

**HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL MODELADO Y
SIMULACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE TENSION ANTE
GRANDES PERTURBACIONES. DISEÑO Y ELABORACIÓN.**

LIZETTE PAOLA MEJÍA HURTADO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

**HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL MODELADO Y
SIMULACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA
PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN ANTE
GRANDES PERTURBACIONES. DISEÑO Y ELABORACIÓN.**

LIZETTE PAOLA MEJÍA HURTADO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Electricista

Director

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Doctor Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

A Dios

A mi hijo Juan Felipe

A mis padres Juan y Clara

A mis tias y tios

A la memoria de mis abuelas Dora y Juana

AGRADECIMIENTOS

Quiero extender mis agradecimientos a las siguientes personas:

Al Dr. Hermann Raúl Vargas, director del proyecto, quien desde el primer momento me brindó su ayuda y siempre estuvo presente para darme la orientación necesaria en forma precisa y oportuna.

Al Ing. Carlos Rodríguez, cuya orientación y colaboración fue vital para la elaboración de este trabajo de grado.

A todos los miembros de mi familia, en especial a mis padres y a mis tios, a mis amigos y al Ing. Glayder Viloría.

RESUMEN

TÍTULO: HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN ANTE GRANDES PERTURBACIONES: DISEÑO Y ELABORACIÓN*

AUTOR: LIZETTE PAOLA MEJÍA HURTADO**

PALABRAS CLAVES: Estabilidad de Tensión, Gran Perturbación, Paquete de computador, MATLAB.

DESCRIPCIÓN:

La estabilidad de sistemas eléctricos de potencia es definida como la propiedad del sistema de potencia que posibilita mantener un estado de operación de equilibrio bajo condiciones normales de operación y retornar a un estado aceptable de equilibrio después de someterse a una perturbación. Con el fin de facilitar y hacer práctico su análisis, la estabilidad se divide en diversas categorías: estabilidad de ángulo, estabilidad de tensión, estabilidad de mediano plazo y estabilidad a largo plazo. A su vez, estas categorías se dividen en subcategorías. La estabilidad de tensión a gran perturbación es la capacidad que tiene un sistema para mantener tensiones estables al ser expuesto a disturbios grandes como fallas del sistema, pérdida de generación o contingencias del circuito.

Los paquetes de computador son las herramientas más utilizadas en estudios de estabilidad. Este proyecto tiene como fin la elaboración de un conjunto de funciones MATLAB para ser incluidas en la Herramienta Software para el Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación de Sistemas Eléctricos de Potencia (HAGP). En este trabajo se diseñaron y elaboraron en MATLAB los modelos de los siguientes elementos del sistema de potencia: el motor de inducción, el transformador con cambia tap bajo carga (ULTC), la carga controlada por termostato, el compensador de potencia reactiva (SVC) y un modelo genérico de carga.

*Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Hermann Raúl Vargas Torres.

ABSTRACT

TITLE: COMPUTER PROGRAM FOR THE MODELING AND SIMULATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS FOR VOLTAGE STABILITY STUDIES UNDER LARGE DISTURBANCES: DESIGN AND DEVELOPMENT*

AUTHOR: LIZETTE PAOLA MEJÍA HURTADO**

KEY WORDS: Power Systems, Voltage Stability, Large Disturbance, Computer Program, MATLAB.

DESCRIPTION:

Power system stability may be defined as that property of a power system that enables it to remain in a state of operating equilibrium under normal operating conditions and to regain an acceptable state or equilibrium after being subjected to a disturbance. For purposes of analysis, it is useful to classify stability into several categories: rotor angle stability, voltage stability, mid term and long term stability. These categories are divided into subcategories depending on the severity of the disturbance. Large-disturbance voltage stability is concerned with a system's ability to control voltages following large disturbances such as system faults, loss of generation, or contingencies. This ability is determined by the system-load characteristics, continuous and discrete controls. Determination of large-disturbance stability requires the examination of the nonlinear dynamic performance of a system over a period of time sufficient to capture the interactions

Computer programs are the analytical tools utilized in the study of power system stability. The objective of degree project is to develop MATLAB functions to incorporate into computer program for stability studies under large disturbance (HAGP). The developed models for different components of the power system are: induction motor, under-load tap changing (ULTC), thermostatically controlled load, static var compensator (SVC) and multiplicative generic load model.

*Degree Project

**School of Electrical Engineering, Hermann Raúl Vargas Torres.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del tema	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organización de la memoria	4
2. La estabilidad de tensión de los sistemas eléctricos de potencia	5
2.1. Introducción	5
2.2. El fenómeno de estabilidad del sistema eléctrico de potencia	5
2.3. Marco histórico y actual de estabilidad de sistemas de potencia	6
2.4. El fenómeno de estabilidad de tensión	7
2.4.1. Distinción entre estabilidad de tensión y estabilidad de ángulo	8
2.5. Métodos para el análisis de estabilidad de tensión	9
2.5.1. Curvas PV y curvas QV	9
2.5.2. Métodos analíticos	9
2.5.3. Métodos de sensibilidad y de índice	10
2.5.4. Simulaciones en el dominio del tiempo	10
2.6. Definiciones de estabilidad y colapso de tensión	10
2.7. Conceptos básicos de estabilidad de tensión	11
2.8. Clasificación de la estabilidad de tensión	14
2.8.1. Estabilidad de tensión ante pequeña perturbación	14

2.8.2. Estabilidad de tensión ante gran perturbación 15

2.8.3. Estabilidad de tensión de corto plazo 15

2.8.4. Estabilidad de tensión de largo plazo 15

2.9. Escenario de colapso de tensión 16

2.10. El análisis dinámico de estabilidad 17

3. Modelos para el estudio de estabilidad de tensión de sistemas eléctricos de potencia 20

3.1. Introducción 20

3.2. Motor de inducción 20

 3.2.1. Principios básicos de operación 21

 3.2.2. Ecuaciones básicas de una máquina de inducción en coordenadas fijas 22

 3.2.3. La transformación de dqo 24

 3.2.4. Ecuaciones en coordenadas que giran a velocidad síncrona . . . 25

 3.2.5. Sistema por unidad 26

 3.2.6. Representación en estudios de estabilidad 27

 3.2.7. Modelo de estado estable del motor de inducción 30

3.3. Cargas con restauración termostática 32

3.4. Transformador con cambia tap bajo carga (ULTC) 35

 3.4.1. Modelo del sistema de control del ULTC 36

3.5. El compensador estático de potencia reactiva (SVC) 39

 3.5.1. Representación del SVC en flujo de carga 41

 3.5.2. Modelo dinámico del SVC 42

3.6. Modelos genéricos de cargas 43

 3.6.1. Modelo genérico multiplicativo de carga 44

 3.6.2. Modelo genérico aditivo de carga 45

4. Metodología para la simulación	46
4.1. Introducción	46
4.2. Inicialización de modelos dinámicos	46
4.2.1. Inicialización de la carga controlada por termostato	46
4.2.2. Inicialización del motor de inducción	47
4.2.3. Inicialización del SVC	49
4.2.4. Inicialización del modelo multiplicativo de carga	49
4.3. Simulación dinámica	50
4.4. Sistema de ecuaciones del motor de inducción	53
4.5. Sistema de ecuaciones de la carga controlada por termostato	57
4.6. Sistema de ecuaciones del compensador estático de reactiva	59
4.7. Sistema de ecuaciones del modelo multiplicativo de carga	62
4.8. Simulación del ULTC	65
4.8.1. Reflejo del tap del ULTC en la matriz \mathbf{Y}_{barra}	65
5. Resultados numéricos	68
5.1. Introducción	68
5.2. Herramientas computacionales	68
5.2.1. El paquete HAGP	68
5.2.2. El paquete SIMPOW	69
5.2.3. El paquete SIMULINK	70
5.3. Ejemplos implementados en HAGP	70
5.3.1. Ejemplo caso 1	70
5.3.2. Ejemplo caso 2	72
5.3.3. Ejemplo caso 3	79
5.3.4. Ejemplo caso 4	82
5.3.5. Ejemplo caso 5	86

ÍNDICE GENERAL	IV
6. Conclusiones, aportes y sugerencias	97
6.1. Resumen y conclusiones	97
6.2. Aportes originales	98
6.3. Sugerencias para posteriores desarrollos	99
Bibliografía	100
A. Demostración de las expresiones enunciadas en el capítulo 4	102
A.1. Las corrientes de estator del motor de inducción	102
A.2. Derivadas del motor de inducción	104
A.3. Las corrientes inyectadas de las cargas con restauración termostática . .	105
A.4. Las corrientes inyectadas del SVC	106
A.5. Las corrientes inyectadas del modelo multiplicativo de carga	107
B. Algoritmo del sistema de control del ULTC	109
C. Modelos dinámicos en SIMULINK	127
C.1. Ejemplo caso 1	127
C.2. Ejemplo caso 2 y 3	132
D. Manual del Usuario	146
D.1. Introducción	146
D.2. Instalación y ejecución del HAGP modificado	146
D.3. Datos de entrada	151
D.4. Recomendaciones y observaciones	154

Índice de figuras

2.1. Sistema radial simple	11
2.2. Curvas P-V para diferentes factores de potencia	13
3.1. Circuitos del motor de inducción	22
3.2. Circuito transitorio del motor de inducción	29
3.3. Circuito equivalente de estado estacionario de la máquina de inducción .	30
3.4. a) Circuito equivalente visto desde BB' b) Circuito equivalente visto desde AA'	31
3.5. Un modelo real para cargas con restauración termostática	33
3.6. Diagrama detallado de reactancias del transformador	35
3.7. Circuito equivalente π del transformador	36
3.8. Diagrama de bloques funcional del sistema de control del ULTC	37
3.9. Diagrama de bloques del sistema de control del ULTC para estudios de estabilidad.	37
3.10. Estructura común para el SVC	40
3.11. Característica de estado estacionario del SVC	41
3.12. Modos de operación del SVC	41
3.13. Modelo dinámico del SVC	42
3.14. Modelo dinámico del SVC	42
4.1. Diagrama de flujo simplificado del HAGP	66

5.1. Sistema caso 1	70
5.2. Tensión en la barra 3, ejemplo caso1 a) HAGP b) Simulink	73
5.3. Velocidad del rotor, ejemplo caso1 a) HAGP b) Simulink	74
5.4. Potencia activa inyectada en la barra 3, ejemplo caso1 a) HAGP b) Simulink	75
5.5. Sistema caso 2	76
5.6. Tensión en la barra 3, ejemplo caso 2 a) HAGP b) Simulink	77
5.7. Conductancia, ejemplo caso 2 a) HAGP b) Simulink	78
5.8. Tensión en la barra 3, ejemplo caso 3 a) HAGP b) Simulink	80
5.9. Posición del tap, ejemplo caso 3 a) HAGP b) Simulink	81
5.10. Sistema ejemplo del caso 4	82
5.11. Tensión en la barra 8 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Tensión de excitación constante.	87
5.12. Tensión en la barra 7 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Tensión de excitación constante.	88
5.13. Tensión en la barra 9 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Tensión de excitación constante.	89
5.14. a) Tensión en la barra 7. b) Tensión en la barra 8. c) Tensión en la barra 9. Ejemplo caso 4 sin SVC. Excitador tipo DC1A.	90
5.15. Tensión en la barra 8 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Excitador tipo DC1A.	91
5.16. Tensión en la barra 7 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Excitador tipo DC1A.	92
5.17. Tensión en la barra 9 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Excitador tipo DC1A.	93
5.18. Sistema caso 5	94
5.19. Tensión en la barra 2 con HAGP. Ejemplo caso 5	95
5.20. Demanda de potencias en la barra 2 con HAGP. Ejemplo caso 5	95

5.21. Potencias demandada de carga genérica ante una caída de tensión [Cutsem y Vournas, 2001]	96
B.1. Diagrama de flujo ULTC	110
B.2. Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap.	111
B.3. Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap. Continuación. . .	112
B.4. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap.	113
B.5. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap. Continuación.	114
B.6. Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap con efecto de histéresis.	115
B.7. Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap con efecto de histéresis. Continuación.	116
B.8. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap con efecto de histéresis.	117
B.9. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap con efecto de histéresis. Continuación.	118
B.10. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap con efecto de histéresis. Continuación.	119
B.11. Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico.	120
B.12. Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico. Continuación.	121
B.13. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico.	122
B.14. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico. Continuación.	123
B.15. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico. Diagrama de flujo ULTC.	124
B.16. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el efecto de histéresis y el retardo mecánico.	125

B.17. Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el efecto de histéresis y el retardo mecánico.	126
C.1. Sistema caso 1	128
C.2. Diagrama en SIMULINK del sistema caso 1	128
C.3. Diagrama interno en SIMULINK del sistema equivalente del caso 1	129
C.4. Diagrama interno del rotor del motor de inducción	130
C.5. Diagrama interno del estator de inducción	131
C.6. constantes.m	132
C.7. rotorind.m	133
C.8. rotorind.m continuación	134
C.9. cinic.m	135
C.10. Sistema caso 2 y 3	136
C.11. Diagrama en SIMULINK del sistema caso 2 y 3	137
C.12. Diagrama de bloques en SIMULINK de la carga controlada por termostato	137
C.13. Diagrama en SIMULINK del ULTC	138
C.14. sistrafo.m	139
C.15. sistrafo.m continuación	140
C.16. mederror.m	141
C.17. retrasador.m	142
C.18. retrasador.m continuación	143
C.19. Tomas.m	144
C.20. Tomas.m continuación	145
D.1. Pantalla de entrada	147
D.2. Pantalla de salida	148
D.3. Resultados para la barra con carga controlada por termostato	149

