efecto de un incremento del sesgo de frecuencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $\beta = 0.425$, a $\beta = 0.75$. De la Figura 3.23 se observa que en el área 1 el sistema con HVDC modificado presenta un nadir menor en comparación con el HVDC nominal; sin embargo, dicho nadir es mayor que el correspondiente al sistema bajo AGC convencional modificado. Asimismo, el sobreimpulso ocurre en un instante anterior y se identifica un menor tiempo de asentamiento. En el área 2, el sistema con HVDC modificado presenta un nadir menor que el HVDC nominal, acompañado de un menor tiempo de asentamiento. Se observa, además, un ligero desplazamiento temporal en las oscilaciones al compararlas con el sistema modificado convencional. En el enlace de interconexión, al comparar el HVDC nominal con el HVDC modificado, se observa que el sistema modificado presenta mayores oscilaciones en el intercambio de potencia. En la compensación del enlace HVDC se observa un nadir y un sobreimpulso mayores en el caso modificado, obtenidos por una acción correctiva más pronunciada bajo esta condición de sesgo incrementado.

3.4.8. Modificación en el sesgo de frecuencia $\beta = 0.25$

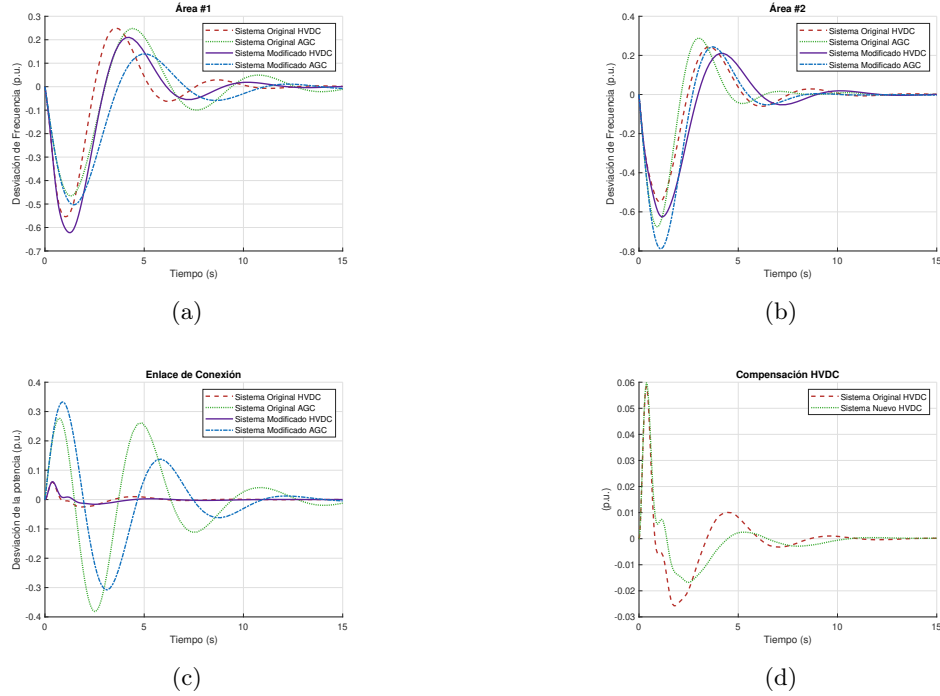


Figura 3.24: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $B = 0.25$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Para analizar el efecto de una reducción del sesgo de frecuencia, el parámetro se modificó de su valor nominal, $\beta = 0.425$, a $\beta = 0.25$. Con base en la Figura 3.24, en el área 1 se observa que el sistema con HVDC modificado presenta un nadir más grande que el caso nominal con HVDC. No obstante, el sobreimpulso es menor y el tiempo de asentamiento aumenta. Asimismo, las oscilaciones se perciben con menor amplitud durante el transitorio. En el área 2, el sistema con HVDC modificado presenta un nadir mayor en comparación con el HVDC nominal. Sin embargo, dicho nadir es menor que el del sistema bajo AGC convencional modificado. En el enlace de interconexión se observan oscilaciones menores que en el caso nominal, lo que evidencia una reducción de la amplitud del comportamiento oscilatorio. En la compensación del enlace HVDC se aprecia un nadir menor y menores oscilaciones en comparación con el caso nominal.

3.4.9. Modificación en la ganancia del bloque HVDC $K_{dc} = 1.6$

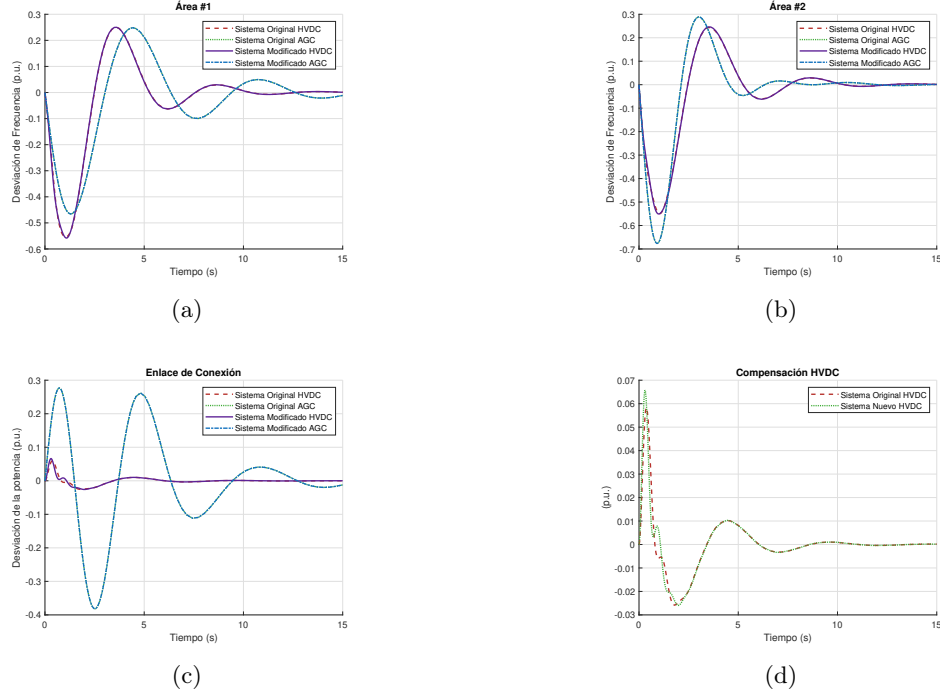


Figura 3.25: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $K_{dc} = 1.6$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

La Figura 3.25 muestra los resultados de la sensibilidad del sistema ante un incremento de la ganancia del bloque del enlace HVDC, en el que el parámetro se modificó de su valor nominal $K_{DC} = 1$ a $K_{DC} = 1.6$. En el área 1, se observa que la señal de frecuencia presenta variaciones imperceptibles respecto al caso nominal con HVDC. De manera similar, en el área 2 no se aprecian cambios significativos en la respuesta de frecuencia. El transitorio conserva características muy similares a las del caso nominal, con diferencias poco perceptibles en los indicadores dinámicos. En el enlace de interconexión se identifica un sobreimpulso ligeramente mayor que el del caso nominal; sin embargo, el sistema logra estabilizarse sin alteraciones sustanciales en el tiempo de asentamiento. El efecto más notable se observa en la compensación del enlace HVDC. Al incrementar la ganancia K_{DC} , se observa un pico de sobreimpulso ligeramente mayor, lo que provoca una acción correctiva mayor del dispositivo, mientras que la forma general del transitorio se mantiene.

3.4.10. Modificación en la ganancia del bloque HVDC $K_{dc} = 2.4$

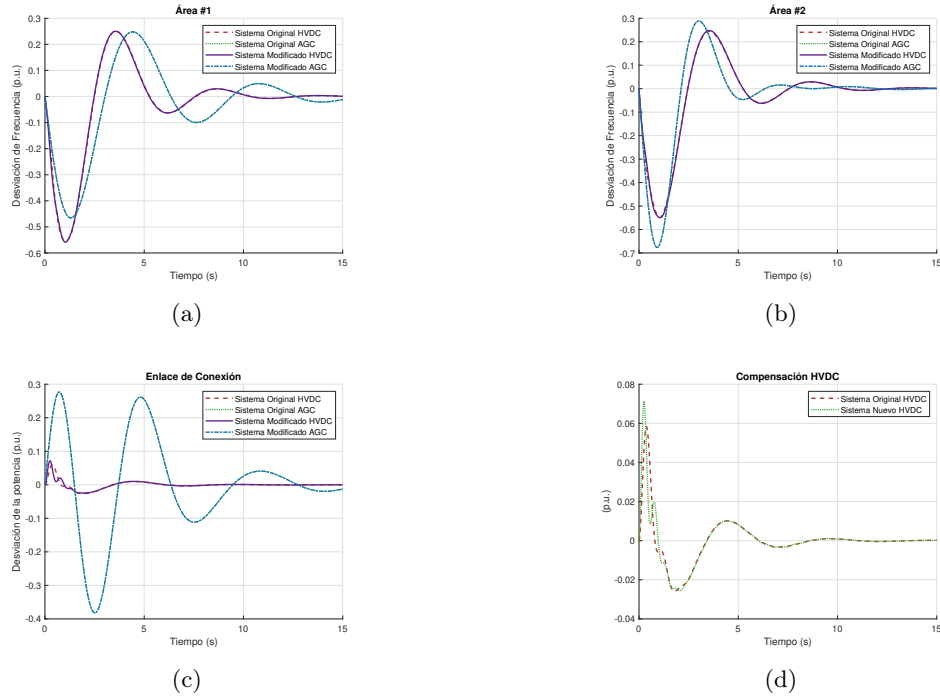


Figura 3.26: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $K_{dc} = 2.4$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Con el propósito de analizar el efecto de un incremento adicional en la ganancia del bloque del enlace HVDC, el parámetro se modificó de su valor nominal, $K_{DC} = 1$, a $K_{DC} = 2.4$. En el área 1 no se observan variaciones significativas en la señal de frecuencia respecto al caso nominal con HVDC. Lo anterior se ilustra en la Figura 3.26. De esta misma Figura se observa que el nadir, el sobreimpulso y el tiempo de asentamiento permanecen prácticamente inalterados. De igual manera, en el área 2, la respuesta dinámica conserva un comportamiento muy similar al del caso nominal, sin cambios apreciables en los indicadores principales del transitorio. En el enlace de interconexión se aprecia una leve diferencia en el instante en que ocurre el sobreimpulso, que se presenta en un tiempo menor que en el caso nominal. No obstante, la forma general del transitorio y su estabilización se mantienen similares. El efecto más evidente se observa en la compensación del enlace HVDC. Al incrementar la ganancia K_{DC} a 2.4, el sistema presenta un sobreimpulso más pronunciado y más rápido, lo que evidencia una acción correctiva más agresiva. Sin embargo, el tiempo de asentamiento es prácticamente el mismo que en el caso nominal, lo que mantiene la estabilidad del sistema.