D.4. Resultados de barra con motor de inducción 149

D.5. Pantalla de salida para el ULTC 150

D.6. Resultados por ULTC 150

Lista de tablas

5.1. Líneas de Transmisión (500 MVA)	71
5.2. Transformadores (500 MVA)	71
5.3. Condensadores en paralelo	71
5.4. Parámetros del motor de inducción (500 MVA)	71
5.5. Líneas de Transmisión (1000 MVA)	72
5.6. Transformadores (1000 MVA)	72
5.7. Parámetros de la carga controlada por termostato	76
5.8. Parámetros del SVC	82
5.9. Parámetros de los generadores del ejemplo caso SVC	83
5.10. Condición operativa inicial	84
5.11. Datos de carga	84
5.12. Condensadores en paralelo	84
5.13. Parámetros del sistema de excitación DC1A	85
5.14. Líneas de Transmisión (1000 MVA)	86
5.15. Parámetros de carga	86

Lista de símbolos

A_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones dinámicas con respecto variables de estado
B_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones dinámicas con respecto a tensiones
C_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones de red con respecto a variables de estado
Y_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones de red con respecto a tensiones
F	Vector de ecuaciones dinámicas
G	Vector de ecuaciones de red
J	Jacobiano
Y	Matriz de admitancias de la red del sistema. Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones de red con respecto a tensiones
f	vector de derivadas de las variables de estado del sistema
i	Vector de corrientes del sistema
v	Vector de tensiones del sistema
x	Vector de estado del sistema
y	Vector de estado
\vec{V}	Fasor de tensión de barra
\vec{I}	Fasor de corriente de barra
H	Constante de inercia

I	Magnitud de fasor de corriente de barra
I_I	Componente imaginaria de fasor de corriente de barra
Y	Admitancia
I_R	Componente real de fasor de corriente de barra
K	Ganancia
K_D	Coefficiente de torque amortiguante
L	Inductancia
P	Potencia activa
Q	Potencia reactiva
R	Resistencia
T	Par
V	Magnitud de fasor de tensión
V_m	Valor pico de onda de tensión
V_I	Componente imaginaria de fasor de tensión de barra
V_R	Componente real de fasor de tensión de barra
V_{Rmax}	Tensión límite máxima del regulador
V_{Rmin}	Tensión límite mínima del regulador
X	Reactancia
i	Corriente instantánea
l	Inductancia variante con el tiempo
$p = \frac{d}{dt}$	Derivada con respecto del tiempo
p_f	Número de polos magnéticos del rotor
s	Deslizamiento del rotor
t	Tiempo
x	Variable cualquiera
a, b, c (subíndice)	Denota cantidades de las fases del estator
A, B, C (subíndice)	Denota cantidades de las fases del rotor
$base$ (subíndice)	Denota cantidades base
d (subíndice)	Denota cantidades de eje directo
m (subíndice)	Denota cantidades mecánicas
o (subíndice)	Denota valores nominales
q (subíndice)	Denota cantidades del eje en cuadratura
s (subíndice)	Denota cantidades del estator
r (subíndice)	Denota cantidades del rotor

t (subíndice)	Denota cantidades en terminales del generador
max (subíndice)	Denota cantidades de valor máximo
mn (subíndice)	Denota cantidades de valor mínimo
0 (subíndice)	Denota valores iniciales
ref (subíndice)	Denota cantidades de referencia
R (subíndice)	Denota el valor de la componente real
I (subíndice)	Denota el valor de la componente imaginaria
err (subíndice)	Denota valores de error
k (superíndice)	Denota k -ésima iteración del Método de Newton
' (superíndice)	Denota cantidades transitorias
T	Matriz de transformación de marco de referencia
Δ	Incremento
τ	Temperatura
Θ	Ángulo del rotor medido con respecto a una referencia fija en el estator
Π	Productorio
Σ	Sumatorio
π	pi
φ	Ángulo de desfasaje de onda de tensión
Ψ	Flujo de acoplamiento inductivo
n	Posición del tap del transformador
D	Ancho de banda muerta del ULTC
ε	Histéresis en el ULTC
T_D	Tiempo de retardo para el movimiento del tap del ULTC
Δn	Paso del tap del ULTC
n_{ant}	Valor de la posición del tap anterior a la actual
G	Conductancia de carga
B	Susceptancia de carga
K	Constante
v_2, v_3	VARIABLES DE ESTADO DEL SVC
B_C	Susceptancia capacitiva
B_L	Susceptancia inductiva
B_{max}	Susceptancia máxima

B_{min}	Susceptancia mínima
B_{SVC}	Susceptancia del SVC
ω	Velocidad o frecuencia angular
Z_P	Variable de estado asociada a la característica dinámica de la potencia activa
Z_Q	Variable de estado asociada a la característica dinámica de la potencia reactiva
α_t	Exponente transitorio de carga asociado a la potencia activa
β_t	Exponente transitorio de carga asociado a la potencia reactiva
α_s	Exponente estacionario de carga asociado a la potencia activa
β_s	Exponente estacionario de carga asociado a la potencia reactiva
T_P	Constante de tiempo de carga asociado a la potencia activa
T_Q	Constante de tiempo de carga asociado a la potencia reactiva
X_d	Reactancia síncrona de eje directo de la máquina síncrona
X'_d	Reactancia transitoria de eje directo de la máquina síncrona
X''_d	Reactancia subtransitoria de eje directo de la máquina síncrona
T'_{do}	Constante de tiempo del transitorio en circuito abierto de eje directo de la máquina síncrona
T''_{do}	Constante de tiempo del subtransitorio en circuito abierto de la máquina síncrona
X_q	Reactancia síncrona de eje en cuadratura de la máquina síncrona
X'_q	Reactancia transitoria de eje en cuadratura de la máquina síncrona
X''_q	Reactancia subtransitoria de eje en cuadratura de la máquina síncrona

T'_{qo}	Constante de tiempo del subtransitorio en circuito abierto de eje en cuadratura de la máquina síncrona
T''_{qo}	Constante de tiempo del subtransitorio en circuito abierto de eje en cuadratura de la máquina síncrona
A_{sat}	Constante de saturación de la máquina síncrona
B_{sat}	Constante de saturación de la máquina síncrona
Ψ_{f1}	Constante de saturación de la máquina síncrona
Ψ_{f2}	Constante de saturación de la máquina síncrona
H	Constante de inercia
K_D	Coefficiente de torque amortiguante de la máquina síncrona
X_l	Reactancia de dispersión de estator de la máquina síncrona

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del tema

Actualmente, al hablar del funcionamiento adecuado o aceptable de sistemas eléctricos de potencia (conjunto de generación, transmisión y cargas) es necesario mencionar el fenómeno de estabilidad, cuya temática comprende el comportamiento del sistema ante un cambio pequeño o grande en su configuración conocido como perturbación.

La estabilidad de sistemas eléctricos de potencia es definida como la propiedad del sistema de potencia que hace posible mantener un estado de operación de equilibrio bajo condiciones normales de operación y retornar a un estado estacionario aceptable después de someterse a una perturbación.

La estabilidad de tensión es una de las diversas categorías en la que se divide el estudio de estabilidad de un sistema eléctrico de potencia, con el fin de facilitar y hacer práctico su análisis. La estabilidad de tensión tiene que ver con la capacidad que tiene un sistema de potencia de conservar tensiones aceptables en todas sus barras ante cualquier eventualidad [Cutsem y Vournas, 2001]. El análisis de gran perturbación estudia la respuesta del sistema ante la ocurrencia de perturbaciones severas y repentinas tales como cortocircuitos, pérdida de generación y pérdida de carga.

Un sistema entra en un estado de inestabilidad de tensión cuando una situación causa un progresivo e incontrolable descenso de tensión. Uno de los factores que la causa es la incapacidad del sistema de potencia para suministrar la demanda de potencia reactiva. Si una perturbación conduce al colapso de tensión es fundamentalmente por una debilidad inherente en el sistema de potencia [Kundur, 1994].

Por muchos años la estabilidad de ángulo, otra de las categorías del estudio de estabilidad, fue la principal preocupación en el análisis del sistema de potencia. Más sin embargo en las últimas décadas, debido al incremento en instalaciones de generación, transmisión y carga, los sistemas de potencia se tornan cada vez más complejos y el estudio de estabilidad de tensión es cada vez un tópico de mayor interés.

Tradicionalmente el análisis de gran perturbación se ha realizado fuera de línea a través de herramientas software, con el propósito de estudiar la respuesta del sistema a contingencias específicas y determinar la capacidad de éste de amortiguar las oscilaciones y alcanzar un estado de operación aceptable. Estos estudios se llevan a cabo generalmente sólo en las fases de planeación o expansión con el propósito de garantizar que el sistema sea lo suficientemente robusto. También se han utilizado para entrenamiento de operadores con el fin de tener una visión general de la evolución del sistema cuando está sujeto a perturbaciones y tomar las medidas necesarias para aminorar los efectos de estas y evitar un posible colapso general. Debido a esta situación es necesario desarrollar herramientas de análisis que incluyan modelos de dispositivos que influyan en el fenómeno de estabilidad de tensión.

El tipo de análisis a abordar en el presente trabajo es el de estabilidad de tensión de gran perturbación. Este análisis examina la respuesta dinámica del sistema de potencia desde unos segundos hasta pocos minutos después de ocurrida la perturbación. Este texto expone el proyecto realizado, en el cual se diseñaron y elaboraron en MATLAB modelos de elementos de carga y control de potencia necesarios para el análisis de estabilidad de tensión. El conjunto de funciones desarrolladas durante la realización del proyecto tiene propósitos académicos, cuyo objetivo consiste en proporcionar una herramienta que permita al estudiante interesado en el fenómeno de estabilidad de tensión profundizar sus conocimientos sobre el tema y desarrollar las técnicas básicas utilizadas en la solución de problemas.

Los modelos creados se implementaron en la Herramienta Software para el Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación de Sistemas Eléctricos de Potencia (HAGP) de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander [Rodríguez, 2003]. El paquete obtenido es útil para estudiar el comportamiento de un sistema de potencia visto desde el criterio de estabilidad de tensión a gran perturbación.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo de grado es elaborar un conjunto de funciones MATLAB para ser incluidas en la herramienta software HAGP. Esto permitirá el modelado y la simulación de sistemas eléctricos de potencia para realizar estudios de estabilidad de tensiones ante grandes perturbaciones.

El logro de este objetivo general implica el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

- Obtener las expresiones matemáticas de un modelo del motor de inducción de acuerdo con un algoritmo para simulación dinámica.
- Implementar en MATLAB las ecuaciones matemáticas obtenidas del modelo del motor de inducción para estudio de estabilidad.
- Obtener las expresiones matemáticas del modelo de cargas controladas por termostato de acuerdo con un algoritmo para simulación dinámica.
- Implementar en MATLAB las ecuaciones matemáticas obtenidas del modelo de cargas controladas por termostato para estudios de estabilidad.
- Obtener las expresiones matemáticas de un modelo de compensador estático de potencia reactiva de acuerdo con un algoritmo para simulación dinámica.
- Implementar en MATLAB las ecuaciones matemáticas obtenidas del modelo de compensadores estáticos de potencia reactiva para estudios de estabilidad.
- Modelar en MATLAB el sistema de control de transformadores con cambia tap bajo carga (ULTC).
- Incluir los anteriores modelos en la Herramienta Software para el Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación de Sistemas Eléctricos de Potencia (HAGP), elaborada en MATLAB y perteneciente a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

1.3. Organización de la memoria

El texto se divide en 6 capítulos y 4 apéndices. Los capítulos contienen la temática del trabajo realizado y los apéndices contienen información adicional no necesarias para seguir la idea central del texto.

En el capítulo 2 se definen los fundamentos del problema de estabilidad de tensión, haciendo una presentación breve tanto del fenómeno como de conceptos básicos.

En el capítulo 3 se describen los modelos elaborados en la herramienta software útiles para el análisis de estabilidad de tensión de gran perturbación.

El capítulo 4 expone la metodología utilizada en la simulación dinámica, con la descripción de sus ecuaciones derivadas de los modelos implementados.

El capítulo 5 presenta los resultados numéricos obtenidos con el trabajo elaborado y los compara con los obtenidos con un paquete industrial. También incluye un pequeño análisis de tales resultados.

En el capítulo 6 se exponen las conclusiones alcanzadas y las aportaciones realizadas en esta tesis. También se presentan sugerencias para posteriores desarrollos.

Finalmente, el texto se complementa con los apéndices A, B, C y D. En el apéndice A se incluye la deducción de ecuaciones presentadas en el capítulo 4. El apéndice B expone el algoritmo detallado del sistema de control del ULTC. El apéndice C muestra los modelos en SIMULINK empleados para verificar la validez de los resultados del trabajo realizado. El apéndice D contiene el manual del usuario de los modelos implementados en el HAGP.

Capítulo 2

La estabilidad de tensión de los sistemas eléctricos de potencia

2.1. Introducción

En este capítulo se revisan los conceptos básicos asociados al fenómeno de estabilidad de tensión de sistemas eléctricos de potencia. Posteriormente se presenta el método de análisis dinámico utilizado.

2.2. El fenómeno de estabilidad del sistema eléctrico de potencia

Al encontrarse un sistema de energía eléctrica en un punto de funcionamiento estable, la estabilidad está interesada en el estudio de la capacidad del sistema de alcanzar un nuevo punto de equilibrio estable o de volver al punto de equilibrio estable original tras la ocurrencia de una perturbación.

La estabilidad es una propiedad inherente a los sistemas dinámicos, y en efecto, los sistemas eléctricos de potencia son sistemas dinámicos grandes y de alto grado de complejidad. Por lo tanto, el análisis de estabilidad de los sistemas de energía eléctrica es un problema difícil.

Los problemas de estabilidad son más complejos en la medida que crecen los sistemas eléctricos de potencia o se extienden al interconectar sistemas cada vez más distantes.

Además, la complejidad del fenómeno se ve afectada por la presencia de sistemas de control y protección cada vez más sofisticados.

Una forma de abordar la comprensión de un problema de estabilidad específico es su caracterización en términos de los siguientes criterios:

- La naturaleza del fenómeno físico involucrado: estabilidad de ángulo y estabilidad de tensiones.
- La magnitud de la perturbación: estabilidad de gran perturbación y estabilidad de pequeña perturbación.
- Las dinámicas involucradas: estabilidad de corto plazo y estabilidad de largo plazo.