3.4.11. Modificación en la constante de tiempo del bloque HVDC $T_{dc} = 0.1$

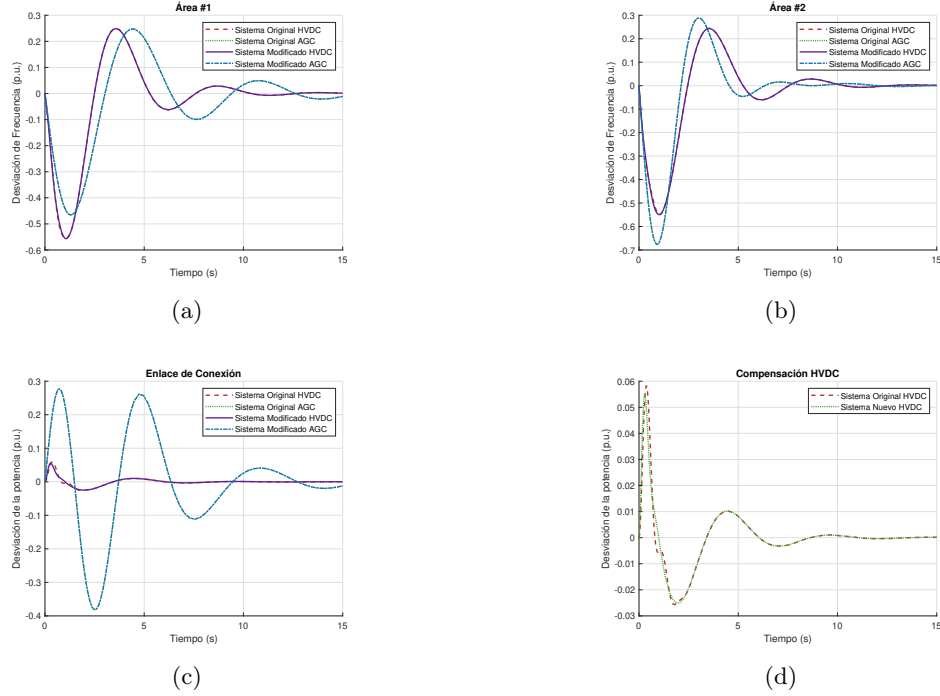


Figura 3.27: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $T_{dc} = 0.1$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

La Figura 3.27 muestra el efecto de una reducción en la constante de tiempo del bloque del enlace HVDC, donde el parámetro se modificó de su valor nominal $T_{DC} = 0.2$ a $T_{DC} = 0.1$. En el área 1 no se observan cambios significativos en la señal de frecuencia respecto al caso nominal con HVDC. El nadir, el sobreimpulso y el tiempo de asentamiento presentan un comportamiento prácticamente similar. En el área 2, la respuesta dinámica conserva características muy próximas a las del caso nominal, sin variaciones relevantes en los indicadores principales del transitorio. En el enlace de interconexión se aprecia que el sistema con HVDC modificado reacciona ligeramente antes que en el caso nominal, lo que se traduce en una respuesta más rápida ante la perturbación. En la compensación del enlace HVDC se observa un menor sobreimpulso y una reducción en la amplitud de las oscilaciones. Asimismo, la transición hacia el nadir se percibe más suave, reflejando una respuesta menos oscilatoria en el transitorio.

3.4.12. Modificación en la constante de tiempo del bloque HVDC $T_{dc} = 0.4$

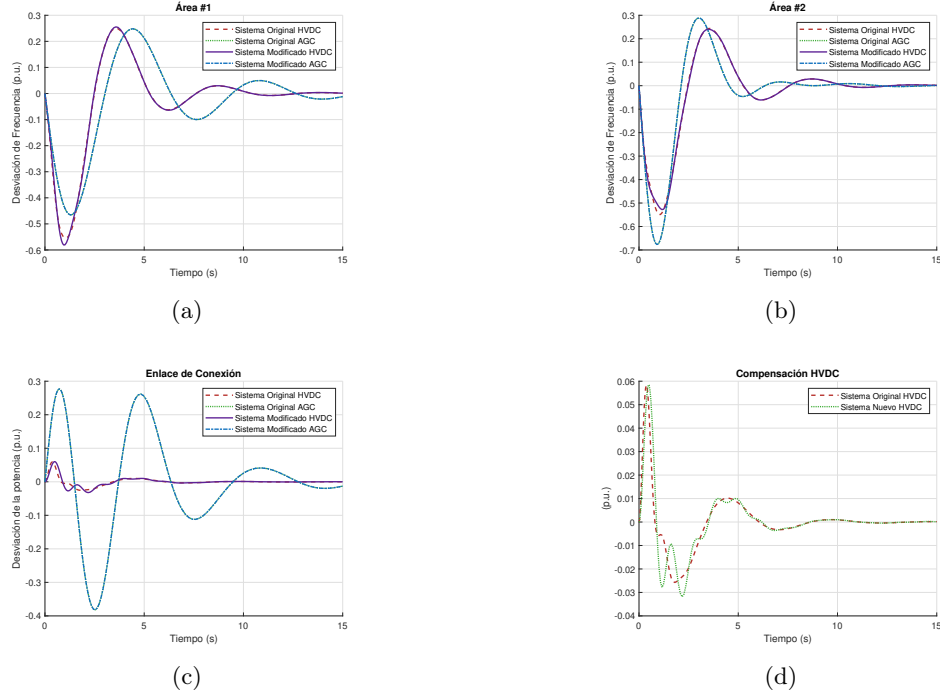


Figura 3.28: Comparación de la respuesta nominal y la modificación del sistema con el enlace HVDC para $T_{dc} = 0.4$: (a) Desviación de frecuencia en el área 1, (b) Desviación de frecuencia en el área 2, (c) Desviación del flujo de potencia ΔP_{tie} en la línea de interconexión y (d) Señal de compensación del enlace HVDC.

Con el propósito de analizar el efecto de un incremento de la constante de tiempo del bloque del enlace HVDC, el parámetro se modificó de su valor nominal, $T_{DC} = 0.2$, a $T_{DC} = 0.4$. Considerando los resultados mostrados en la Figura 3.28, en el área 1 se observa que el sistema con HVDC modificado presenta un nadir ligeramente mayor en comparación con el caso nominal con HVDC. En contraste, en el área 2, el sistema con HVDC modificado presenta un nadir ligeramente menor que el HVDC nominal, mostrando una variación opuesta a la observada en el área 1. En el enlace de interconexión se observan mayores oscilaciones en el sistema HVDC modificado en comparación con el caso nominal. El efecto se aprecia con mayor claridad en la compensación del enlace HVDC. Aunque los sobreimpulsos iniciales son prácticamente iguales a los del caso nominal, se observan mayores oscilaciones durante el transitorio, que persisten hasta el momento de asentamiento.

Capítulo 4

Conclusiones y Trabajos Futuros

4.1. Conclusiones

En este trabajo de tesis se tuvo como objetivo analizar el impacto de la incorporación del TCSC y HVDC híbrido, integrados como actuadores suplementarios dentro de un esquema de AGC basado en ACE y controladores PI, en un sistema eléctrico multiárea. Se planteó como hipótesis que su incorporación debe mejorar la estabilidad de frecuencia ante disturbios de carga y variaciones en la potencia de intercambio entre áreas, y que esta mejora puede cuantificarse mediante menores máximos de desviación de frecuencia, mayor amortiguamiento del flujo interárea, menor tiempo de supresión de las desviaciones y mayor robustez frente a cambios operativos. Para cumplir este objetivo, se desarrolló un modelado matemático detallado de cada tecnología, se integró en el AGC y se evaluó su comportamiento mediante simulaciones en Matlab/Simulink en el dominio del tiempo, bajo condiciones de perturbación equivalentes. Los resultados obtenidos confirman la validez de la hipótesis planteada. Dada la inclusión de dispositivos electrónicos en el enlace de interconexión se produjo mejoras cuantificables respecto al esquema AGC convencional sin compensación flexible. Comparando el esquema convencional AGC y el TCSC, el máximo desvío de frecuencia (nadir) se presenta con el TCSC, el cual presenta un incremento aproximado del 15.2 % en el área 1. Pero su reducción de tiempo de asentamiento mejora de 11.012 s en el esquema tradicional a un 5.219 s con el TCSC, eso es una mejora del 52.6 %. Por lo que, aunque la perturbación inicial es ligeramente mayor, el sistema recupera el equilibrio en aproximadamente la mitad del tiempo. En el área 2, el nadir prácticamente no cambia, pero cabe resaltar que su tiempo de asentamiento disminuye de 5.923 s a 4.855 s, un 18 %. En la línea de interconexión se observa la mejoría más grande, ya que el nadir pasa de -0.3317 Hz a -0.0407 con el TCSC, representando un 87.7 % de mejora, así como el tiempo de asentamiento que disminuye de 10.955 s a 4.171 s, obteniendo una mejora de 61.9 %. Siendo así que el TCSC es efectivo en el amortiguamiento de oscilaciones de potencia interárea.

A diferencia del TCSC que modifica la reactancia, el enlace HVDC actúa como un canal controlable de transferencia de potencia activa. En el área 1, el nadir empeora de forma ligera de -0.05548 Hz frente a -0.4677 Hz, incrementando el nadir en un 18.6 %, pero el tiempo de asentamiento mejora de 18.387 s a 10.066 s, lo que representa una reducción del 45.2 %. Mientras que en el área 2 el nadir mejora de forma notable, un 17.7 % que en el esquema convencional, así como sus tiempos de estabilización del sistema que mejoran en un 22.8 %. Demostrando así que el HVDC redistribuye activamente el desbalance de potencia, evitando que el área 2 experimente una desviación severa.

En la línea de interconexión el HVDC tuvo el efecto más significativo, ya que presentó una disminución en el nadir del 94.5 %: su nadir fue de -0.255 pu mientras que en el esquema convencional fue de -0.4617 pu, así como su tiempo de asentamiento se reduce un 85.2 % de 20.762 s a 3.066 s. De tal forma que se puede plantear que el TCSC mejora la estabilidad, al modificar la reactancia, mientras que el HVDC mejora la estabilidad al representar una mayor reducción porcentual en el nadir y los tiempos de estabilización del sistema.