Sin embargo, la mejor forma de entender la clasificación de los problemas de estabilidad es aplicarla a casos concretos.

2.3. Marco histórico y actual de estabilidad de sistemas de potencia

La primera forma conocida del problema de estabilidad aparece cuando se plantea la conexión de generadores hidráulicos a centros de consumo distantes [Expósito, 2002]. Las primeras referencias de estabilidad datan de los años veinte y se cuestiona la capacidad del generador para su funcionamiento en sincronismo tras la ocurrencia de un cortocircuito en algún punto de la red de transporte. Es decir, si el tiempo que invertían las protecciones e interruptores en despejar las fallas era superior al denominado tiempo crítico de despeje de la falla. En caso de ser superior se hacía preciso una modificación del diseño de la citada red de transporte. La instalación de protecciones e interruptores cada vez más rápidos logró reducir los tiempos de despeje.

Igualmente, la instalación de reguladores de tensión rápidos y de elevadas ganancias disminuyó los tiempos de despeje. Sin embargo, dieron lugar a una nueva forma de inestabilidad: las oscilaciones sostenidas e incluso crecientes del rotor del generador sin que mediara una perturbación severa alguna. En realidad, las oscilaciones sostenidas aparecían cuando se aumentaba la potencia generada por encima de cierto valor.

La incorporación de controles suplementarios a los reguladores de tensión, como los estabilizadores del sistema de potencia, lograron amortiguar las citadas oscilaciones.

Otra forma de estabilidad aparecida en los años 70 y 80 no está relacionada con la capacidad de los generadores de funcionar en sincronismo, sino con la capacidad del sistema de alimentar una carga a una tensión aceptable, conocida hoy día como estabilidad de tensión.

El concepto de estabilidad de tensión fue inicialmente empleado en el diseño y análisis de sistemas de control para generadores y sistemas de transmisión en corriente continua (High Voltage Direct Current, HVDC), cuyo fin era estudiar el efecto de variaciones relativamente de tensión rápidas en el control y en la estabilidad del sistema. En el caso de reguladores de tensión de generadores, los estudios de estabilidad de tensión se concentran en analizar la efectividad de estos controles para mantener las variaciones de tensión en las terminales del generador a un mínimo. El efecto que estos reguladores tienen en la estabilidad del sistema, considera la capacidad de corriente de campo y de estator del generador, es decir, la capacidad de generar potencia reactiva.

El problema de estabilidad de tensión en la actualidad es fundamentalmente distinto de cómo se veía anteriormente. Las diferencias básicas están en que ahora se analiza desde el punto de vista de estabilidad global del sistema en vez de un elemento en particular, como es el caso del regulador de tensión en un generador o los controles de un sistema de transmisión HVDC. También las escalas de tiempo empleadas para el análisis, ya que no es de interés si los transitorios de tensión son grandes o pequeños, sino si las tensiones llegan a un punto estable de operación después de diversas perturbaciones.

En Colombia se han empezado a realizar estudios de estabilidad de mediano, largo plazo y de tensión, por lo cual las unidades de planeación del sistema eléctrico han solicitado a los agentes de generación la información completa de los modelos matemáticos de los sistemas de control de tensión y velocidad, incluyendo los asociados a limitadores de subexcitación, de sobreexcitación y de relación Volts/Hertz [Ramírez y Vásquez, 2004].

2.4. El fenómeno de estabilidad de tensión

La *estabilidad de tensión* es la capacidad de un sistema de potencia de mantener tensiones aceptables en todas las barras ante la ocurrencia de perturbaciones dada una

condición de operación inicial. Depende de la habilidad de mantener o restaurar el equilibrio entre la demanda de carga y la potencia suministrada por el sistema. La inestabilidad de tensión ocurre en forma de una caída súbita o progresiva de la tensión de alguna o varias barras. El factor principal que causa la inestabilidad es la incapacidad del sistema de potencia para mantener la demanda de potencia activa y reactiva [Kundur, 1994]. Una posible consecuencia del fenómeno de inestabilidad de tensión es la pérdida de carga en un área o la salida de líneas de transmisión y otros elementos llevando a un efecto en cascada que a su vez puede conducir a la pérdida de sincronismo de algunos generadores.

El *colapso de tensión* es el proceso por el cual la secuencia de eventos acompañada de inestabilidad de tensión conduce a un perfil de tensiones bajas inaceptables en una parte significativa de un sistema eléctrico de potencia.

Los factores principales que contribuyen al colapso de tensión son:

- La fortaleza de la red de transmisión.
- Los límites de control de tensión o potencia reactiva.
- Las características de las cargas.
- Carga excesiva en el sistema.
- Balance de potencia reactiva dada por la demanda excesiva, elevada pérdida de reactivos en líneas de transmisión o generación insuficiente de reactivos.
- Variación de la carga con la tensión a través del tiempo, como es el caso de motores de inducción que se frenan por baja tensión.
- La acción de dispositivos de control de tensión tales como transformadores con cambia tap bajo carga (ULTC).
- Desempeño de equipos de compensación reactiva a bajas tensiones en el sistema.

2.4.1. Distinción entre estabilidad de tensión y estabilidad de ángulo

La estabilidad de ángulo, definida como la capacidad de los generadores de mantener el sincronismo tras la ocurrencia de una perturbación, y la estabilidad de tensión son

las dos manifestaciones más importantes del problema de estabilidad de sistemas de potencia.

La distinción entre inestabilidad de tensión e inestabilidad de ángulo no siempre es clara. A menudo, ambos tipos de inestabilidades aparecen a la vez y una conduce a la otra. En otras palabras, en sistemas que presentan problemas de estabilidad de ángulo también aparecen eventualmente problemas de estabilidad de tensión y viceversa. Sistemas que presentan un colapso de tensión conducen eventualmente a una separación angular de sus generadores.

En el caso de problemas de estabilidad de tensión, el colapso de tensión ocurre antes que la separación de ángulos, y opuesto a esto sucede en el caso de problemas de estabilidad de ángulo [Expósito, 2002]. Las razones de estos dos problemas de estabilidad son completamente distintas, debido a que la inestabilidad de tensión se debe principalmente a la ausencia total de un punto de equilibrio para la tensión después de la perturbación, mientras que la inestabilidad de ángulo se debe fundamentalmente a la ausencia de un par de sincronismo entre diversos generadores.

2.5. Métodos para el análisis de estabilidad de tensión

Los estudios de estabilidad de tensión son realizados con un número de métodos diferentes. A continuación se presentará un breve resumen de estos [M. Gustafsson, 1995].

2.5.1. Curvas PV y curvas QV

El método más básico y comúnmente utilizado y consiste en emplear las curvas teóricas PV o las curvas QV del sistema juntamente con la característica de carga. Estas curvas son también llamadas “curvas de nariz” debido a su forma característica. El punto sobre la curva de máxima potencia es llamado el “punto crítico” y en la literatura se considerada como el límite de estabilidad de tensión.

2.5.2. Métodos analíticos

Los métodos analíticos emplean modelos continuos de los componentes del sistema, y describen el sistema por medio de un conjunto de ecuaciones algébrico-diferenciales.

Estas ecuaciones se emplean para encontrar un punto de bifurcación en la solución del sistema. Los puntos de bifurcación son comunes para más de una rama de soluciones. Por tanto es posible para la solución del sistema cambiar según la rama y de ese modo el comportamiento en tal punto. Luego se pueden aplicar los métodos que utilizan los valores propios de la matriz Jacobiana para determinar como el sistema se comportará en esos puntos.

2.5.3. Métodos de sensibilidad y de índice

Otro método consiste en calcular una “distancia” al punto donde el sistema colapsará. El valor singular mínimo de la matriz Jacobiana del flujo de potencia es un valor tal que se emplea como un índice de estabilidad. La distancia en MW o MVA al punto crítico de las curvas de nariz son otros ejemplos de índices para este propósito.

2.5.4. Simulaciones en el dominio del tiempo

Las simulaciones dinámicas pueden ser muy utilizadas en el estudio de estabilidad de tensión. De hecho, éste es el método que se utilizó para en la elaboración de esta tesis de grado. Dos soluciones de estado permanente podrían parecer ser estables cuando son utilizados métodos estáticos, pero puede ser imposible para el sistema cambiar desde un punto de operación estable a otro sin colapsar en el camino. Este tipo de limitaciones puede ser resuelto con simulaciones en el dominio del tiempo.

Las simulaciones son mayormente realizadas con un programa de computador que emplea modelos detallados de los componentes del sistema. Las simulaciones en el dominio del tiempo se pueden emplear para investigar aspectos básicos en pequeños sistemas de potencia así como fenómenos más complejos en grandes sistemas.

2.6. Definiciones de estabilidad y colapso de tensión

El área de investigación de estabilidad de tensión carece de definiciones inequívocas. Hay varias definiciones presentadas por diferentes organizaciones, grupos y particulares.

Las definiciones de acuerdo con la IEEE [Report, 1990] son las siguientes:

- Estabilidad de tensión: es la capacidad de un sistema de mantener la tensión de manera que cuando la admitancia de la carga se incremente, la potencia de la carga se incremente el sistema esté en capacidad de suplir las nuevas necesidades de potencia y tensión.
- Colapso de tensión: es el proceso por el cual la inestabilidad de tensión conduce a una pérdida de tensión en una parte significativa del sistema.
- Seguridad de tensión: es la capacidad de un sistema, no solamente para operar de manera estable, sino también permanecer estable luego de cualquier contingencia razonable o cambio adverso en el sistema.
- El sistema entra en un estado de inestabilidad de tensión cuando un disturbio, incrementa la carga, o cambios en el sistema causan que la tensión descienda rápidamente o de manera abrupta, y los operadores y el sistema de control automático fallen para detener la caída. La caída de tensión puede tomar sólo de unos pocos segundos a diez o veinte minutos. Si la caída continua sin detenerse, ocurrirá un colapso de tensión o inestabilidad angular en regimen estacionario.

2.7. Conceptos básicos de estabilidad de tensión

Las características de estabilidad de tensión se muestran mediante un ejemplo simple. La figura 2.1 muestra un sistema de dos barras. El generador produce potencia activa, la cual se transfiere a la carga a través de la línea de transmisión. La capacidad de potencia reactiva del generador es infinita; por ende, la tensión terminal V_1 es constante. La línea de transmisión se representa por una reactancia jX . La carga es de potencia constante tanto en su componente activa como reactiva.

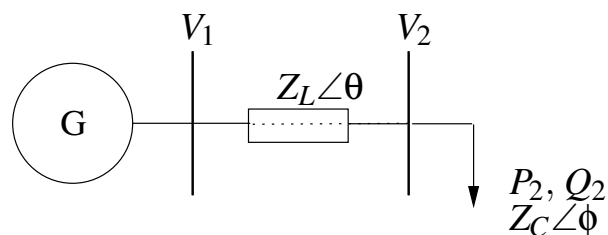


Figura 2.1: Sistema radial simple

El propósito es calcular la tensión V_2 con diferentes valores de carga. La tensión de carga se puede calcular analíticamente en este simple ejemplo. Por lo general, las tensiones se hallan con un programa de flujo de carga. La tensión, corriente y potencia activa de carga para las ecuaciones de flujo de carga del ejemplo son [Kundur, 1994]:

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_C}{Z_L} V_1 \quad (2.1)$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{1}{Z_L} V_1 \quad (2.2)$$

$$P_2 = \frac{Z_C}{F} \left(\frac{V_1}{Z_L} \right)^2 V_1 \quad (2.3)$$

donde

$$F = 1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_L} \right) \cos(\theta - \phi) \quad (2.4)$$

La tensión de carga para las ecuaciones de flujo del ejemplo cuando $Z_L \angle \theta = jX$ es [Repo, 2001]:

$$V_2 = \sqrt{\frac{(V_1^2 - 2QX) \pm \sqrt{V_1^4 - 4QXV_1^2 - 4P^2X^2}}{2}} \quad (2.5)$$

Para el caso de $\phi = 18,2^\circ$ $\theta = 84,3^\circ$, la figura 2.2 ilustra la relación entre la tensión y la potencia de carga variando la relación Z_C/Z_L y manteniendo constante V_1 . Cada curva corresponde a un valor de factor de potencia de carga.

Las curvas P-V presentan dos soluciones para el sistema de potencia: soluciones de alta tensión-baja corriente y de baja tensión-alta corriente. Los sistemas de potencia se operan en la parte más alta de las curvas P-V. Esta parte de la curva es estática y dinámicamente estable. La cabeza de la curva es llamada *punto máximo de cargabilidad*. El punto crítico donde las soluciones se unen es el punto de colapso de tensión.

El punto de cargabilidad máxima es más interesante desde un punto de vista práctico

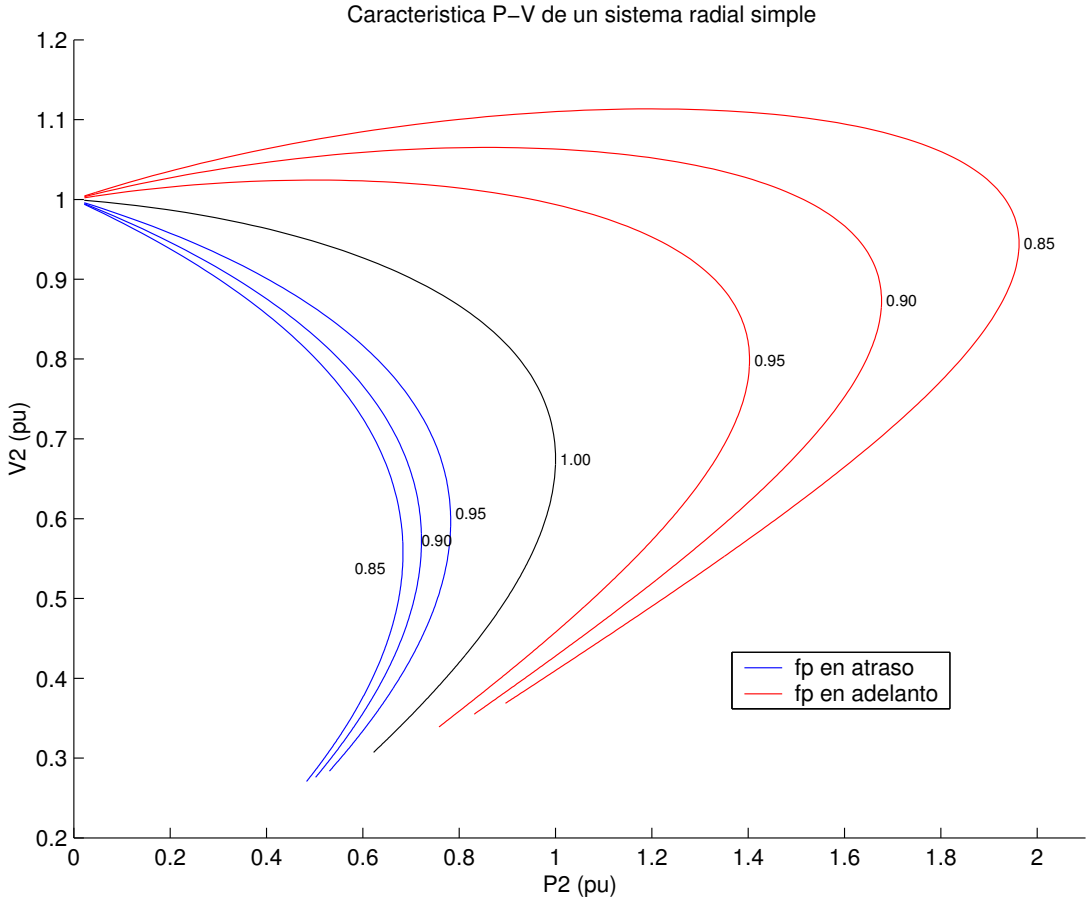


Figura 2.2: Curvas P-V para diferentes factores de potencia

que el verdadero punto de colapso de tensión, porque la capacidad máxima de carga del sistema de potencia está en este punto. El punto máximo de cargabilidad es el punto de colapso de tensión cuando se considera cargas de potencia constante, pero en general son diferentes. La dependencia de la tensión de las cargas afecta el punto de colapso de tensión. El sistema se vuelve inestable en tensión en el punto de colapso de tensión. Las tensiones decrecen rápidamente debido a los requisitos para una cantidad infinita de potencia reactiva. La parte más baja de la curva P-V (a la izquierda del punto de colapso de tensión) es estable estáticamente, pero desde el punto de vista dinámico es inestable. El sistema de potencia tiende a operar en equilibrio, de modo que al ser perturbado, la dinámica del sistema actúa para restaurar el equilibrio en un nuevo estado o en el mismo [Repo, 2001].

2.8. Clasificación de la estabilidad de tensión

En esta sección se presenta la clasificación y definición de una serie de conceptos relacionados con la estabilidad de tensión de sistemas de energía eléctrica avalados por la CIGRE [CIGRÉ, 1993] y el IEEE [Report, 1990].

2.8.1. Estabilidad de tensión ante pequeña perturbación

La estabilidad de tensión ante pequeña perturbación es la capacidad del sistema para mantener tensiones aceptables cuando es sujeto a perturbaciones pequeñas tales como cambios incrementales en la carga. Esta forma de estabilidad es influenciada por las características de las cargas, controles continuos y controles discretos en un instante dado de tiempo. Este concepto es útil para determinar, en cualquier instante, el comportamiento de las tensiones ante pequeños cambios en el sistema. Con suposiciones adecuadas, se linealizan las ecuaciones del sistema para el análisis, lo cual permite efectuar cálculos útiles en la identificación de factores que influyen en la estabilidad. No obstante, esta linealización no puede ser estimada para efectos no lineales como los controles del cambia tap (banda muerta, pasos discretos del tap y tiempos de retardo). Por consiguiente, se emplea una combinación de análisis lineal y no lineal de manera complementaria.

2.8.2. Estabilidad de tensión ante gran perturbación

La estabilidad de tensión ante gran perturbación es la capacidad que tiene un sistema para mantener tensiones estables al ser expuesto a disturbios grandes como fallas del sistema, pérdida de generación o contingencias del circuito. Esta capacidad se determina por las características del sistema y de la carga, y la interacción de protecciones y controles discretos y continuos. La determinación de la estabilidad de tensión de gran perturbación requiere el examen de la respuesta no lineal del sistema de potencia sobre un período de tiempo suficiente para capturar el comportamiento y la interacción de dispositivos tales como motores, transformadores con cambia taps bajo carga y limitadores de corriente de campo del generador. El período de estudio de interés se extiende desde unos pocos segundos a decenas de minutos.

2.8.3. Estabilidad de tensión de corto plazo

La estabilidad de tensión de corto plazo implica la dinámica de componentes de carga que actúan rápidamente como lo son los motores, las cargas controladas electrónicamente y los convertidores HVDC. El período de estudio de interés está en el orden de unos pocos segundos y el análisis requiere la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales apropiadas, siendo similar al análisis de estabilidad de ángulo del rotor. El modelado dinámico de cargas es a menudo esencial. En contraste con la estabilidad de ángulo, los cortocircuitos cercanos a la carga son importantes.

2.8.4. Estabilidad de tensión de largo plazo

La estabilidad de tensión a largo plazo involucra equipos de acción lenta tales como transformadores con cambia taps, cargas controladas térmicamente y limitadores de corriente del generador. El período de estudio de interés se extiende a varios minutos y la simulaciones a largo plazo son necesarias para el análisis del comportamiento dinámico del sistema. Normalmente, la estabilidad se determina más por la reacción del equipo que por la severidad de la perturbación inicial. La inestabilidad es debida a la pérdida de equilibrio a largo plazo (por ejemplo cuando las cargas tratan de restaurar su potencia más allá de la capacidad de la red de transmisión y de la generación conectada), donde el estado de operación estable post perturbación tiende a la inestabilidad

de pequeña perturbación. La perturbación puede ser también un aumento sostenido de carga. En muchos casos, se emplea el análisis estático para estimar márgenes de estabilidad, identificar factores que influyen en la estabilidad y proyectar un amplio rango de condiciones del sistema y un gran número de escenarios. Donde las acciones de control oportunas sean importantes, se deben complementar con simulaciones en el dominio del tiempo cuasiestacionarias.

2.9. Escenario de colapso de tensión

La inestabilidad de tensión es un resultado de por lo menos dos escenarios [Cutsem y Vournas, 2001]. El primero corresponde a un incremento en la demanda que causa la inestabilidad de tensión. El colapso de tensión aparece cuando el cambio causa que el punto de operación estable se pierda. Inicialmente, este fenómeno se refleja en una lenta caída de tensión. Posteriormente, el decremento de tensión es rápido. El colapso de tensión puede incluir aspectos transitorios y de larga duración de inestabilidad de tensión. Sin embargo, en la realidad este caso sucede muy rara vez.

El segundo escenario, el más importante, corresponde a un sistema de potencia expuesto a una gran perturbación. La gran perturbación causa que las características de la red cambien drásticamente. Un incremento de carga más allá del punto de equilibrio de tensión conlleva a la pérdida de estabilidad.

Hay diferentes tipos de escenarios de colapso de tensión. Sin embargo, el colapso de tensión clásico o típico, causado por la inestabilidad de tensión a largo plazo, es caracterizado por [Taylor, 1994; Kundur, 1994]:

1. Algunas líneas de transmisión de extra alta tensión están muy cargadas, la capacidad de generación habilitada de una área crítica es reducida temporalmente por mantenimiento o por condiciones de mercado, y las reservas de potencia reactiva son mínimas o se encuentran localizadas muy lejos del área crítica.
2. Debido a una falla u otra razón cualquiera, una línea altamente cargada se pierde. La carga y las pérdidas de potencia reactiva del resto de las líneas se incrementan. Debido a lo anterior, la demanda de reactivos se eleva.
3. La tensión de carga disminuye, lo cual hace que la demanda de carga y la carga-bilidad de las líneas de extra alta tensión se reduzcan. Sin embargo, el control de

tensión del sistema rápidamente restaura las tensiones terminales de los generadores incrementando la excitación. El flujo de potencia reactiva adicional en las líneas de transmisión y en los transformadores causan una caída de tensión adicional en estos componentes.

4. Luego de varios minutos, dependiendo de los tiempos de retardo, los cambios tap bajo carga de los transformadores restauran las tensiones de distribución. La tensión incrementada también aumenta la demanda de carga. Las pérdidas en las líneas de transmisión también se incrementan, causando una mayor caída de tensión en estas.
5. La demanda de potencia reactiva incrementada eleva la salida de reactivos de los generadores. Cuando el generador alcanza el límite de potencia reactiva, su tensión terminal decrece. Su porción de demanda de potencia reactiva se mueve a otro generador fuera del área crítica, lo cual llevará a una sobrecarga en cascada de generadores. Pueden haber muy pocos generadores para el control de tensión y localizados lejos del área crítica. La tensión disminuida en el sistema de transmisión reduce la efectividad de los condensadores en paralelo. El sistema se vuelve propenso a la inestabilidad de tensión, lo que puede desembocar en un colapso de tensiones.

2.10. El análisis dinámico de estabilidad

El análisis de gran perturbación estudia la respuesta de los elementos dinámicos del sistema de potencia (generadores, cargas, elementos de compensación dinámicos, enlaces de corriente continua, etc) y la variación de las diferentes magnitudes de la red (tensiones, flujos por las líneas, frecuencia, etc) ante la ocurrencia de perturbaciones severas y repentinas tales como cortocircuitos, pérdidas de generación o pérdidas de carga.

Un sistema eléctrico de potencia, bajo condiciones normales de operación, se encuentra casi en equilibrio y sólo experimenta desviaciones menores causadas por variaciones pequeñas, casi continuas, en la demanda. Cuando una perturbación severa y repentina tiene lugar, hay cambios casi instantáneos en las condiciones iniciales. La respuesta del sistema a este tipo de eventos es altamente no lineal.

Un sistema eléctrico de potencia es un sistema dinámico cuya respuesta ante la ocurrencia de una perturbación grande se determina por modelos adecuados de los dispositivos que lo componen. El sistema es modelado por un conjunto de ecuaciones algébricas y diferenciales que describen su comportamiento. Tales ecuaciones se deben resolver iterativamente a partir de condiciones iniciales, mediante métodos numéricos para poder determinar con exactitud la respuesta del sistema. Sólo mediante este procedimiento se puede hallar la evolución en el tiempo de magnitudes del sistema tales como tensiones, flujos, corrientes, etc.

El comportamiento de los elementos dinámicos se modela en el espacio de estados por medio de ecuaciones diferenciales [Kundur, 1994] :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \quad (2.6)$$

Las ecuaciones algébricas no lineales están asociadas a la red:

$$\mathbf{i}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \mathbf{Y}\mathbf{v} \quad (2.7)$$

donde

\mathbf{x} = vector de estado del sistema

\mathbf{v} = vector de componentes real e imaginaria de tensiones de barra del sistema

\mathbf{i} = vector de componentes real e imaginaria de corrientes de barra del sistema

\mathbf{Y} =matriz de la red del sistema, similar en estructura a la matriz admitancia de barras

Los dos conjuntos de ecuaciones forman un sistema algébrico-diferencial de primer orden. Este debe ser resuelto a partir de unas condiciones iniciales $(\mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0)$ para obtener la respuesta en el tiempo del sistema.

Al incluir representaciones de dispositivos tales como transformadores con cambia tap bajo carga y controles de fase de ángulo, los elementos de la \mathbf{Y} cambian en función del tiempo y de las tensiones de barra. El vector de inyección de corriente \mathbf{i} es una función de las variables de estado del sistema \mathbf{x} y del vector \mathbf{v} de las tensiones de barra, representando las condiciones de frontera en los terminales de los diferentes dispositivos.

El análisis de gran perturbación es complejo desde el punto de vista computacional debido a los grandes sistemas de ecuaciones que se deben resolver utilizando pasos de tiempo pequeños para evitar errores y problemas de estabilidad numérica.

Capítulo 3

Modelos para el estudio de estabilidad de tensión de sistemas eléctricos de potencia

3.1. Introducción

Para realizar una interpretación precisa del problema de estabilidad de tensión, es necesario el empleo de modelos adecuados. Con éstos se espera evaluar la evolución de la tensión en el tiempo de una determinada barra del sistema.

El presente capítulo tiene como fin revisar la representación de las cargas y demás dispositivos del sistema eléctrico de potencia que influyen en el fenómeno de estabilidad de tensión ante gran perturbación. Se mencionan las simplificaciones necesarias para elaborar modelos adecuados y su justificación.

3.2. Motor de inducción

El motor de inducción es un componente de carga importante en el análisis de estabilidad porque constituye la mayor porción de las cargas de un sistema de potencia.

En la simulación de un sistema no es práctico modelar cada motor de inducción individualmente. Por lo tanto, a menudo se usa un modelo agregado de motor de inducción (modelo único de una unidad equivalente) para representar un grupo de cargas de inducción similares alimentadas por la misma subestación [T. Kataoka, 2000]. Si

los motores conectados a la misma barra no son similares, es necesario emplear varios motores agregados para representar apropiadamente la carga.

Existe una variedad de modelos agregados de máquina de inducción. En este trabajo de grado se utilizó el modelo de tercer orden.

3.2.1. Principios básicos de operación

En un motor trifásico un campo magnético que gira a velocidad síncrona se produce cuando un conjunto de tres tensiones de fase es aplicado al estator [Fitzgerald, 1992]. La velocidad de rotación del campo magnético está dado por:

$$n_s = \frac{120f_s}{P_f} \quad (3.1)$$

donde f_s es la frecuencia del sistema y P_f es el número de polos.