También se pusieron a prueba con base en análisis de sensibilidades paramétrico que permitió evaluar la robustez del esquema de control propuesto ante variaciones en parámetros del modelo dinámico y del sistema de regulación. Se analizaron modificaciones en la constante de tiempo del sistema de potencia T_{ps} , la ganancia del bloque equivalente K_{ps} , el estatismo del gobernador R , el sesgo de frecuencia β , el coeficiente de sincronización T_{12} (mediante la variación de la reactancia X_{12}), así como en los parámetros internos del enlace HVDC (K_{DC} y T_{DC}). Los resultados muestran que el desempeño del TCSC y del enlace HVDC híbrido no es absoluto, sino que depende del entorno dinámico del sistema. La modificación de estos parámetros altera la distribución del amortiguamiento entre áreas, la magnitud del nadir de frecuencia, así como el tiempo en el que llega a la estabilidad. Se observó que la reducción de T_{ps} incrementa la severidad inicial del nadir debido a una menor inercia efectiva del sistema, aunque tanto el TCSC como el HVDC contribuyen a mejorar el amortiguamiento y a reducir el tiempo de estabilidad. Por otro lado, el incremento de T_{ps} produce una respuesta más suave pero más lenta, caracterizada por un menor contenido oscilatorio y un mayor retardo en la recuperación. Asimismo, la reducción del estatismo R , que implica una mayor sensibilidad de la regulación primaria, mejora el desempeño global del sistema y disminuye el esfuerzo requerido por el TCSC y el enlace HVDC. Por el contrario, el incremento de R genera respuestas más oscilatorias y mayores sobreimpulsos, en el que el enlace HVDC muestra una mayor capacidad de redistribución activa de potencia. En cuanto al sesgo de frecuencia β , su incremento fortalece la acción del AGC, reduciendo el nadir en ciertos escenarios con TCSC, aunque puede incrementar la componente oscilatoria de la respuesta. Además, el debilitamiento del acoplamiento interárea —representado por un mayor X_{12} o un menor T_{12} , incrementa la sensibilidad del TCSC, por lo que se ve un mayor esfuerzo de compensación para sostener la estabilidad dinámica. En el caso del HVDC, las variaciones en K_{DC} y T_{DC} afectan principalmente la intensidad y la rapidez de la acción correctiva, sin comprometer la estabilidad del sistema.

Del análisis comparativo puede establecerse que el TCSC y el enlace HVDC híbrido presentan ventajas diferenciadas según el tipo de perturbación y el estado dinámico del sistema. El TCSC muestra un mejor desempeño cuando el sistema presenta modos oscilaciones significativas en el sistema, cuando existe una sincronización eléctrica débil entre áreas (en el caso de ser la reactancia elevada); cuando se requiere mejorar el amortiguamiento dinámico sin modificar significativamente el balance activo; y cuando el problema principal es de naturaleza electromecánica y está asociado al intercambio de potencia interárea. Por su parte, el enlace HVDC híbrido presenta mayor efectividad cuando existe un desbalance significativo de potencia entre áreas, cuando se requiere una redistribución activa rápida de potencia, cuando una de las áreas experimenta una excursión severa de frecuencia, y cuando el objetivo principal es reducir los tiempos de asentamiento y amortiguar el intercambio dinámico de potencia. El HVDC actúa como un canal que controla la potencia activa, lo que permite mitigar la propagación de perturbaciones entre áreas y absorber el desbalance de potencia de manera directa, lo que le confiere una mayor capacidad de intervención ante perturbaciones de gran magnitud. Se permitió identificar escenarios en los que el desempeño de los dispositivos puede deteriorarse parcialmente. En sistemas con baja inercia efectiva, representada por una reducción de T_{ps} , el TCSC puede presentar un nadir más grande debido a la mayor severidad de la respuesta

inicial; por otra parte, el enlace HVDC puede incrementar la excursión inicial de frecuencia en el área perturbada como consecuencia de la rápida transferencia de potencia activa hacia el área no afectada, lo que modifica transitoriamente el balance dinámico local. Cuando se presenta un mayor R , ambos dispositivos pueden presentar niveles más altos de sobreimpulso, asociados a una menor sensibilidad de la regulación primaria y, por tanto, a una respuesta más oscilatoria del sistema.

4.2. Trabajos futuros

A partir del alcance de este trabajo y de los resultados obtenidos, se identifican diversas líneas de extensión e investigación futura que permitirían profundizar y ampliar los hallazgos presentados.

Se propone incorporar en la metodología planteada controles suplementarios de controladores FACTS asociados al compensador serie síncrono estático (SSSC) y al controlador unificado de flujos de potencia (UPFC). También se propone generalizar los modelos desarrollados y el esquema de control propuesto a sistemas con tres o más áreas de control, considerando múltiples enlaces de interconexión y topologías de red más complejas. Este tipo de extensión permitirá evaluar la interacción entre varios modos interárea y analizar el comportamiento coordinado de múltiples dispositivos FACTS y enlaces HVDC en escenarios dinámicos de mayor exigencia.

Asimismo, se propone incorporar modelos dinámicos más detallados de generación hidráulica, eólica y fotovoltaica basados en convertidores electrónicos, que incluyan estrategias de emulación de inercia. Esto permitiría estudiar el desempeño del esquema de AGC en escenarios de baja inercia y alta variabilidad, cada vez más representativos de los sistemas eléctricos contemporáneos.

Apéndice A

Controladores

En un sistema AGC, los controladores cumplen la función de eliminar el error en estado estacionario causado por las desviaciones de frecuencia y los desbalances en los intercambios de potencia entre áreas. Actúan sobre la señal del ACE y, mediante el tipo de controlador implementado, ajustan automáticamente la consigna de potencia en los generadores [1, 3, 23].

A.1. Controlador Integrado

Proporciona una señal de control que es proporcional a la integral del error respecto al tiempo, matemáticamente,

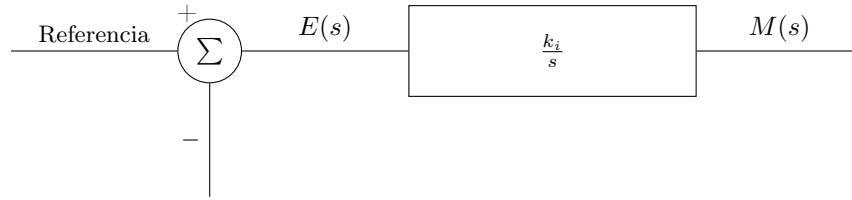


Figura A.1: Diagrama de bloques del control proporcional-integral

$$m(t) = \int_{\infty}^t k_i e(t) dt \quad (\text{A.1})$$

Donde, $e(t)$ indica el error $m(t)$ acción de control k_i constante de integración de control

Mientras se detecte un error, siendo la diferencia de la señal de salida con la señal de referencia, el control integral trabajará hasta que se elimine el error y $m(t)$ se haga constante. [1, 3, 23].

Cuando $e(t)$ sea cero, es indicativo de no haber más variaciones en $m(t)$ porque el error se eliminó, por tanto,

$$G_c(s) = \frac{k_i}{s} \quad (\text{A.2})$$

A.2. Controlador Derivativo

El control derivativo en un sistema tiene una respuesta que se comporta como una señal proporcional al error, el cual se representa como,

$$m(t) = k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{A.3})$$

Predice el error, ya que se adelanta frente a una tendencia de error para minimizarlo [1, 3, 23].

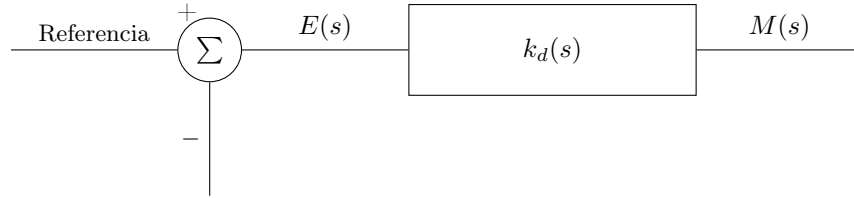
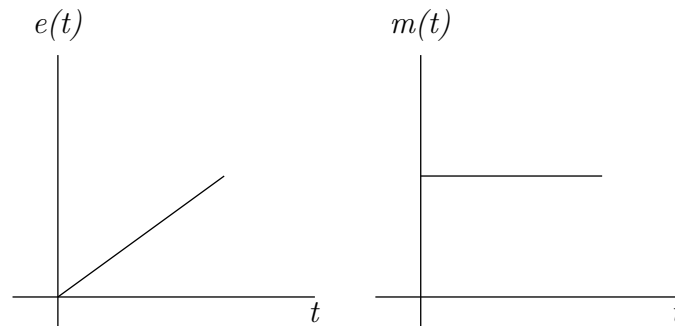


Figura A.2: Diagrama de bloques del control derivativo



A.3. Controlador Proporcional Integrador

El controlador corrige el error de acuerdo a la suma de dos acciones, siendo esta el proporcional e integral[1, 3, 23, 25] , de forma esquemática y matemática,

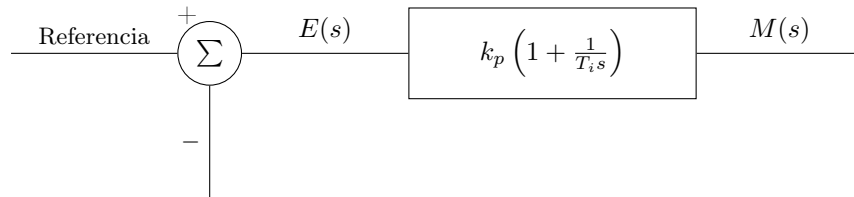


Figura A.3: Diagrama de bloques del control proporcional-integral

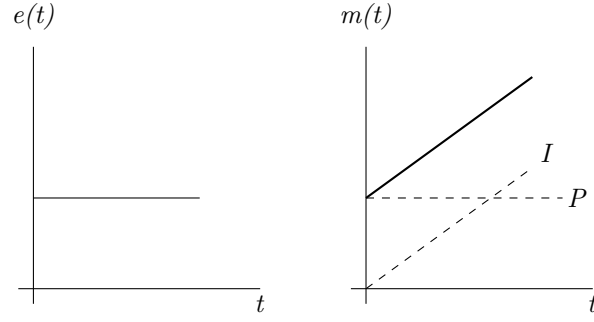


Figura A.4: Representación gráfica del control proporcional-integral.

$$m(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau \quad (\text{A.4})$$

donde,

- $e(t)$ representa el error
- $m(t)$ la acción de control
- k_p constante de proporcionalidad del control.
- T_i Tiempo de integración

Pasando al dominio de Laplace

$$\mathcal{L}\{e(t)\} = E(s) \quad , \mathcal{L}\left\{\int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau\right\} = \frac{E(s)}{s}$$

$$\mathcal{L}\{m(t)\} = K_p * E(s) + \frac{k_p}{T_i} * \frac{E(s)}{s}$$

Factorizando,

$$M(s) = \left(k_p + \frac{k_p}{T_i s}\right) E(s)$$

Siendo que,

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_p}{T_i s}$$

donde

$$k_i = \frac{k_p}{T_i}$$

Por lo tanto,

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (\text{A.5})$$

El controlador PI, responde de forma casi inmediata y aumenta su acción mientras aún se detecte el error a corregir, su desventaja recae en que no es eficaz cuando se necesita responder ante oscilaciones transitorias[3, 23].

A.4. Controlador Proporcional Integrador Derivativo

El controlador proporcional–integral–derivativo (PID) combina tres acciones de control las cuales reducen el error en estado estacionario, mejoran la respuesta transitoria y anticipan las variaciones rápidas de la señal de error. Como se ha dicho con anterioridad la acción proporcional corrige de forma inmediata las desviaciones, la acción integral elimina el error en estado estacionario acumulando en el sistema, y la acción derivativa maneja una respuesta anticipada basada en la tasa de cambio del error, lo cual ayuda a mejorar la estabilidad y acelerar la convergencia hacia el punto de operación deseado [3, 23]. Estas tres acciones permiten que el sistema tenga una respuesta más rápida, estable y precisa ante perturbaciones. De forma esquemática y matemática, se representa mediante:

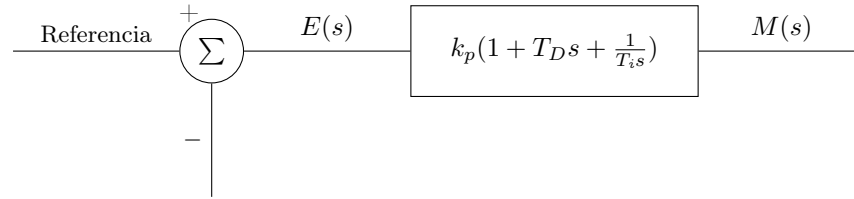


Figura A.5: Diagrama de bloques del control proporcional-integral

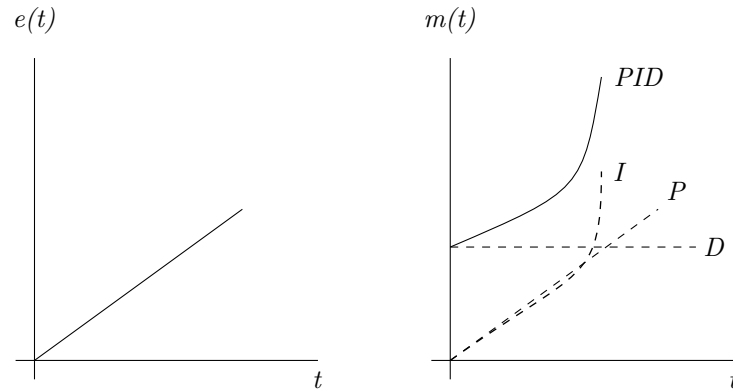


Figura A.6: Diagrama de la estructura de control PID

$$m(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt \quad (\text{A.6})$$

Para obtener su función de transferencia, se lleva la ecuación (A.4) al dominio de Laplace, donde,

$$\mathcal{L}\{e(t)\} = E(s) \quad , \mathcal{L}\left\{\frac{de(t)}{dt}\right\} = sE(s) \quad , \mathcal{L}\left\{\int e(t) dt\right\} = \frac{E(s)}{s}$$

Por tanto,

$$M(s) = k_p \left[E(s) + T_d s E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) \right]$$

Factorizando,

$$M(s) = k_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) E(s)$$

Siendo su función de transferencia,

$$G_c(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

De forma estandar,

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{A.7}$$

donde,

$$K_p = k_p \quad , K_i = \frac{k_p}{T_i} \quad , K_d = k_p T_d$$

Apéndice B

Parámetros del Sistema

Parámetros del Sistema

Área 1

- $T_{t1} = 0.3$
- $T_{g1} = 0.08$
- $T_{CH1} = 0.3$
- $T_{RH1} = 4$
- $T_{CO1} = 0.3$
- $F_{HP1} = 0.3$
- $F_{IP1} = 0.4$
- $F_{LP1} = 0.3$
- $T_{ps1} = 20$
- $K_{ps1} = 120$
- $R_1 = 2.4$
- $\beta_1 = 0.425$

Área 2

- $T_{t2} = 0.3$
- $T_{g2} = 0.08$
- $T_{CH2} = 0.3$
- $T_{RH2} = 4$
- $T_{CO2} = 0.3$
- $F_{HP2} = 0.3$
- $F_{IP2} = 0.4$
- $F_{LP2} = 0.3$
- $T_{ps2} = 20$
- $K_{ps2} = 120$
- $R_2 = 2.4$
- $\beta_2 = 0.425$

Otros parámetros

- $K_{TCSC} = 2$
- $T_{TCSC} = 0.02$
- $T_{12} = 0.0866$
- $J_{12} = 0.05$
- $T_{c0} = 0.05$
- $K_{DC} = 1$
- $T_{DC} = 0.2$
- $SLP_1 = 0.1$
- $SLP_2 = 0.2$

Apéndice C

Desarrollo algebraico del modelo del cambiador de velocidad

El modelo del gobernador de velocidad se representa mediante un esquema de bloques compuesto por un cambiador de velocidad. Los nodos C , D y E no corresponden a señales internas del sistema de control del gobernador. El nodo C representa la señal resultante de la comparación entre la referencia de potencia y la realimentación proporcional a la desviación de frecuencia (droop). El nodo D modela la acción de amplificación y acoplamiento dinámico del mecanismo de gobernación, mientras que el nodo E corresponde a la salida dinámica del gobernador, asociada a la potencia mecánica entregada a la turbina. Se describe el comportamiento dinámico del regulador de velocidad dentro del esquema de Control Automático de Generación.

$$\text{Nodo C: } \Delta y_c(s) = -k_1 k_c \Delta P_c(s) + k_2 \Delta F(s) \quad (\text{C.1})$$

$$\text{Nodo D: } \Delta y_d(s) = k_3 \Delta y_c(s) + k_4 \Delta y_e(s) \quad (\text{C.2})$$

$$\text{Nodo E: } \Delta y_e(s) = -\frac{k_5}{s} \Delta y_d(s) \quad (\text{C.3})$$

Para obtener $\Delta y_e(s)$ se eliminan los términos $\Delta y_c(s)$ y $\Delta y_d(s)$. Por lo tanto,

$$\Delta y_d(s) = k_3 \left(-k_1 k_c \Delta P_c(s) + k_2 \Delta F(s) \right) + k_4 \Delta y_e(s) \quad (\text{C.4})$$

$$\Delta y_d(s) = -k_1 k_3 k_c \Delta P_c(s) + k_2 k_3 \Delta F(s) + k_4 \Delta y_e(s) \quad (\text{C.5})$$

Por lo que, en el nodo E :

$$\Delta y_e(s) = -\frac{k_5}{s} \left(-k_1 k_3 k_c \Delta P_c(s) + k_2 k_3 \Delta F(s) + k_4 \Delta y_e(s) \right) \quad (\text{C.6})$$

Multiplicando ambos lados por s :

$$s \Delta y_e(s) = k_5 \left(k_1 k_3 k_c \Delta P_c(s) - k_2 k_3 \Delta F(s) - k_4 \Delta y_e(s) \right) \quad (\text{C.7})$$

Reordenando términos:

$$s \Delta y_e(s) + k_5 k_4 \Delta y_e(s) = k_5 k_1 k_3 k_c \Delta P_c(s) - k_5 k_2 k_3 \Delta F(s) \quad (\text{C.8})$$

Factorizando $\Delta y_e(s)$:

$$\Delta y_e(s) (s + k_5 k_4) = k_5 k_1 k_3 k_c \Delta P_c(s) - k_5 k_2 k_3 \Delta F(s) \quad (\text{C.9})$$

Dividiendo entre $s + k_5 k_4$:

$$\Delta y_e(s) = \frac{k_5 k_1 k_3 k_c \Delta P_c(s) - k_5 k_2 k_3 \Delta F(s)}{s + k_5 k_4} \quad (\text{C.10})$$

Factorizando k_5 , se obtiene:

$$\Delta y_e(s) = \frac{k_1 k_3 k_5 k_c \Delta P_c(s) - k_2 k_3 k_5 \Delta F(s)}{k_4 k_5 + s} \quad (\text{C.11})$$

Agrupando los términos constantes, se definen las siguientes magnitudes:

$$K_{sg} = k_1 k_3 k_5 k_c \quad \text{ganancia del sistema del gobernador} \quad (\text{C.12})$$

$$\frac{1}{R} = \frac{k_1 k_c}{k_2} \quad \text{constante de regulación (retroalimentación)} \quad (\text{C.13})$$

$$T_{sg} = \frac{1}{k_4 k_5} \quad \text{constante de tiempo} \quad (\text{C.14})$$

Reordenando la expresión anterior, la salida del sistema puede escribirse como:

$$\Delta y_e(s) = \left[\Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right] \left(\frac{K_{sg}}{1 + T_{sg} s} \right) \quad (\text{C.15})$$

Se definen las siguientes relaciones:

$$K = \frac{k_1 k_c}{k_2} \quad (\text{C.16})$$

$$\frac{1}{R} = \frac{k_2}{k_1 k_c} \quad (\text{C.17})$$

$$T_{sg} = \frac{1}{k_4 k_5} \quad (\text{C.18})$$

$$K_{sg} = k_1 k_3 k_5 k_c \quad (\text{C.19})$$

Partiendo de la expresión:

$$\Delta y_e(s) = \frac{k_1 k_3 k_c \Delta P_c(s) - k_2 k_3 \Delta F(s)}{k_4 + \frac{s}{k_5}} \quad (\text{C.20})$$