El campo magnético giratorio induce tensiones en los devanados del rotor, debido al movimiento relativo entre ellos. La frecuencia de la tensión inducida en el rotor f_r es función de la velocidad relativa entre el campo y los devanados del rotor. A su vez la tensión inducida causa una corriente que fluye en los devanados del rotor, la cual interactúa con el campo giratorio para producir un torque que causa que el rotor se acelere. Mientras la velocidad del rotor se incrementa, la velocidad relativa entre el campo rotacional y el rotor decrece, reduciendo la magnitud de la tensión inducida. A medida que el movimiento relativo se aproxime a cero, las corrientes y las tensiones inducidas del rotor también se aproximan a cero. Sin embargo, para una máquina operando como motor, la velocidad del campo rotacional debe ser mayor que la velocidad del rotor.

El deslizamiento es definido como la diferencia en por unidad entre la velocidad del campo rotacional del estator y la velocidad del rotor:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.2)$$

3.2.2. Ecuaciones básicas de una máquina de inducción en coordenadas fijas

La figura 3.1 muestra los circuitos aplicables al análisis de una máquina de inducción. Los circuitos del estator comprenden los devanados trifásicos a, b y c, distribuidos a 120° en el espacio. Los circuitos del rotor tienen tres devanados distribuidos A, B y C. Las fases del estator y del rotor pueden estar conectadas en Y o en Δ . [Kundur, 1994].

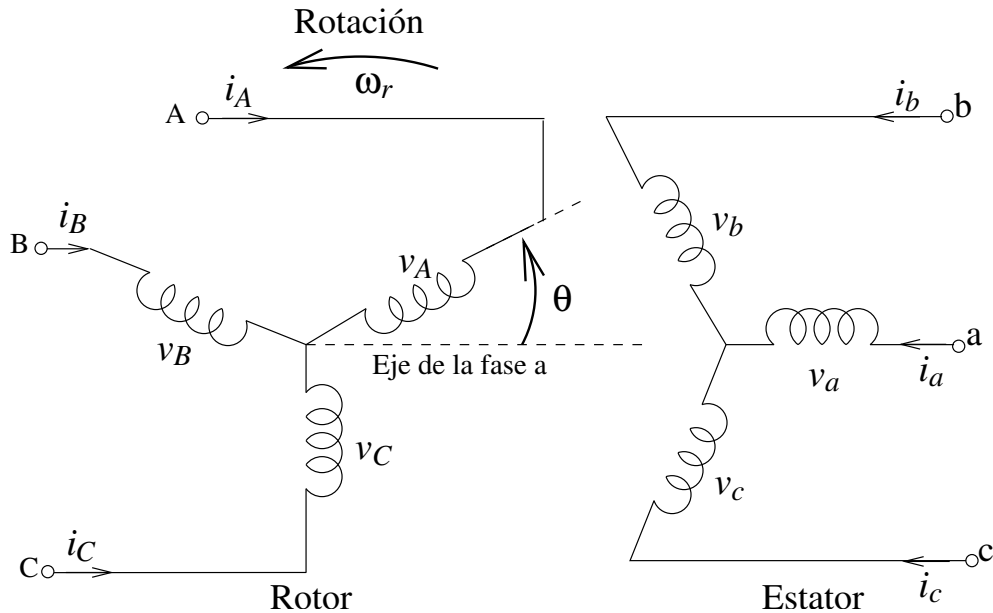


Figura 3.1: Circuitos del motor de inducción

En la figura 3.1, Θ se define como el ángulo por el cual el eje de la fase A del devanado del rotor adelanta el eje de la fase a del devanado del estator en la dirección de rotación. Con una velocidad constante del ángulo del rotor ω_r , en radianes eléctricos por segundo,

$$\Theta = \omega_r t \quad (3.3)$$

con un deslizamiento constante s,

$$\Theta = (1 - s)\omega_s t \quad (3.4)$$

Despreciando la saturación, la histéresis y las corrientes de Eddy, y asumiendo una distribución puramente senoidal de las ondas de flujo, las ecuaciones de la máquina

quedan especificadas de la siguiente forma:

Las ecuaciones de tensión del estator son las siguientes:

$$v_a = p\Psi_a + R_s i_a \quad (3.5)$$

$$v_b = p\Psi_b + R_s i_b \quad (3.6)$$

$$v_c = p\Psi_c + R_s i_c \quad (3.7)$$

Las ecuaciones de tensión del rotor son las siguientes:

$$v_A = p\Psi_A + R_r i_A \quad (3.8)$$

$$v_B = p\Psi_B + R_r i_B \quad (3.9)$$

$$v_C = p\Psi_C + R_r i_C \quad (3.10)$$

Para estudios del sistema de potencia, se desprecian los efectos de ranura y se considera que el rotor tiene una estructura simétrica. Por lo tanto, sólo las inductancias mutuas entre los devanados del estator y del rotor son funciones de la posición del rotor definida por el ángulo Θ .

El flujo de acoplamiento inductivo en el devanado de la fase a del estator en algún instante está dado por:

$$\Psi_a = L_{aa} i_a + L_{ab} (i_b + i_c) + L_{aA} [i_A \cos \Theta + i_B \cos (\Theta + 120^\circ) + i_C \cos (\Theta - 120^\circ)] \quad (3.11)$$

Se obtienen expresiones similares para los flujos de acoplamiento de los devanados b y c del estator.

El flujo de acoplamiento inductivo en el devanado de la fase A del rotor:

$$\Psi_A = L_{AA} i_A + L_{AB} (i_B + i_C) + L_{aA} [i_a \cos \Theta + i_b \cos (\Theta - 120^\circ) + i_c \cos (\Theta + 120^\circ)] \quad (3.12)$$

expresiones similares se aplican a Ψ_B y a Ψ_C .

Por las conexiones de los devanados o por condiciones balanceadas, se tiene:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.13)$$

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (3.14)$$

Las ecuaciones (3.11) y (3.12) se expresan de la siguiente forma:

$$\Psi_a = L_{ss}i_a + L_{aA} [i_A \cos \Theta + i_B \cos (\Theta + 120^\circ) + i_C \cos (\Theta - 120^\circ)] \quad (3.15)$$

$$\Psi_A = L_{rr}i_A + L_{aA} [i_a \cos \Theta + i_b \cos (\Theta - 120^\circ) + i_c \cos (\Theta + 120^\circ)] \quad (3.16)$$

Donde

$$L_{ss} = L_{aa} - L_{ab} \quad (3.17)$$

$$L_{rr} = L_{AA} - L_{AB} \quad (3.18)$$

3.2.3. La transformación de dqo

La aplicación directa de estas ecuaciones a estudios de estabilidad es muy complicada debido a la presencia de expresiones variantes en el tiempo. Por tal motivo, estas cantidades se transforman a un marco de referencia cuyos ejes giran a velocidad síncrona (ejes directo y cuadratura), obteniendo ecuaciones más simples [T. Kataoka, 2000]. La técnica que permite esto se conoce como transformación de Park o transformación *dqo*.

Esta transformación se define para las corrientes del estator como:

$$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}] = [\mathbf{T}_1] [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{s0}] \quad (3.19)$$

Y para las corrientes del rotor:

$$[i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}] = [\mathbf{T}_2] [i_{rd} \ i_{rq} \ i_{r0}] \quad (3.20)$$

La matriz de transformación a utilizar para las cantidades del estator es la siguiente:

$$[\mathbf{T}_1] = \begin{bmatrix} \cos \omega_s t & -\sin \omega_s t & 1 \\ \cos (\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin (\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos (\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin (\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

La matriz de transformación a utilizar para las cantidades del rotor es la siguiente:

$$[\mathbf{T}_2] = \begin{bmatrix} \cos(\Theta_r) & -\sin(\Theta_r) & 1 \\ \cos(\Theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\Theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Donde Θ_r es el ángulo por el cual el eje directo adelanta al eje de la fase A del rotor. Para transformaciones de las tensiones y los flujos también se utilizan las matrices \mathbf{T}_1 y \mathbf{T}_2 .

La transformación de las corrientes de fase del estator en las componentes d y q:

$$i_{ds} = \frac{2}{3} [i_a \cos \omega_s t + i_b \cos(\omega_s t - 120^\circ) + i_c \cos(\Theta + 120^\circ)] \quad (3.23)$$

$$i_{qs} = -\frac{2}{3} [i_a \sin \omega_s t + i_b \sin(\omega_s t - 120^\circ) + i_c \sin(\Theta + 120^\circ)] \quad (3.24)$$

La transformación de las corrientes de fase del rotor en las componentes d y q:

$$i_{dr} = \frac{2}{3} [i_A \cos \Theta_r + i_B \cos(\Theta_r - 120^\circ) + i_C \cos(\Theta_r + 120^\circ)] \quad (3.25)$$

$$i_{qr} = -\frac{2}{3} [i_A \sin \Theta_r + i_B \sin(\Theta_r - 120^\circ) + i_C \sin(\Theta_r + 120^\circ)] \quad (3.26)$$

3.2.4. Ecuaciones en coordenadas que giran a velocidad síncrona

Al considerar el modelo de un sistema de coordenadas dq que giran a velocidad síncrona, las tensiones del estator y del rotor en términos de las componentes dqo son [Kundur, 1994]:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + p \Psi_{ds} \quad (3.27)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + p \Psi_{qs} \quad (3.28)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (p\Theta_r)\Psi_{qr} + p\Psi_{dr} \quad (3.29)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (p\Theta_r)\Psi_{dr} + p\Psi_{qr} \quad (3.30)$$

donde

$$\Psi_{ds} = L_{ss}i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (3.31)$$

$$\Psi_{qs} = L_{ss}i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (3.32)$$

$$\Psi_{dr} = L_{rr}i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (3.33)$$

$$\Psi_{qr} = L_{rr}i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (3.34)$$

con $L_m = 3/2(L_{aA})$

3.2.5. Sistema por unidad

En el análisis de sistemas de potencia es común expresar las cantidades en por unidad. Esto facilita el análisis del sistema y disminuye la complejidad desde el punto de vista computacional. Los valores base para el estator son:

v_{sbase} = valor pico de la tensión de fase nominal, V.

i_{sbase} = valor pico de la corriente de fase nominal, A.

f_{base} = frecuencia nominal, Hz

Los valores base para las restantes cantidades se definen en términos de los anteriores:

$\omega_{base} = 2\pi f_{base}$, radianes eléctricos/s

$\omega_{mbase} = \omega_{base} \frac{2}{p_f}$, radianes mecánicos/s

$$Z_{sbase} = \frac{v_{sbase}}{i_{sbase}}, \Omega$$

$$L_{sbase} = \frac{v_{sbase}}{i_{sbase}\omega_{base}}, \text{H}$$

$$\Psi_{sbase} = L_{sbase}i_{sbase} = \frac{v_{sbase}}{\omega_{base}}, \text{Wb}$$

$$MVA_{base} = \frac{3}{2}v_{sbase}i_{sbase}, \text{VA}$$

$$\text{Torque base} = \frac{MVA_{base}}{\omega_{mbase}} = \frac{3}{2} \left(\frac{pf}{2} \right) \Psi_{sbase}i_{sbase}, \text{N.m}$$

Los anteriores valores base también se aplican para el rotor cuando todas las cantidades del rotor están referidas al lado del estator.

3.2.6. Representación en estudios de estabilidad

Para representación en estudios de estabilidad, se desprecian $p\Psi_{ds}$ y $p\Psi_{qs}$ (términos que representan los transitorios del estator) en la relaciones de tensiones del estator [Kundur, 1994]. Esto equivale a ignorar la componente dc en las corrientes transitorias del estator.

Despreciando el efecto de los transitorios y teniendo en cuenta que los devanados del rotor se cortocircuitan, las ecuaciones eléctricas en pu del motor de inducción quedan especificadas de la siguiente forma:

Tensiones del estator:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega \Psi_{qs} \quad (3.35)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega \Psi_{ds} \quad (3.36)$$

Tensiones del rotor:

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} - p\theta_r \Psi_{qr} + p\Psi_{dr} \quad (3.37)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + p\theta_r \Psi_{dr} + p\Psi_{qr} \quad (3.38)$$

Flujos de acoplamiento inductivo:

$$\Psi_{ds} = L_{ss}i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (3.39)$$

$$\Psi_{qs} = L_{ss}i_{qs} + L_m i_{dr} \quad (3.40)$$

$$\Psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_{rr}i_{dr} \quad (3.41)$$

$$\Psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_{rr}i_{qr} \quad (3.42)$$

donde $L_{ss} = L_s + L_m$ y $L_{rr} = L_r + L_m$

Al reducir las anteriores ecuaciones a una forma adecuada para la implementación en un programa de estabilidad, se eliminan las corrientes del rotor y se expresa la relación de la corriente y la tensión del estator en términos de la tensión a través de la reactancia transitoria. De esta manera, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - X'_s i_{qs} + v'_d \quad (3.43)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + X'_s i_{ds} + v'_q \quad (3.44)$$

donde

$$v'_d = \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \Psi_{qr} \quad (3.45)$$

$$v'_q = \frac{\omega_s L_m}{L_{rr}} \Psi_{dr} \quad (3.46)$$

$$X'_s = \omega_s \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right) \quad (3.47)$$

Las ecuaciones de tensión del estator se combinan y se expresan de la siguiente forma:

$$v_{ds} + jv_{qs} = (R_s + jX'_s)(i_{ds} + ji_{qs}) + (v'_d + jv'_q) \quad (3.48)$$

$$\mathbf{V}_s = (R_s + jX'_s)\mathbf{I}_s + \mathbf{V}' \quad (3.49)$$

De la anterior ecuación, es evidente que la máquina de inducción se representa por el simple circuito equivalente de la figura 3.2. Al eliminar las corrientes del rotor y expresar el flujo de acoplamiento del rotor en términos de v'_d y v'_q , las ecuaciones (3.37)

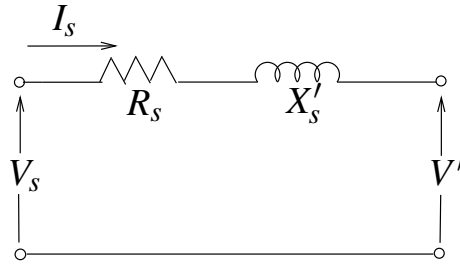


Figura 3.2: Circuito transitorio del motor de inducción

y (3.38) se escriben de la siguiente forma:

$$p(v'_d) = -\frac{1}{T'_0} [v'_d + (X_s - X'_s)i_{qs}] + p\theta_r v'_q \quad (3.50)$$

$$p(v'_q) = -\frac{1}{T'_0} [v'_q - (X_s - X'_s)i_{qs}] - p\theta_r v'_d \quad (3.51)$$

donde:

$$T'_0 = \frac{L_r + L_m}{\omega_s R_r} = \frac{L_{rr}}{\omega_s R_r} \quad (3.52)$$

$$X_s = \omega_s (L_s + L_m) = \omega_s L_{ss} \quad (3.53)$$

$$p\theta_r = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3.54)$$

La ecuación de aceleración del rotor con el tiempo expresado en segundos es:

$$p(\omega_r) = \frac{1}{2H} (T_e - T_m) \quad (3.55)$$

donde T_m es el torque mecánico; el torque electromagnético con $\omega_s = 1.0$ pu es:

$$T_e = v'_d i_{ds} - v'_q i_{qs} \quad (3.56)$$

Los diferentes modelos de torque mecánico para el motor de inducción son los siguientes:

Modelo de torque constante:

$$T_m(\omega_r) = T_0 \quad (3.57)$$

Modelo de torque exponencial:

$$T_m(\omega_r) = T_0(\omega_r)^m \quad (3.58)$$

Modelo de torque polinomial:

$$T_m(\omega_r) = T_0 [A(\omega_r)^2 + B\omega_r + C] \quad (3.59)$$

3.2.7. Modelo de estado estable del motor de inducción

Una máquina de inducción trifásica con resistencia del rotor constante se representa en estado estacionario por el circuito equivalente mostrado en la figura 3.3. El deslizamiento s se expresa en la ecuación (3.2), X_s y X_r son las reactancias de dispersión del estator y del rotor respectivamente y X_m es la reactancia de magnetización. Todas las impedancias están referidas al lado del estator.

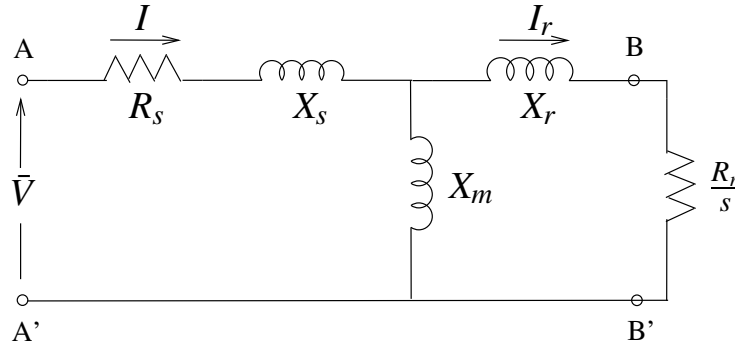
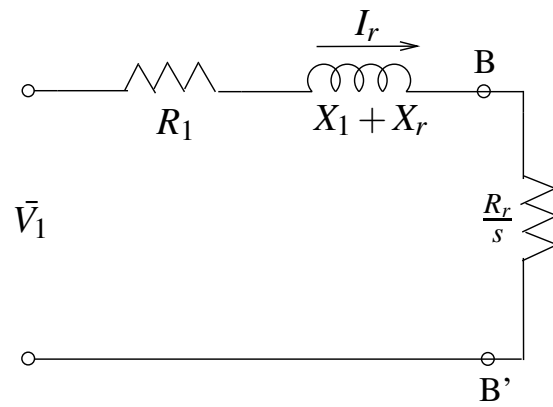


Figura 3.3: Circuito equivalente de estado estacionario de la máquina de inducción

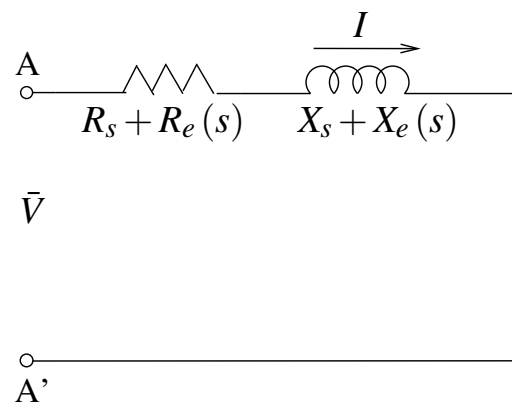
En el circuito de la figura 3.3 todos los transitorios eléctricos se han extinguido. Sin embargo, no necesariamente se ha alcanzado el estado estacionario mecánico, y por ende el deslizamiento del rotor puede variar.

De la figura 3.3 se derivan las figuras 3.4a y 3.4b. [Cutsem y Vournas, 2001]. La figura 3.4a muestra el circuito equivalente visto desde los terminales BB' hacia el estator, con las siguientes ecuaciones:

$$V_1 = \frac{X_m V}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_m)^2}} \quad (3.60)$$



(a)



(b)

Figura 3.4: a) Circuito equivalente visto desde BB' b) Circuito equivalente visto desde AA'

$$R_1 + jX_1 = \frac{jX_m(R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (3.61)$$

La figura 3.4b muestra el circuito equivalente visto desde los terminales AA' del estator, del cual se derivan las siguientes expresiones:

$$\vec{I} = \frac{\vec{V}}{\mathbf{s}(R_s + R_e) + j(X_s + X_e)} \quad (3.62)$$

$$R_e + jX_e = \frac{jX_m \left(\frac{R_r}{s} + jX_r \right)}{\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r)} \quad (3.63)$$

Las potencias real y reactiva absorbidas por la máquina de inducción en estado estacionario están dadas como funciones de la tensión y del deslizamiento:

$$P(V, \mathbf{s}) = \frac{(R_s + R_e)V^2}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} \quad (3.64)$$

$$Q(V, \mathbf{s}) = \frac{(X_s + X_e)V^2}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} \quad (3.65)$$

3.3. Cargas con restauración termostática

Las cargas con restauración termostática pertenecen a la categoría de cargas de restauración propia, cuya dependencia de la tensión es variante en el tiempo y exhiben a su vez una tendencia a restaurar la potencia demandada cuando la tensión de la barra de carga disminuye [Cutsem y Vournas, 2001].

Las cargas con restauración por termostato se emplean en todos los tipos de calentadores. Un modelo real de estas cargas se muestra en la figura 3.5 [Kundur, 1994].

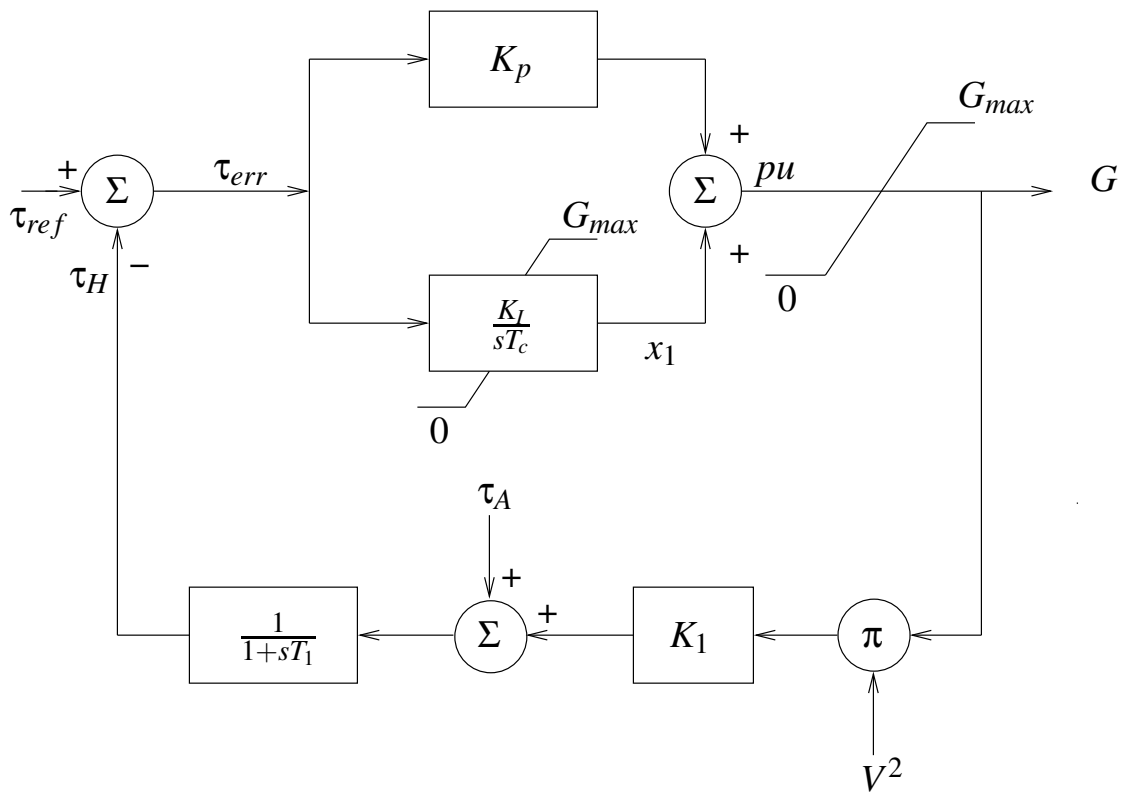


Figura 3.5: Un modelo real para cargas con restauración termostática

La ecuación dinámica se expresa como:

$$K \frac{d\tau_H}{dt} = P_H - P_L \quad (3.66)$$

donde

τ_H = temperatura del área de calentamiento

τ_A = temperatura ambiente

P_H = potencia del calentador

P_L = pérdida de calor por escape al medio ambiente

G = conductancia de carga

$$P_H = K_H G V^2 \quad (3.67)$$

$$P_L = K_A (\tau_H - \tau_A) \quad (3.68)$$

Sustituyendo las expresiones (3.67) y (3.68) en la ecuación (3.66) y reorganizando, se obtiene:

$$\frac{d\tau_H}{dt} = \frac{K_H}{K} G V^2 + \frac{K_A}{K} \tau_A - \frac{K_A}{K} \tau_H \quad (3.69)$$

o de otra forma:

$$\frac{d\tau_H}{dt} = \frac{K_1}{T_1} G V^2 + \frac{1}{T_1} \tau_A - \frac{1}{T_1} \tau_H \quad (3.70)$$

donde:

$$T_1 = \frac{K}{K_A} \quad (3.71)$$

y

$$K_1 = \frac{K_H}{K_A} \quad (3.72)$$

De la figura 3.5, se deduce la expresión de la segunda ecuación dinámica de estas cargas

$$p(x_1) = \tau_{err} \left(\frac{K_I}{T_C} \right) \quad (3.73)$$

donde

$$\tau_{err} = \tau_{ref} - \tau_H \quad (3.74)$$

La corriente inyectada de la carga es:

$$I = -(V_R + jV_I) G \quad (3.75)$$

3.4. Transformador con cambia tap bajo carga (ULTC)

Uno de los mecanismos claves en la restauración de carga es la regulación de tensión ejecutada automáticamente por dispositivos de cambio de tap bajo carga de transformadores de potencia [Cutsem y Vournas, 2001].

El diagrama detallado de reactancias en por unidad se muestra en la figura 3.6. En la figura 3.7 se muestra el circuito equivalente π del transformador donde $Y_t = \frac{1}{Z_t}$ y $k = \frac{1}{n}$.

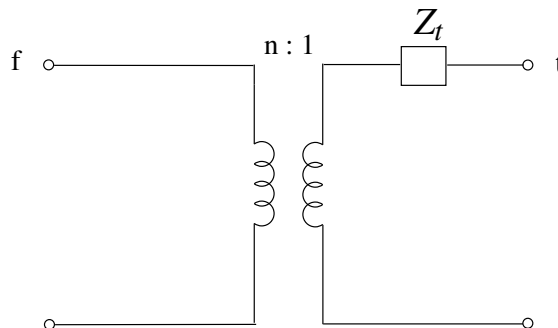


Figura 3.6: Diagrama detallado de reactancias del transformador

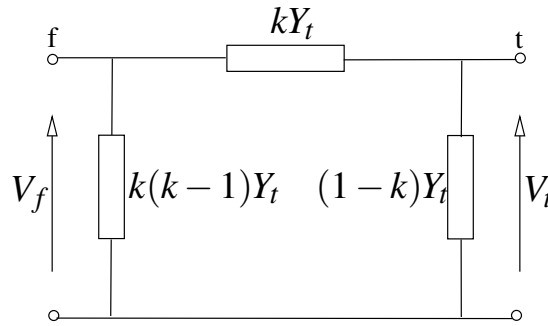


Figura 3.7: Circuito equivalente π del transformador

Las ecuaciones de admitancia de barra para la figura 3.7 toman la forma [Grainger y Stevenson, 1996]:

$$\begin{bmatrix} Y_{ff} & Y_{ft} \\ Y_{tf} & Y_{tt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_t}{n^2} & -\frac{Y_t}{n} \\ -\frac{Y_t}{n} & Y_t \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

3.4.1. Modelo del sistema de control del ULTC

El diagrama de bloques funcional del sistema de control se muestra en la figura 3.8, el cual está compuesto por los siguientes elementos básicos [Kundur, 1994]:

1. Un mecanismo de cambiador de tap impulsado por una unidad motora.
2. Un regulador de tensión que consiste de un dispositivo de medida y de un elemento de retardo de tiempo.
3. Un compensador de carga.

La figura 3.9 muestra el diagrama de bloques del sistema de control del ULTC adecuado para los estudios del sistema.

Compensador de carga

Regula la tensión en un punto remoto a lo largo de la línea o del alimentador. La tensión en el punto remoto se obtiene calculando la tensión a través de la impedancia del compensador $R_c + jX_c$. La magnitud de la tensión compensada está dada por $V_c = | \vec{V}_t + \vec{I}_t (R_c + jX_c) |$, donde \vec{V}_t es la tensión fasorial en el lado secundario del transformador.