Agrupando el término k_3 :

$$\Delta y_e(s) = \frac{k_3 \left(k_1 k_c \Delta P_c(s) - k_2 \Delta F(s) \right)}{k_4 + \frac{s}{k_5}} \quad (\text{C.21})$$

Factorizando $k_1 k_c$:

$$\Delta y_e(s) = \frac{k_3 k_1 k_c \left(\Delta P_c(s) - \frac{k_2}{k_1 k_c} \Delta F(s) \right)}{k_4 + \frac{s}{k_5}} \quad (\text{C.22})$$

Donde se identifica que:

$$\frac{k_2}{k_1 k_c} = \frac{1}{R} \quad (\text{C.23})$$

Por lo tanto:

$$\Delta y_e(s) = \frac{k_3 k_1 k_c \left[\Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right]}{k_4 + \frac{s}{k_5}} \quad (\text{C.24})$$

Factorizando k_4 en el denominador:

$$\Delta y_e(s) = \frac{k_3 k_1 k_c}{k_4} \frac{\left[\Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right]}{1 + \frac{s}{k_5 k_4}} \quad (\text{C.25})$$

Recordando que la constante de tiempo del gobernador está dada por:

$$T_{sg} = \frac{1}{k_4 k_5} \quad (\text{C.26})$$

se tiene la siguiente expresión intermedia:

$$\Delta y_e(s) = \frac{k_3 k_1 k_c \left[\Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right]}{k_4 (1 + T_{sg} s)} \quad (\text{C.27})$$

Definiendo la ganancia del sistema del gobernador como:

$$K_{sg} = \frac{k_1 k_3 k_c}{k_4} \quad (\text{C.28})$$

la expresión final queda:

$$\Delta y_e(s) = \left[\Delta P_c(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right] \frac{K_{sg}}{1 + T_{sg} s} \quad (\text{C.29})$$

Apéndice D

Modelos Matemáticos

D.1. Modelos de dos Áreas con Control Integrador (I)

El diagrama de bloques del sistema es representado en la Figura 2.19.

$$u_1(t) = k_{p1} ACE_1(t), \quad (D.1)$$

$$u_2(t) = k_{p2} ACE_2(t), \quad (D.2)$$

$$ACE_1(t) = B_1 \Delta f_1(t) + \Delta P_{tie}(t), \quad (D.3)$$

$$ACE_2(t) = B_2 \Delta f_2(t) - a_{12} \Delta P_{tie}(t). \quad (D.4)$$

$$\dot{\Delta P}_{G1}(t) = -\frac{1}{T_{g1}} \Delta P_{G1}(t) + \frac{1}{T_{g1}} \left[k_{p1} ACE_1(t) - \frac{1}{R_1} \Delta f_1(t) \right], \quad (D.5)$$

$$\dot{\Delta P}_{G2}(t) = -\frac{1}{T_{g2}} \Delta P_{G2}(t) + \frac{1}{T_{g2}} \left[k_{p2} ACE_2(t) - \frac{1}{R_2} \Delta f_2(t) \right], \quad (D.6)$$

$$\dot{\Delta P}_{CH1}(t) = -\frac{1}{T_{ch1}} \Delta P_{CH1}(t) + \frac{1}{T_{ch1}} \Delta P_{G1}(t), \quad (D.7)$$

$$\dot{\Delta P}_{RH1}(t) = -\frac{1}{T_{rh1}} \Delta P_{RH1}(t) + \frac{1}{T_{rh1}} \Delta P_{CH1}(t), \quad (D.8)$$

$$\dot{\Delta P}_{CO1}(t) = -\frac{1}{T_{co1}} \Delta P_{CO1}(t) + \frac{1}{T_{co1}} \Delta P_{RH1}(t), \quad (D.9)$$

$$\Delta P_{m1}(t) = F_{HP1} \Delta P_{CH1}(t) + F_{IP1} \Delta P_{RH1}(t) + F_{LP1} \Delta P_{CO1}(t), \quad (D.10)$$

$$\dot{\Delta f}_1(t) = -\frac{1}{T_{ps1}} \Delta f_1(t) + \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} \left(\Delta P_{m1}(t) - \Delta P_{L1}(t) - \Delta P_{tie}(t) \right), \quad (D.11)$$

$$\dot{\Delta f}_2(t) = -\frac{1}{T_{ps2}} \Delta f_2(t) + \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} \left(\Delta P_{m2}(t) - \Delta P_{L2}(t) + a_{12} \Delta P_{tie}(t) \right), \quad (D.12)$$

$$\dot{\Delta P}_{tie}(t) = 2\pi T_{12} \left(\Delta f_1(t) - \Delta f_2(t) \right). \quad (D.13)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{CH1} \\ \Delta P_{RH1} \\ \Delta P_{CO1} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{G2} \\ \Delta P_{CH2} \\ \Delta P_{RH2} \\ \Delta P_{CO2} \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix}. \quad (D.14)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{g1}} \left(k_{p1} B_1 - \frac{1}{R_1} \right) & -\frac{1}{T_{ps1}} & 0 & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} F_{HP1} & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} F_{LP1} & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} F_{LP1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} \\ -\frac{1}{T_{g1}} & \frac{1}{T_{ch1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{p1}}{T_{g1}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{ch1}} & \frac{1}{T_{rh1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{rh1}} & -\frac{1}{T_{co1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{co1}} & -\frac{1}{T_{co1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ps2}} & 0 & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} F_{HP2} & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} F_{LP2} & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} F_{LP2} & \frac{a_{12} K_{ps2}}{T_{ps2}} & \frac{a_{12} K_{ps2}}{T_{ps2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{g2}} \left(k_{p2} B_2 - \frac{1}{R_2} \right) & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{a_{12} k_{p2}}{T_{g2}} & -\frac{a_{12} k_{p2}}{T_{g2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ch2}} & \frac{1}{T_{rh2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{rh2}} & -\frac{1}{T_{co2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{co2}} & -\frac{1}{T_{co2}} & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (D.15)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (D.16)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{D.17})$$

D.2. Modelos de dos Áreas con Control Proporcional Integrador (PI)

Para el modelo donde se incluye un controlador Proporcional Integrador (PI), se considera el mismo Diagrama 2.19, siendo que las ecuaciones (??) y (??) las únicas que cambian en comparación al modelo con controlador Integrador donde,

$$u_1 = k_{p1} ACE_1 + k_{i1} z_1 \quad (\text{D.18})$$

$$u_2 = k_{p2} ACE_2 + k_{i2} z_2 \quad (\text{D.19})$$

$$ACE_1(t) = B_1 \Delta f_1(t) + \Delta P_{tie}(t), \quad (\text{D.20})$$

$$ACE_2(t) = B_2 \Delta f_2(t) - a_{12} \Delta P_{tie}(t), \quad (\text{D.21})$$

$$\dot{x}_{I1}(t) = ACE_1(t), \quad \dot{x}_{I2}(t) = ACE_2(t). \quad (\text{D.22})$$

$$\dot{\Delta P}_{G1}(t) = -\frac{1}{T_{g1}} \Delta P_{G1}(t) + \frac{1}{T_{g1}} \left[K_{P1} ACE_1(t) + K_{I1} x_{I1}(t) - \frac{1}{R_1} \Delta f_1(t) \right], \quad (\text{D.23})$$

$$\dot{\Delta P}_{G2}(t) = -\frac{1}{T_{g2}} \Delta P_{G2}(t) + \frac{1}{T_{g2}} \left[K_{P2} ACE_2(t) + K_{I2} x_{I2}(t) - \frac{1}{R_2} \Delta f_2(t) \right], \quad (\text{D.24})$$

$$\dot{\Delta P}_{CH1}(t) = -\frac{1}{T_{ch1}} \Delta P_{CH1}(t) + \frac{1}{T_{ch1}} \Delta P_{G1}(t), \quad (\text{D.25})$$

$$\dot{\Delta P}_{RH1}(t) = -\frac{1}{T_{rh1}} \Delta P_{RH1}(t) + \frac{1}{T_{rh1}} \Delta P_{CH1}(t), \quad (\text{D.26})$$

$$\dot{\Delta P}_{CO1}(t) = -\frac{1}{T_{co1}} \Delta P_{CO1}(t) + \frac{1}{T_{co1}} \Delta P_{RH1}(t), \quad (\text{D.27})$$

$$\Delta P_{m1}(t) = F_{HP1} \Delta P_{CH1}(t) + F_{IP1} \Delta P_{RH1}(t) + F_{LP1} \Delta P_{CO1}(t), \quad (\text{D.28})$$

$$\dot{\Delta P}_{tie}(t) = 2\pi T_{12} \left(\Delta f_1(t) - \Delta f_2(t) \right). \quad (\text{D.29})$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ x_{I1} \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{CH1} \\ \Delta P_{RH1} \\ \Delta P_{CO1} \\ \Delta f_2 \\ x_{I2} \\ \Delta P_{G2} \\ \Delta P_{CH2} \\ \Delta P_{RH2} \\ \Delta P_{CO2} \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix}. \quad (\text{D.30})$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{ps1}} & 0 & 0 & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} F_{HP1} & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} F_{IP1} & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} F_{LP1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} \\ B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{T_{g1}} \left(K_{F1} B_1 - \frac{1}{R_1} \right) & \frac{K_{I1}}{T_{g1}} & -\frac{1}{T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{F1}}{T_{g1}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{ch1}} & -\frac{1}{T_{ch1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{rh1}} & -\frac{1}{T_{rh1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{co1}} & -\frac{1}{T_{co1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ps2}} & 0 & 0 & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} F_{HP2} & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} F_{IP2} & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} F_{LP2} & \frac{a_{12} K_{ps2}}{T_{ps2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{g2}} \left(K_{P2} B_2 - \frac{1}{R_2} \right) & \frac{K_{I2}}{T_{g2}} & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{a_{12} K_{P2}}{T_{g2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ch2}} & -\frac{1}{T_{ch2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{rh2}} & -\frac{1}{T_{rh2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{co2}} & -\frac{1}{T_{co2}} & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{D.31})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{D.32})$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{D.33})$$

D.3. Modelos de dos Áreas con Control Proporcional Integrador (PID)

En este modelo se integra en el controlador la configuración Proporcional Integral Derivativa (PID), por lo que sus ecuaciones de estado se representan como,

$$u_1(t) = k_{p1} ACE_1(t) + k_{i1} x_{I1}(t) + k_{d1} d_1(t), \quad (\text{D.34})$$

$$u_2(t) = k_{p2} ACE_2(t) + k_{i2} x_{I2}(t) + k_{d2} d_2(t), \quad (\text{D.35})$$

$$\dot{d}_1(t) = -\frac{1}{T_{d1}} d_1(t) + \frac{1}{T_{d1}} ACE_1(t), \quad (\text{D.36})$$

$$\dot{d}_2(t) = -\frac{1}{T_{d2}} d_2(t) + \frac{1}{T_{d2}} ACE_2(t), \quad (\text{D.37})$$

Siendo que se agregan dos estados adicionales, que vienen siendo d_1 y d_2 , la configuración del controlador Proporcional Integrador Derivativo es dado por,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ x_{I1} \\ d_1 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{CH1} \\ \Delta P_{RH1} \\ \Delta P_{CO1} \\ \Delta f_2 \\ x_{I2} \\ d_2 \\ \Delta P_{G2} \\ \Delta P_{CH2} \\ \Delta P_{RH2} \\ \Delta P_{CO2} \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix}. \quad (\text{D.38})$$

$$ACE_1 = B_1 \Delta f_1 + \Delta P_{tie}, \quad ACE_2 = B_2 \Delta f_2 - a_{12} \Delta P_{tie}. \quad (\text{D.39})$$

$$\dot{\Delta P_{tie}} = 2\pi T_{12} (\Delta f_1 - \Delta f_2). \quad (\text{D.40})$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{ps1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} F_{HP1} & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} F_{IP1} & \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} F_{LP1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} \\ B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{B_1}{T_{d1}} & 0 & -\frac{1}{T_{d1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{d1}} \\ \frac{1}{T_{y1}} \left(k_{p1} B_1 - \frac{1}{R_1} \right) & \frac{k_{i1}}{T_{y1}} & \frac{k_{d1}}{T_{y1}} & -\frac{1}{T_{y1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{p1}}{T_{y1}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ch1}} & -\frac{1}{T_{ch1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{rh1}} & -\frac{1}{T_{rh1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{co1}} & -\frac{1}{T_{co1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ps2}} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} F_{HP2} & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} F_{IP2} & \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} F_{LP2} & \frac{a_{12} K_{ps2}}{T_{ps2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{B_2}{T_{d2}} & 0 & -\frac{1}{T_{d2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{a_{12}}{T_{d2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{y2}} \left(k_{p2} B_2 - \frac{1}{R_2} \right) & \frac{k_{i2}}{T_{y2}} & \frac{k_{d2}}{T_{y2}} & -\frac{1}{T_{y2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{a_{12} k_{p2}}{T_{y2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ch2}} & -\frac{1}{T_{ch2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{rh2}} & -\frac{1}{T_{rh2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{co2}} & -\frac{1}{T_{co2}} & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{D.41})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{D.42})$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{D.43})$$

D.4. Formulaci3n del modelo linealizado TCSC

De la Figura 3.1 la impedancia equivalente del enlace serie compensado por TCSC es:

$$Z_{eq} = j(X_{12} - X_{TCSC}). \quad (\text{D.44})$$

Por lo tanto, la corriente del área 1 hacia el área 2 es:

$$\bar{I}_{12} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{Z_{eq}} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{j(X_{12} - X_{TCSC})}. \quad (D.45)$$

Usando $\bar{V}_1 = V_1 \angle \delta_1 = V_1 e^{j\delta_1}$ y $\bar{V}_2 = V_2 \angle \delta_2 = V_2 e^{j\delta_2}$:

$$\bar{I}_{12} = \frac{V_1 e^{j\delta_1} - V_2 e^{j\delta_2}}{j(X_{12} - X_{TCSC})} = \frac{-j(V_1 e^{j\delta_1} - V_2 e^{j\delta_2})}{(X_{12} - X_{TCSC})}. \quad (D.46)$$

Recordando:

$$\bar{S}_{12} = P_{12} + jQ_{12} = \bar{V}_1 \bar{I}_{12}^* \quad (D.47)$$

El conjugado de (D.46) es:

$$\bar{I}_{12}^* = \frac{j(V_1 e^{-j\delta_1} - V_2 e^{-j\delta_2})}{(X_{12} - X_{TCSC})}. \quad (D.48)$$

Sustituyendo en (D.47):

$$\bar{S}_{12} = \frac{j}{(X_{12} - X_{TCSC})} [V_1^2 - V_1 V_2 e^{j(\delta_1 - \delta_2)}]. \quad (D.49)$$

Usando Euler:

$$e^{j(\delta_1 - \delta_2)} = \cos(\delta_1 - \delta_2) + j \sin(\delta_1 - \delta_2). \quad (D.50)$$

Entonces:

$$\bar{S}_{12} = \frac{j}{(X_{12} - X_{TCSC})} [V_1^2 - V_1 V_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) - j V_1 V_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)]. \quad (D.51)$$

Separando parte real e imaginaria se obtiene:

$$P_{tie12} = P_{12} = \frac{V_1 V_2}{(X_{12} - X_{TCSC})} \sin(\delta_1 - \delta_2), \quad (D.52)$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos(\delta_1 - \delta_2)}{(X_{12} - X_{TCSC})}. \quad (D.53)$$

Se define el factor de compensación serie:

$$X_{TCSC} = T_c X_{12}, \quad (D.54)$$

por lo que:

$$X_{12} - X_{TCSC} = X_{12}(1 - T_c). \quad (D.55)$$

Sustituyendo en (D.52):

$$P_{tie12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}(1 - T_c)} \sin(\delta_1 - \delta_2). \quad (D.56)$$

Se realiza la linealización incremental alrededor del punto de operación. Sea el punto de operación $(\delta_1^0, \delta_2^0, T_c^0)$. La expansión incremental de Taylor es:

$$\Delta P_{tie12} = \left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial \delta_1} \right|_0 \Delta \delta_1 + \left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial \delta_2} \right|_0 \Delta \delta_2 + \left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial T_c} \right|_0 \Delta T_c. \quad (D.57)$$

Sus derivadas parciales se dan por,

$$\left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial \delta_1} \right|_0 = \frac{V_1 V_2}{X_{12}(1 - T_c^0)} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0), \quad (D.58)$$

$$\left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial \delta_2} \right|_0 = -\frac{V_1 V_2}{X_{12}(1 - T_c^0)} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0), \quad (D.59)$$

$$\left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial T_c} \right|_0 = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0) \frac{\partial}{\partial T_c} \left(\frac{1}{1 - T_c} \right)_{T_c=T_c^0}. \quad (D.60)$$

Como:

$$\frac{\partial}{\partial T_c} \left(\frac{1}{1 - T_c} \right) = \frac{1}{(1 - T_c)^2}, \quad (D.61)$$

entonces:

$$\left. \frac{\partial P_{tie12}}{\partial T_c} \right|_0 = \frac{V_1 V_2}{X_{12}(1 - T_c^0)^2} \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0). \quad (D.62)$$

Sustituyendo (D.58)–(D.62) en (D.57):

$$\Delta P_{tie12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}(1 - T_c^0)} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0) (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) + \frac{V_1 V_2}{X_{12}(1 - T_c^0)^2} \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0) \Delta T_c. \quad (D.63)$$

Se definen los siguientes coeficientes como,

$$T_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0), \quad (D.64)$$

$$J_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0), \quad (D.65)$$

la ecuación incremental queda:

$$\Delta P_{tie12} = \frac{T_{12}}{(1 - T_c^0)} (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) + \frac{J_{12}}{(1 - T_c^0)^2} \Delta T_c. \quad (D.66)$$

La relación ángulo–frecuencia y forma en Laplace viene dada por la relación síncrona,

$$\omega_r = 2\pi f, \quad \omega = \frac{d\delta}{dt}, \quad (D.67)$$

se tiene para pequeñas perturbaciones:

$$\frac{d(\Delta \delta)}{dt} = 2\pi \Delta f. \quad (D.68)$$

Integrando:

$$\Delta \delta(t) = 2\pi \int_0^t \Delta f(\tau) d\tau. \quad (D.69)$$

En Laplace:

$$\Delta \delta(s) = \frac{2\pi}{s} \Delta f(s). \quad (D.70)$$

Por lo tanto:

$$\Delta\delta_1(s) - \Delta\delta_2(s) = \frac{2\pi}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)]. \quad (D.71)$$

Sustituyendo (D.71) en (D.66):

$$\Delta P_{tie12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{(1 - T_c^0)s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] + \frac{J_{12}}{(1 - T_c^0)^2} \Delta T_c(s). \quad (D.72)$$

Sea P_{r1} la potencia base (área 1). En p.u.:

$$\Delta P_{tie12,pu}(s) = \frac{\Delta P_{tie12}(s)}{P_{r1}}. \quad (D.73)$$

Definiendo:

$$T_{12,pu} = \frac{T_{12}}{P_{r1}}, \quad J_{12,pu} = \frac{J_{12}}{P_{r1}}, \quad (D.74)$$

se obtiene:

$$\Delta P_{tie12,pu}(s) = \frac{2\pi T_{12,pu}}{(1 - T_c^0)s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] + \frac{J_{12,pu}}{(1 - T_c^0)^2} \Delta T_c(s). \quad (D.75)$$

De forma similar, para el flujo del área 2 hacia el área 1:

$$P_{tie21} = \frac{V_2 V_1}{X_{21}(1 - T_c)} \sin(\delta_2 - \delta_1), \quad X_{21} = X_{12}, \quad (D.76)$$

y la linealización incremental conduce a:

$$\Delta P_{tie21}(s) = \frac{2\pi T_{21}}{(1 - T_c^0)s} [\Delta f_2(s) - \Delta f_1(s)] + \frac{J_{21}}{(1 - T_c^0)^2} \Delta T_c(s). \quad (D.77)$$

En p.u. del área 2 (potencia base P_{r2}):

$$\Delta P_{tie21,pu}(s) = \frac{\Delta P_{tie21}(s)}{P_{r2}}, \quad T_{21,pu} = \frac{T_{21}}{P_{r2}}, \quad J_{21,pu} = \frac{J_{21}}{P_{r2}}. \quad (D.78)$$

Así:

$$\Delta P_{tie21,pu}(s) = \frac{2\pi T_{21,pu}}{(1 - T_c^0)s} [\Delta f_2(s) - \Delta f_1(s)] + \frac{J_{21,pu}}{(1 - T_c^0)^2} \Delta T_c(s). \quad (D.79)$$

Finalmente, con el factor de conversión entre bases:

$$a_{12} = \frac{P_{r1}}{P_{r2}}, \quad (D.80)$$

y usando $X_{21} = X_{12}$ y la misma condición de operación,

$$T_{21,pu} = a_{12} T_{12,pu}, \quad (D.81)$$

lo que permite expresar la contribución equivalente de potencia de amarre entre áreas en forma consistente con el modelo AGC.