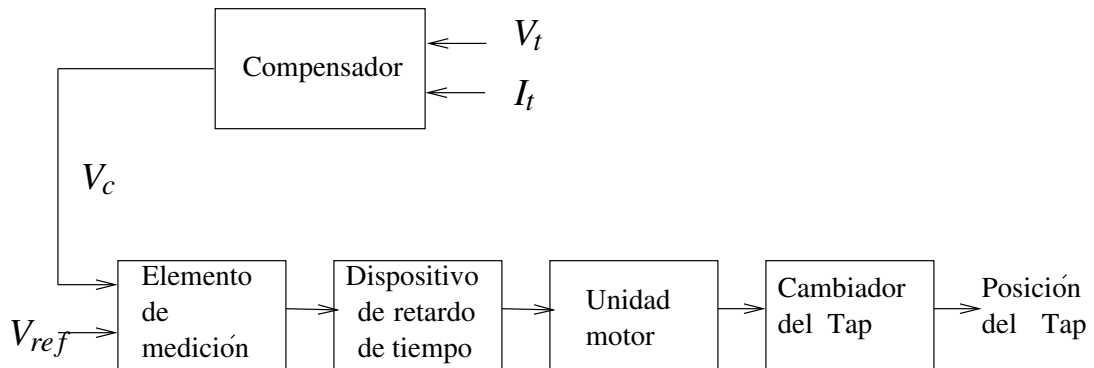


Figura 3.8: Diagrama de bloques funcional del sistema de control del ULTC

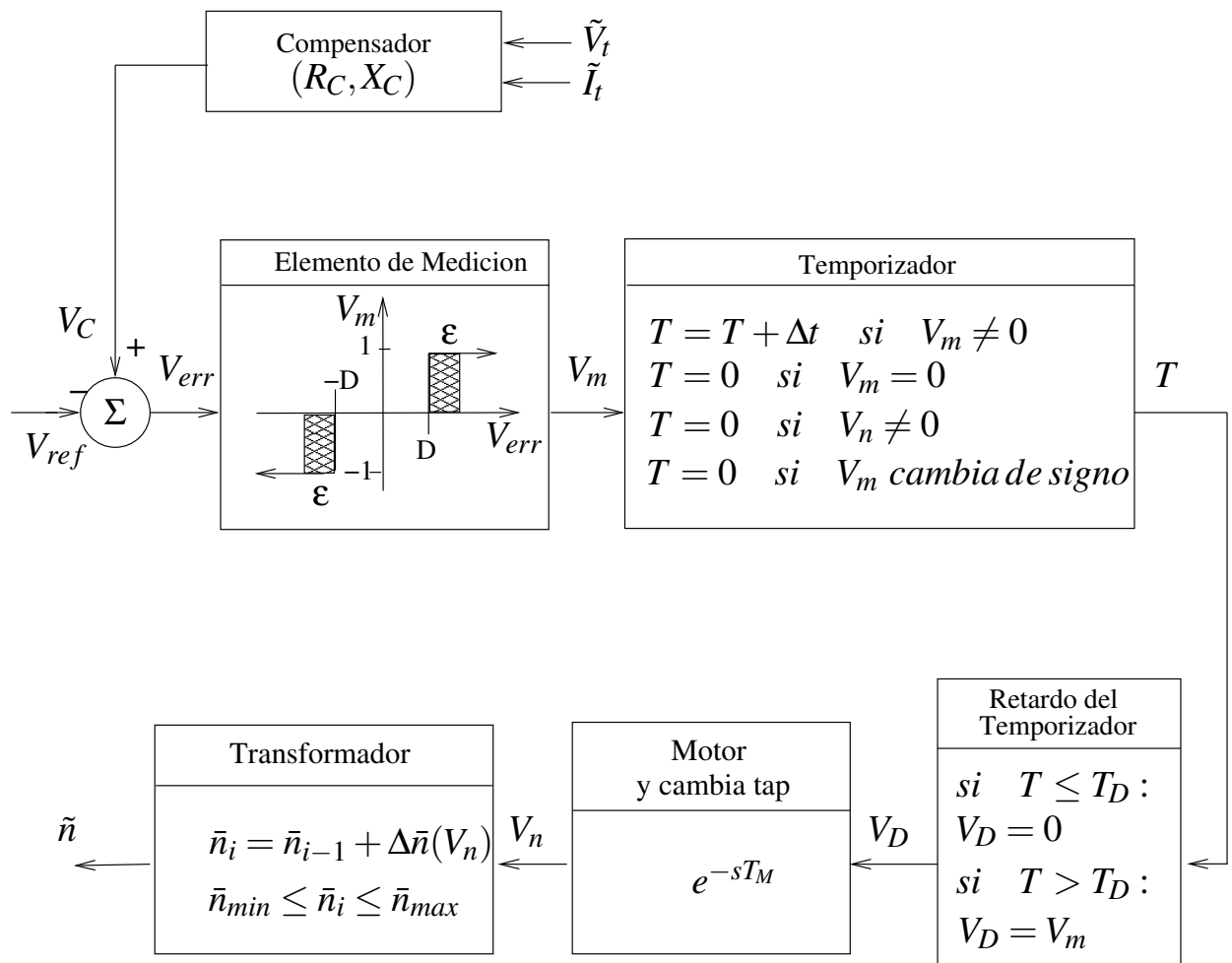


Figura 3.9: Diagrama de bloques del sistema de control del ULTC para estudios de estabilidad.

Elemento de medición

El elemento de medición del regulador de tensión consiste de un relé de banda muerta ajustable que tiene en cuenta el efecto histéresis presente en este dispositivo. La entrada al regulador es la tensión de error $V_{err} = V_{ref} - V_c$. La señal de salida V_m , dependiendo del valor de la señal de entrada V_{err} , tendrá un valor de 0, 1 ó -1. Con un regulador de ancho de banda muerta D y un ancho de banda de histéresis ε , la salida corresponderá a los siguientes valores:

$$V_m = \begin{cases} 0 & \text{para } -D \leq V_{err} \leq +D \\ 0 & \text{para } D < V_{err} \leq D + \varepsilon & V_{err} \text{ en incremento} \\ 0 & \text{para } -D - \varepsilon \leq V_{err} < -D & V_{err} \text{ en decremento} \\ 1 & \text{para } V_{err} < D + \varepsilon \\ 1 & \text{para } D < V_{err} \leq D + \varepsilon & V_{err} \text{ en decremento} \\ -1 & \text{para } V_{err} < -D - \varepsilon \\ -1 & \text{para } -D - \varepsilon \leq V_{err} < -D & V_{err} \text{ en incremento} \end{cases} \quad (3.77)$$

Dispositivo de retardo de tiempo

Se emplea para prevenir cambios innecesarios del tap como respuesta a variaciones transitorias de tensión y para introducir un retardo de tiempo deseado antes de un movimiento del tap. La unidad *Temporizadora* determina la duración en el tiempo de la tensión de error V_{err} que excede al ancho de banda muerta. La señal del *Temporizador* se habilita si V_{err} está por fuera de la banda muerta; se reinicia, si V_{err} se encuentra en el rango de la banda muerta, si hay un movimiento del tap ($V_n \neq 0$) o si V_{err} oscila por encima y por debajo de la banda muerta. La salida de la unidad de retardo de tiempo V_D por lo general es cero. Sin embargo cuando el tiempo acumulado T del *Temporizador* exceda a T_D , entonces V_D se toma el valor de V_m (es decir, 1 ó -1). De este modo se envía la señal al motor que impulsa el cambiador del tap para moverlo arriba o abajo.

El tiempo de retardo T_D es igual a T_{D0} para el primer movimiento del tap. Algunos reguladores tienen una característica inversa de tiempo de retardo en la cual el tiempo de retardo es inversamente proporcional a la tensión de error.

$$T_D = \frac{T_{D0}}{V_{err}/D} \quad (3.78)$$

Para posteriores movimientos del tap el tiempo de retardo T_D es igual a T_{D1} . Esto conlleva a la introducción de un tiempo de retardo intencional entre movimientos consecutivos del tap.

La unidad motora y el mecanismo de cambio de tap

La unidad motora y el mecanismo del cambio del tap se pueden representar por un retardo de tiempo T_m simple inherente al equipo. La señal de salida V_n representa un cambio incremental en la posición del tap, cuyos valores pueden ser 0,1 ó -1.

Un cambio en la posición del tap se refleja en el modelo del transformador como un cambio incremental en pu de la relación de transformación. La relación de transformación en la i^{th} operación, si la barra controlada está en el lado secundario es:

$$\bar{n}_i = \bar{n}_{i-1} + \Delta\bar{n}(V_n) \quad (3.79)$$

donde $\Delta\bar{n}$ representa el paso de relación de transformación correspondiente al cambio en la posición del tap en un paso.

Si la barra controlada está en el lado primario, la relación de transformación en la i^{th} operación es:

$$\bar{n}_i = \bar{n}_{i-1} - \Delta\bar{n}(V_n) \quad (3.80)$$

El cambio del tap está sujeto al límite máximo \bar{n}_{max} y al mínimo \bar{n}_{mn} de la relación de transformación.

3.5. El compensador estático de potencia reactiva (SVC)

El compensador estático de potencia reactiva es un dispositivo que permite modular la admitancia shunt vista por un nodo. El nombre “estático” implica que no tiene partes móviles.

Idealmente, su funcionamiento se basa en tener una admitancia formada por elementos de valor variable. Estos elementos son una reactancia inductiva en paralelo con una reactancia capacitiva, ambos de valor variable mediante un sistema apropiado. Por

tanto, su función de variar la potencia reactiva entregada o consumida se debe a la variación, mediante una estrategia de control, de la admitancia vista por el nodo.

Además, mediante elementos de estado sólido se pueden lograr diferentes configuraciones con uno o ambos elementos que también permiten modular la potencia reactiva entregada o consumida por el nodo. Esto se realiza mediante el control del ángulo de disparo de la tensión en bornes de la admitancia shunt. [Vargas, 2002].

Las principales razones para incorporar SVC's en sistemas de transmisión y distribución son:

- Estabilizar la tensión en sistemas débiles.
- Reducir las pérdidas de transmisión.
- Incrementar la capacidad de transmisión, posponiendo de esta manera la necesidad de nuevas líneas.
- Incrementar la estabilidad para perturbaciones transitorias.
- Mejorar el control de tensión y la estabilidad de tensión.
- Amortiguar las oscilaciones de potencia.

La configuración del SVC empleada en la herramienta software consta de un condensador fijo (FC) y un reactor controlado por tiristor (TCR) como el mostrado en la figura

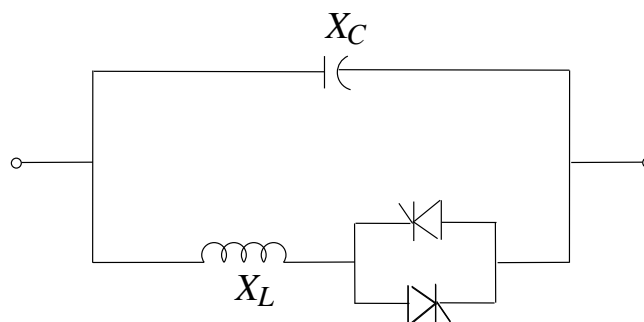


Figura 3.10: Estructura común para el SVC

3.5.1. Representación del SVC en flujo de carga

La característica de estado estacionario del SVC se muestra en la figura 3.11, en la cual se aprecia tres modos de operación [Kundur, 1994]. Los correspondientes circuitos equivalentes vistos desde la barra de alta tensión se muestran en la figura 3.12.

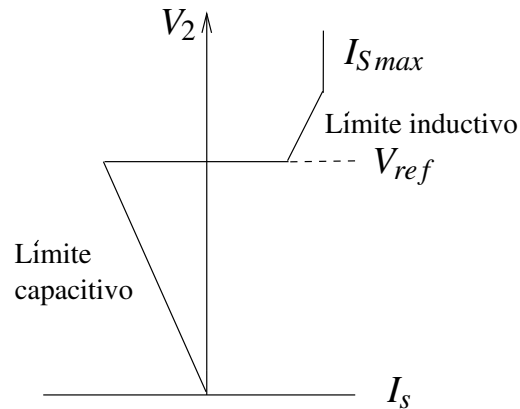


Figura 3.11: Característica de estado estacionario del SVC

El modo normal de operación es el rango de control lineal. En este modo el SVC es visto como una susceptancia variable. Cuando la operación del SVC se acerca al límite capacitivo se convierte en una susceptancia capacitiva B_C fija conectada a la barra. De igual manera cuando se acerca al límite inductivo se convierte en una susceptancia inductiva B_L fija.

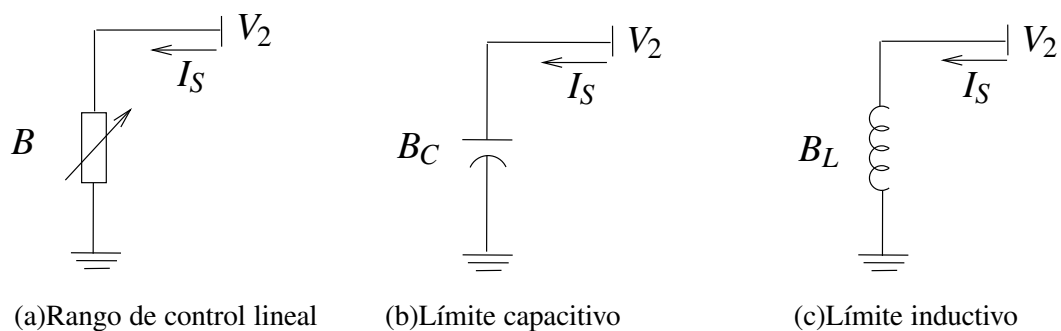


Figura 3.12: Modos de operación del SVC

3.5.2. Modelo dinámico del SVC

La figura 3.13 muestra el diagrama de bloques del modelo del SVC utilizado en la herramienta software, el cual consiste de un regulador de tensión, un TCR y un condensador fijo [Kundur, 1994].