Bajo condiciones nominales se consideran los siguientes valores en el punto de operación,

$$\begin{aligned}
V_1 &= V_2 = 1 \text{ p.u.}, \\
X_{12} &= 10 \Omega, \\
\delta_0 &= 30^\circ.
\end{aligned} \tag{D.82}$$

Por lo que, el coeficiente de sincronización de la línea, evaluando en el punto de equilibrio, se define como,

$$T_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos(\delta_0) \tag{D.83}$$

Sustituyendo los valores numéricos,

$$T_{12} = \frac{1 * 1}{10} \cos(30) = 0.1 * 0.866 = 0.0866 \tag{D.84}$$

Adicionalmente, el término en cuadratura puede expresarse como,

$$J_{12} = T_{12} \tan(\delta_0) \tag{D.85}$$

Sustituyendo con los valores numéricos,

$$J_{12} = 0.0866 \tan(30) = 0.0866 * 0.577 = 0.05 \tag{D.86}$$

D.5. Modelo de dos Áreas con TCSC

En esta sección se presenta el modelo en espacio de estados para un sistema de dos áreas interconectadas, incorporando un TCSC en el enlace. Se incluye el control secundario PI mediante los integradores del ACE y, de acuerdo con la linealización del enlace serie compensado, se consideran los coeficientes T_{12} y J_{12} , asociados a las sensibilidades respecto a $\Delta\delta$ y ΔT_c , respectivamente.

$$ACE_1(t) = \beta_1 \Delta f_1(t) + \Delta P_{tie}(t), \tag{D.87}$$

$$ACE_2(t) = \beta_2 \Delta f_2(t) - a_{12} \Delta P_{tie}(t), \tag{D.88}$$

$$\dot{x}_{I1}(t) = ACE_1(t), \tag{D.89}$$

$$\dot{x}_{I2}(t) = ACE_2(t). \tag{D.90}$$

$$\Delta \dot{P}_{G1}(t) = -\frac{1}{T_{g1}} \Delta P_{G1}(t) + \frac{1}{T_{g1}} \left[K_{P1} ACE_1(t) + K_{I1} x_{I1}(t) - \frac{1}{R_1} \Delta f_1(t) \right], \tag{D.91}$$

$$\Delta \dot{P}_{G2}(t) = -\frac{1}{T_{g2}} \Delta P_{G2}(t) + \frac{1}{T_{g2}} \left[K_{P2} ACE_2(t) + K_{I2} x_{I2}(t) - \frac{1}{R_2} \Delta f_2(t) \right], \tag{D.92}$$

$$\Delta \dot{P}_{CH1}(t) = -\frac{1}{T_{ch1}} \Delta P_{CH1}(t) + \frac{1}{T_{ch1}} \Delta P_{G1}(t), \tag{D.93}$$

$$\dot{\Delta P}_{RH1}(t) = -\frac{1}{T_{rh1}} \Delta P_{RH1}(t) + \frac{1}{T_{rh1}} \Delta P_{CH1}(t), \quad (D.94)$$

$$\dot{\Delta P}_{CO1}(t) = -\frac{1}{T_{co1}} \Delta P_{CO1}(t) + \frac{1}{T_{co1}} \Delta P_{RH1}(t), \quad (D.95)$$

$$\dot{\Delta P}_{CH2}(t) = -\frac{1}{T_{ch2}} \Delta P_{CH2}(t) + \frac{1}{T_{ch2}} \Delta P_{G2}(t), \quad (D.96)$$

$$\dot{\Delta P}_{RH2}(t) = -\frac{1}{T_{rh2}} \Delta P_{RH2}(t) + \frac{1}{T_{rh2}} \Delta P_{CH2}(t), \quad (D.97)$$

$$\dot{\Delta P}_{CO2}(t) = -\frac{1}{T_{co2}} \Delta P_{CO2}(t) + \frac{1}{T_{co2}} \Delta P_{RH2}(t), \quad (D.98)$$

$$\Delta P_{m1}(t) = F_{HP1} \Delta P_{CH1}(t) + F_{IP1} \Delta P_{RH1}(t) + F_{LP1} \Delta P_{CO1}(t), \quad (D.99)$$

$$\Delta P_{m2}(t) = F_{HP2} \Delta P_{CH2}(t) + F_{IP2} \Delta P_{RH2}(t) + F_{LP2} \Delta P_{CO2}(t). \quad (D.100)$$

$$\dot{\Delta f}_1(t) = -\frac{1}{T_{ps1}} \Delta f_1(t) + \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} \left(\Delta P_{m1}(t) - \Delta P_{L1}(t) - \Delta P_{tie}(t) \right), \quad (D.101)$$

$$\dot{\Delta f}_2(t) = -\frac{1}{T_{ps2}} \Delta f_2(t) + \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} \left(\Delta P_{m2}(t) - \Delta P_{L2}(t) + a_{12} \Delta P_{tie}(t) \right), \quad (D.102)$$

$$\dot{\Delta T}_c(t) = -\frac{1}{T_{TCSC}} \Delta T_c(t) + \frac{K_{TCSC}}{T_{TCSC}} \Delta P_{tie}(t), \quad (D.103)$$

$$\dot{\Delta P}_{tie}(t) = \frac{2\pi T_{12}}{(1 - T_c^0)} (\Delta f_1(t) - \Delta f_2(t)) + \frac{J_{12}}{(1 - T_c^0)^2} \dot{\Delta T}_c(t). \quad (D.104)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \int ACE_1 dt \\ \Delta P_{g1} \\ \Delta P_{rh1} \\ \Delta P_{co1} \\ \Delta P_{ch1} \\ \Delta f_2 \\ \int ACE_2 dt \\ \Delta P_{g2} \\ \Delta P_{rh2} \\ \Delta P_{co2} \\ \Delta P_{ch2} \\ \Delta P_{tie,I} \\ x_{TCSC} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix}. \quad (D.105)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{ps1}} & 0 & 0 & \frac{k_{ps1b}}{T_{ps1}} & \frac{k_{ps1c}}{T_{ps1}} & \frac{k_{ps1a}}{T_{ps1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_{ps1}}{T_{ps1}} & -\frac{k_{ps1}}{T_{ps1}} \left(\frac{J_{12}}{(1-T_c^0)^2} \right) \\ B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \left(\frac{J_{12}}{(1-T_c^0)^2} \right) \\ -\frac{k_{p1}B_1}{R_1T_g} & \frac{k_{i1}}{T_g} & -\frac{1}{T_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{p1}}{T_g} & \frac{k_{p1}}{T_g} \left(\frac{J_{12}}{(1-T_c^0)^2} \right) \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{rh1}} & 0 & \frac{1}{T_{rh1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{co1}} & \frac{1}{T_{co1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{ch1}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ch1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ps2}} & 0 & 0 & \frac{k_{ps2b}}{T_{ps2}} & \frac{k_{ps2c}}{T_{ps2}} & \frac{k_{ps2a}}{T_{ps2}} & \frac{k_{ps2}}{T_{ps2}} & \frac{k_{ps2}}{T_{ps2}} \left(\frac{J_{12}}{(1-T_c^0)^2} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -\left(\frac{J_{12}}{(1-T_c^0)^2} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{p2}B_2}{R_2T_g} & \frac{k_{i2}}{T_g} & -\frac{1}{T_g} & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_{p2}}{T_g} & -\frac{k_{p2}}{T_g} \left(\frac{J_{12}}{(1-T_c^0)^2} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{rh2}} & 0 & \frac{1}{T_{rh2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{co2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ch2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ch2}} & 0 & 0 \\ \frac{2\pi T_{12}}{(1-T_c^0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2\pi T_{12}}{(1-T_c^0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{TCSC}}{T_{TCSC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (\text{D.106})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{k_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_{ps2}}{T_{ps2}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{D.107})$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{D.108})$$

D.6. Modelos de dos Áreas con HVDC

En este caso se modela el mismo sistema multiarea simétrico, con controlador PI, con la diferencia de que en el enlace de conexión entre Área 1 y Área 2 se integra a la configuración de un dispositivo de Corriente Directa en alto Voltaje (HVDC), este se puede ver en el Diagrama de la Figura ?? El enlace HVDC usa convertidores para transformar la Corriente Alterna en Corriente Directa, y una vez esta en Corriente Directa el flujo de potencia es controlable de forma electrónica. Las ecuaciones de estado de este modelo son:

$$ACE_1(t) = \beta_1 \Delta f_1(t) + \Delta P_{tie}(t) + \Delta P_{dc}(t), \quad (D.109)$$

$$ACE_2(t) = \beta_2 \Delta f_2(t) - a_{12}(\Delta P_{tie}(t) + \Delta P_{dc}(t)), \quad (D.110)$$

$$\dot{x}_{I1}(t) = ACE_1(t), \quad (D.111)$$

$$\dot{x}_{I2}(t) = ACE_2(t). \quad (D.112)$$

$$\dot{\Delta P}_{G1}(t) = -\frac{1}{T_{g1}} \Delta P_{G1}(t) + \frac{1}{T_{g1}} \left[K_{P1} ACE_1(t) + K_{I1} x_{I1}(t) - \frac{1}{R_1} \Delta f_1(t) \right], \quad (D.113)$$

$$\dot{\Delta P}_{G2}(t) = -\frac{1}{T_{g2}} \Delta P_{G2}(t) + \frac{1}{T_{g2}} \left[K_{P2} ACE_2(t) + K_{I2} x_{I2}(t) - \frac{1}{R_2} \Delta f_2(t) \right], \quad (D.114)$$

$$\dot{\Delta P}_{CH1}(t) = -\frac{1}{T_{ch1}} \Delta P_{CH1}(t) + \frac{1}{T_{ch1}} \Delta P_{G1}(t), \quad (D.115)$$

$$\dot{\Delta P}_{RH1}(t) = -\frac{1}{T_{rh1}} \Delta P_{RH1}(t) + \frac{1}{T_{rh1}} \Delta P_{CH1}(t), \quad (D.116)$$

$$\dot{\Delta P}_{CO1}(t) = -\frac{1}{T_{co1}} \Delta P_{CO1}(t) + \frac{1}{T_{co1}} \Delta P_{RH1}(t), \quad (D.117)$$

$$\dot{\Delta P}_{CH2}(t) = -\frac{1}{T_{ch2}} \Delta P_{CH2}(t) + \frac{1}{T_{ch2}} \Delta P_{G2}(t), \quad (D.118)$$

$$\dot{\Delta P}_{RH2}(t) = -\frac{1}{T_{rh2}} \Delta P_{RH2}(t) + \frac{1}{T_{rh2}} \Delta P_{CH2}(t), \quad (D.119)$$

$$\dot{\Delta P}_{CO2}(t) = -\frac{1}{T_{co2}} \Delta P_{CO2}(t) + \frac{1}{T_{co2}} \Delta P_{RH2}(t), \quad (D.120)$$

$$\Delta P_{m1}(t) = F_{HP1} \Delta P_{CH1}(t) + F_{IP1} \Delta P_{RH1}(t) + F_{LP1} \Delta P_{CO1}(t), \quad (D.121)$$

$$\Delta P_{m2}(t) = F_{HP2} \Delta P_{CH2}(t) + F_{IP2} \Delta P_{RH2}(t) + F_{LP2} \Delta P_{CO2}(t), \quad (D.122)$$

$$\dot{\Delta f}_1(t) = -\frac{1}{T_{ps1}} \Delta f_1(t) + \frac{K_{ps1}}{T_{ps1}} \left(\Delta P_{m1}(t) - \Delta P_{L1}(t) - \Delta P_{tie}(t) - \Delta P_{dc}(t) \right), \quad (\text{D.123})$$

$$\dot{\Delta f}_2(t) = -\frac{1}{T_{ps2}} \Delta f_2(t) + \frac{K_{ps2}}{T_{ps2}} \left(\Delta P_{m2}(t) - \Delta P_{L2}(t) + a_{12} \Delta P_{tie}(t) + a_{12} \Delta P_{dc}(t) \right), \quad (\text{D.124})$$

$$\dot{\Delta P}_{tie}(t) = 2\pi T_{12} (\Delta f_1(t) - \Delta f_2(t)). \quad (\text{D.125})$$

$$\dot{\Delta P}_{dc}(t) = -\frac{1}{T_{dc}} \Delta P_{dc}(t) + \frac{K_{dc}}{T_{dc}} (\Delta f_1(t) - \Delta f_2(t)). \quad (\text{D.126})$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \int ACE_1 dt \\ \Delta P_{g1} \\ \Delta P_{rh1} \\ \Delta P_{co1} \\ \Delta P_{ch1} \\ \Delta f_2 \\ \int ACE_2 dt \\ \Delta P_{g2} \\ \Delta P_{rh2} \\ \Delta P_{co2} \\ \Delta P_{ch2} \\ \Delta P_{tie} \\ \Delta P_{dc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{tie} \end{bmatrix}. \quad (\text{D.127})$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
-\frac{1}{T_{ps1}} & 0 & 0 & \frac{k_{ps1b}}{T_{ps1}} & \frac{k_{ps1c}}{T_{ps1}} & \frac{k_{ps1a}}{T_{ps1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_{ps1}}{T_{ps1}} & -\frac{k_{ps1}}{T_{ps1}} \\
\beta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
-\frac{k_{p1}\beta_1}{R_1 T_{g1}} & \frac{k_{i1}}{T_{g1}} & -\frac{1}{T_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{p1}}{T_{g1}} & \frac{k_{p1}}{T_{g1}} \\
0 & 0 & -\frac{1}{T_{rh1}} & 0 & \frac{1}{T_{rh1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{co1}} & \frac{1}{T_{co1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{1}{T_{ch1}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ch1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ps2}} & 0 & 0 & \frac{k_{ps2b}}{T_{ps2}} & \frac{k_{ps2c}}{T_{ps2}} & \frac{k_{ps2a}}{T_{ps2}} & \frac{k_{ps2}}{T_{ps2}} & \frac{k_{ps2}}{T_{ps2}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{12} & -a_{12} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_{p2}\beta_2}{R_2 T_{g2}} & \frac{k_{i2}}{T_{g2}} & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_{p2}a_{12}}{T_{g2}} & -\frac{k_{p2}a_{12}}{T_{g2}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{rh2}} & 0 & \frac{1}{T_{rh2}} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{co2}} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ch2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ch2}} & 0 & 0 \\
2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{K_{dc}}{T_{dc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{dc}}{T_{dc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{dc}}
\end{bmatrix} \quad (D.128)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix}
-\frac{k_{ps1}}{T_{ps1}} & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & -\frac{k_{ps2}}{T_{ps2}} \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0
\end{bmatrix}. \quad (D.129)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0
\end{bmatrix} \quad (D.130)$$

Bibliografía

- [1] Prabha Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [2] Rolf Grünbaum, Mojtaba Noroozian y Björn Thorvaldsson. “FACTS – powerful systems for flexible power transmission”. En: *ABB Review* 5 (1999), págs. 4-17.
- [3] Dillip Kumar Mishra et al. *Power System Frequency Control*. Elsevier, 2023.
- [4] K. R. Padiyar. *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*. New Age International Publishers, 2007. ISBN: 81-7800-186-1.
- [5] Saurabh Chanana y Saurabh Kumar. “Load Frequency Control of HVDC Link Interconnected Power System Using Genetic Algorithm”. En: *MENDEL* 25.1 (2019), págs. 131-138. DOI: 10.13164/mendel.2019.1.131.
- [6] Jan Machowski et al. *Power System Dynamics: Stability and Control*. John Wiley & Sons, 2020.
- [7] Paul M. Anderson y A. A. Fouad. *Power System Control and Stability*. Wiley-IEEE Press, 2003.
- [8] *IEEE Recommended Definitions of Terms for Automatic Generation Control on Electric Power Systems*. Revision of IEEE Std 94-1970. 1991.
- [9] North American Electric Reliability Corporation. *Control Performance Standards*. Inf. téc. Available online at NERC. Atlanta, GA, USA: NERC, 2019.
- [10] European Commission. *Commission Regulation (EU) 2016/1447 establishing a network code on requirements for generators*. Official Journal of the European Union, L241. 2016.
- [11] Secretaría de Energía. *Bases del Mercado Eléctrico*. Diario Oficial de la Federación. Publicado el 8 de septiembre de 2015. 2015.
- [12] Comisión Reguladora de Energía. *Disposiciones Administrativas de Carácter General que establecen el Código de Red*. Diario Oficial de la Federación. Resolución RES/151/2016, publicada el 8 de abril de 2016. 2016.
- [13] N. Jaleeli et al. “Understanding Automatic Generation Control”. En: *IEEE Transactions on Power Systems* 7.3 (1992), págs. 1106-1122. DOI: 10.1109/59.207324.
- [14] N. G. Hingorani y L. Gyugyi. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 2000.
- [15] M. S. Aslam, M. A. Sattar e I. J. Nagrath. “Load Frequency Control of Multi-Area Power System Using FACTS Devices”. En: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 99 (2018), págs. 456-470. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.12.012.

- [16] Debasish Mondal, Abhijit Chakrabarti y Aparajita Sengupta. “Optimal Tuning of PSS and TCSC Controllers in a Multimachine Power Systems Using PSO Algorithm”. En: *International Journal of Engineering Research & Industrial Applications (IJERIA)* 3.3 (ago. de 2010), págs. 259-276. ISSN: 0974-1518.
- [17] ENTSO-E. *HVDC Utilisation and Availability Statistics 2024*. Inf. téc. Published 30 June 2025. European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), jun. de 2025.
- [18] Secretaría de Energía. *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2020–2034*. PRODESEN. 2020.
- [19] Secretaría de Energía. *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024–2038. Anexos*. PRODESEN. 2024.
- [20] Yan Li et al. “Engineering Practices for the Integration of Large-Scale Renewable Energy VSC-HVDC Systems”. En: *Global Energy Interconnection* 3.2 (abr. de 2020), págs. 149-157.
- [21] M. Cavus. “Advancing Power Systems with Renewable Energy and Intelligent Technologies: A Comprehensive Review on Grid Transformation and Integration”. En: *Electronics* 14.6 (2025), pág. 1159. DOI: 10.3390/electronics14061159.
- [22] Muhammad Shahzad Nazir et al. “Integrating FACTS technologies into renewable energy systems: potential and challenges”. En: *International Journal of Ambient Energy* 45.1 (2024), pág. 2409827. DOI: 10.1080/01430750.2024.2409827.
- [23] Katsuhiko Ogata. *Modern control engineering*. Ene. de 2010, pág. 894. ISBN: 9780136156734.
- [24] Rodrigo Ojeda Sesma. *Estabilidad de frecuencia en sistemas de baja inercia*. 2024.
- [25] Omar Zavala Mendoza. *Simulador para el análisis de control de frecuencia en sistemas eléctricos*. 2003.
- [26] C. Ohler. “The physics of power systems operation”. En: *EPJ Web of Conferences* 98 (2015), pág. 03002. DOI: 10.1051/epjconf/20159803002.
- [27] Electric Machinery Committee. “IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Parameter Verification with Applications in Power System Stability Analyses”. En: *IEEE* (2020). DOI: 10.1109/ieeestd.2020.9020274.
- [28] D. P. Kothari e I. J. Nagrath. *Modern Power System Analysis*. Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- [29] John Grainger y William D. Stevenson. *Power System Analysis*. McGraw-Hill, 1994.

Daniela María Carrillo Gutiérrez

Regulación de Frecuencia por medio de Controladores de Dispositivos Electrónicos de Potencia, HVDC y FACTS.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:561556737

Fecha de entrega

27 feb 2026, 8:10 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

27 feb 2026, 8:14 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Regulación de Frecuencia por medio de Controladores de Dispositivos Electrónicos de Potencia,pdf

Tamaño del archivo

6.5 MB

118 páginas

37.743 palabras

181.347 caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
599 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

• Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo. • Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias. • Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento. • Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica	
Título del trabajo	Regulación de Frecuencia por medio de Controladores de Dispositivos Electrónicos de Potencia, HVDC y FACTS	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Daniela María Carrillo Gutiérrez	1614428x@umich.mx
Director	Claudio R. Fuerte Esquivel	claudio.fuerte@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Norberto García Barriga	norberto.garcia@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Consulta de sinónimos y conectores

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Sí	Revisión en depuración de repeticiones y muletillas
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	Sí	Consulta de títulos para búsquedas de artículos, libros o documentos relacionados al tema.
Formateo de las referencias bibliográficas	Sí	Ajuste de las referencias
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	