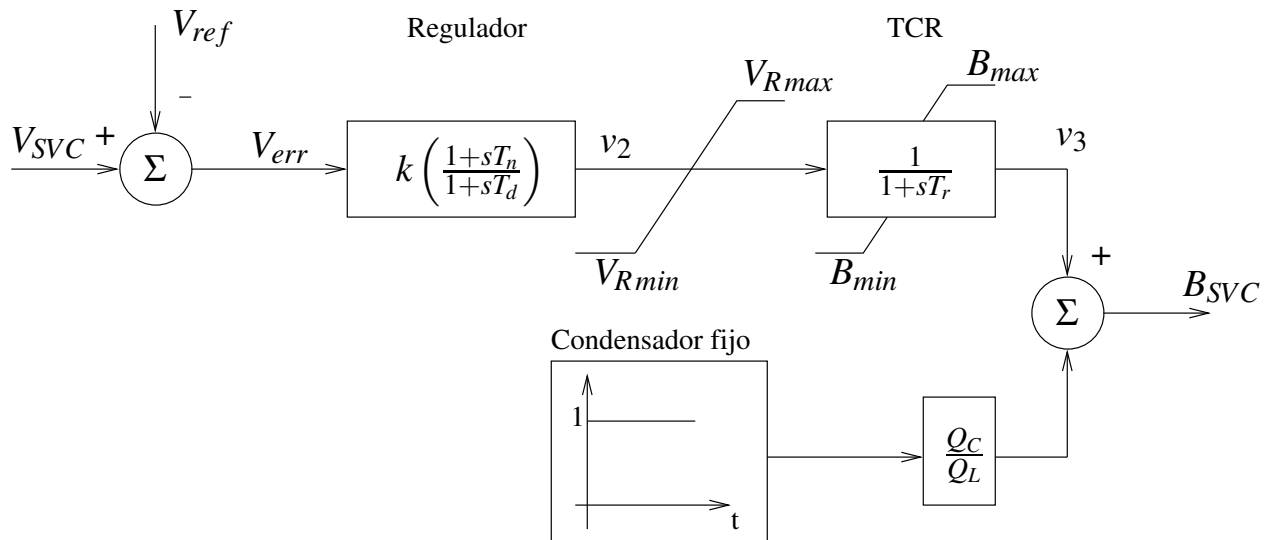


Figura 3.13: Modelo dinámico del SVC

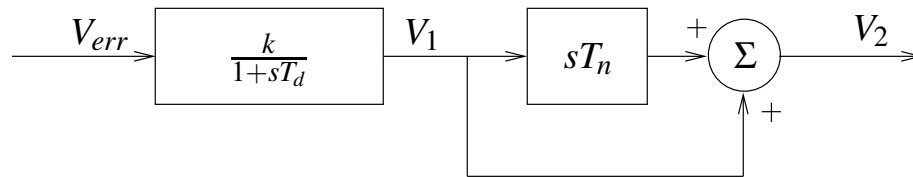


Figura 3.14: Modelo dinámico del SVC

Del diagrama de bloques mostrado en la figura 3.14, se deducen las siguientes ecuaciones dinámicas:

$$p(v_1) = \frac{1}{T_D} [K(V - V_{ref}) - v_1] \tag{3.81}$$

Separando el bloque correspondiente al regulador de tensión, como se ve en la figura

3.14, se obtiene la expresión:

$$p(v_3) = \frac{1}{T_r} [v_2 - v_3] \quad (3.82)$$

donde:

$$v_2 = \frac{T_n}{T_D} [K(V - V_{ref}) - v_1] + v_1 \quad (3.83)$$

reordenando la ecuación (3.83)

$$v_2 = \frac{T_n}{T_D} [K(V - V_{ref})] + \left(1 - \frac{T_n}{T_D}\right) v_1 \quad (3.84)$$

reemplazando en la ecuación (3.83) la expresión anterior, se deduce la expresión para la segunda ecuación dinámica del SVC:

$$p(v_3) = \frac{1}{T_r} \left[\frac{T_n}{T_D} [K(V - V_{ref})] + \left(1 - \frac{T_n}{T_D}\right) v_1 - v_3 \right] \quad (3.85)$$

3.6. Modelos genéricos de cargas

Un modelo genérico caracteriza el comportamiento de cargas agregadas o carga total vista desde el sistema de potencia. Dos variaciones de modelo de carga genérica puede ser identificados: *el modelo multiplicativo*, en el cual la variable de estado multiplica la característica transitoria de carga, y *el modelo aditivo*, en el cual la variable de estado de carga se adiciona a la característica transitoria [Cutsem y Vournas, 2001]. En ambos casos se cumple:

- La característica transitoria de tensión es exponencial

- En estado estacionario la potencia demandada es:

$$P_s = P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_s} \quad (3.86)$$

$$Q_s = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_s} \quad (3.87)$$

- Z_P y Z_Q son las variables de estado (adimensionales) asociadas a la característica dinámica de la carga. Deben cumplir con la siguiente condición:

$$Z_P^{mn} \leq Z_P \leq Z_P^{max} \quad (3.88)$$

$$Z_Q^{mn} \leq Z_Q \leq Z_Q^{max} \quad (3.89)$$

3.6.1. Modelo genérico multiplicativo de carga

La potencia consumida por la carga según el modelo genérico multiplicativo es dada por:

$$P = Z_P P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_t} \quad (3.90)$$

$$Q = Z_Q Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_t} \quad (3.91)$$

Generalmente los exponentes transitorios de carga (α_t, β_t) son mayores que los de estado estacionario (α_s, β_s); por lo tanto la característica transitoria es más sensible a la tensión. Las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico de la carga de modelo multiplicativo son:

$$p(Z_P) = \frac{1}{T_P} \left[\left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_s} - Z_P \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_t} \right] \quad (3.92)$$

$$p(Z_Q) = \frac{1}{T_Q} \left[\left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_s} - Z_Q \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_t} \right] \quad (3.93)$$

3.6.2. Modelo genérico aditivo de carga

La característica transitoria de carga según el modelo aditivo está dada por:

$$P = P_o \left[\left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} + Z_P \right] \quad (3.94)$$

$$Q = Q_o \left[\left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_r} + Z_Q \right] \quad (3.95)$$

Las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico de este modelo de carga son:

$$p(Z_P) = \frac{1}{T_P} \left[-Z_P + \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_s} - \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} \right] \quad (3.96)$$

$$p(Z_Q) = \frac{1}{T_Q} \left[-Z_Q + \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_s} - \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_r} \right] \quad (3.97)$$

De las ecuaciones (3.94) y (3.95) se puede apreciar que este modelo introduce un término de potencia constante en la característica de carga transitoria. En simulaciones computacionales puede introducir problemas de singularidad. En cambio, el modelo multiplicativo no incluye componentes constantes de potencia y es así más real [Cutsem y Vournas, 2001]. Por tal motivo se implementó el modelo genérico multiplicativo de carga en el paquete HAGP.

Los modelos de generadores sincrónicos y sus controles asociados (sistema de excitación y sistema de regulación carga-velocidad y turbina), modelos de carga ZIP, líneas, transformadores, reactores y condensadores en paralelo convencionales están implementados en la herramienta HAGP. Para mayor información consultar [Rodríguez, 2003].

Capítulo 4

Metodología para la simulación

4.1. Introducción

En este capítulo se presentará la metodología utilizada para la inicialización de las variables de estado, la obtención del jacobiano para los modelos dinámicos y los algoritmos especiales necesarios para la simulación.

4.2. Inicialización de modelos dinámicos

Las condiciones iniciales para la simulación dinámica están dadas por las tensiones de las barras del sistema y el valor inicial de las variables de estado de todos los elementos dinámicos, los cuales se obtienen del estudio de flujo de carga en estado estable.

A continuación se presentará la metodología para el análisis de flujo de carga para cada modelo implementado.

4.2.1. Inicialización de la carga controlada por termostato

Para estudios de flujo de carga, la carga controlada por termostato se considera como una carga de potencia constante, debido a su característica de variar la conductancia equivalente para mantener la demanda de potencia activa constante planteada en el capítulo 3.

4.2.2. Inicialización del motor de inducción

Los datos iniciales de un motor de inducción son la potencia activa, la potencia reactiva y el deslizamiento del rotor para una tensión terminal dada (esta tensión es generalmente 1.0 pu). Posterior a la solución de flujos de potencia de Newton-Raphson, las tensiones en las barras por lo general cambian y por ende, los valores actuales de potencia activa y reactiva y el deslizamiento del rotor del motor de inducción no coinciden con sus valores iniciales [Ruiz et al., 1999]. Esta diferencia entre los valores iniciales y los calculados de las variables del motor se resuelve por diferentes métodos:

Método 1.

Luego del estudio de flujo de carga, la tensión terminal y el deslizamiento inicial se emplean para calcular la potencia activa y reactiva consumida por el motor. La diferencia entre estos valores y los valores iniciales se representa por una admitancia ficticia que se adiciona a la admitancia de la barra de carga en \mathbf{Y}_{bus} .

Método 2.

Luego del estudio de flujo de carga, la tensión terminal y la potencia activa inicial del motor de inducción se emplean para calcular la potencia reactiva consumida y el deslizamiento del motor. La diferencia entre estos valores y los valores iniciales se representa por una admitancia ficticia que se adiciona a la admitancia de la barra de carga en \mathbf{Y}_{bus} .

Método 3.

Este método considera el comportamiento del motor ante variaciones de tensión. En estado estable la potencia activa es prácticamente independiente de la tensión mientras el motor esté en marcha; en cambio la potencia reactiva es más sensible a los cambios de tensión. Cuando la tensión cae, la potencia reactiva decrece. Posteriormente se incrementa en la medida que cae la tensión. Este comportamiento del motor se observa cuando su carga mecánica es otra constante o depende de la velocidad angular del motor.

De acuerdo con el comportamiento del motor descrito, la manera correcta de resolver el modelo en estado estable del motor de inducción es considerar la potencia activa como constante. Esta variable y la tensión terminal obtenida en cada iteración del estudio del flujo de potencia son utilizados para calcular el deslizamiento actual y la potencia reactiva del motor de inducción. El torque eléctrico desarrollado por el motor como función de la tensión terminal y del deslizamiento es:

$$T_e(V, \mathbf{s}) = \frac{V^2 X_m^2 \frac{R_s}{\mathbf{s}}}{\left[\left(R_1 + \frac{R_r}{\mathbf{s}} \right)^2 + (X_1 + X_r)^2 \right] \left[R_s^2 + (X_s + X_m)^2 \right]} \quad (4.1)$$

donde

$$R_1 + jX_1 = \frac{jX_m(R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{s} = 1 - \omega_r \quad (4.3)$$

En estado estacionario se cumple que:

$$T_e(V, \mathbf{s}) = T_m(\omega_r) = T_0(\omega_r)^2 \quad (4.4)$$

donde

T_m = par mecánico

T_0 = constante de par mecánico.

Reemplazando las ecuaciones (4.3) y (4.4) en la ecuación (4.1) y reorganizando se obtiene el siguiente polinomio:

$$\alpha_4 (\omega_r)^4 + \alpha_3 (\omega_r)^3 + \alpha_2 (\omega_r)^2 + \alpha_1 (\omega_r) + \alpha_0 = 0 \quad (4.5)$$

donde

$$\alpha_4 = R_s^2 (X_s + X_m)^2 T_0 R_1^2 \quad (4.6)$$

$$\alpha_3 = -2R_s^2 (X_s + X_m)^2 T_0 (R_1^2 + R_1 R_r) \quad (4.7)$$

$$\alpha_2 = R_s^2 (X_s + X_m)^2 T_0 \left\{ R_1^2 + 2 \left[R_r^2 + (X_1 + X_r)^2 \right] R_1 R_r \right\} - V^2 X_m^2 R_r \quad (4.8)$$

$$\alpha_1 = 2V^2 X_m^2 R_r \quad (4.9)$$

$$\alpha_0 = -V^2 X_m^2 R_r \quad (4.10)$$

En el estudio de flujo de potencia por Newton-Raphson, se sigue los siguientes pasos

- En cada iteración, los coeficientes $\alpha_4, \alpha_3, \alpha_2, \alpha_1$ y α_0 se calculan empleando la tensión obtenida y las ecuaciones (4.6) a (4.10).
- Se resuelve la ecuación (4.5) y se obtienen los valores de la velocidad del motor. Se selecciona la raíz de mayor valor porque es la que corresponde a la región estable de la curva de potencia activa versus deslizamiento del motor. Se halla el deslizamiento con la ecuación (4.3).
- La potencia reactiva del motor se calcula empleando la ecuación (4.11).
- Todos los pasos se repiten hasta que el estudio converja.

$$Q(V, s) = \frac{(X_s + X_e(s)) V^2}{(R_s + R_e(s))^2 + (X_s + X_e(s))^2} \quad (4.11)$$

4.2.3. Inicialización del SVC

El modelo del SVC para el flujo de carga es el expuesto en el capítulo 3. Allí se describen los tres modos de operación en estado estacionario.

4.2.4. Inicialización del modelo multiplicativo de carga

Para el análisis de flujo de potencia, al igual que la carga termostática, se considera como demanda de potencia constante.

El modelo multiplicativo se inicializa con $Z_P = Z_Q = 1$, para lograr la condición estacionaria $V = V_o$, deducido de las ecuaciones (3.92) y (3.93).

4.3. Simulación dinámica

La estructura del análisis de estabilidad de tensión de gran perturbación es similar a la del análisis de estabilidad de ángulo de gran perturbación. Se realiza por medio de la simulación en el dominio del tiempo de los elementos que componen el sistema eléctrico de potencia, la cual consiste en la integración numérica del sistema de ecuaciones diferenciales que describen su comportamiento dinámico como el descrito en la ecuación (2.6).

Un algoritmo de integración numérica de un conjunto de ecuaciones diferenciales calcula la evolución en el tiempo de las variables de estado en instantes de tiempo discreto ($x_0, \dots, x_k \dots$) separados un intervalo de tiempo Δt .

La herramienta software elaborada mantiene la filosofía del paquete HAGP, en el que se utiliza un método de integración implícito llamado regla trapezoidal [Kundur, 1994]. La regla trapezoidal calcula las variables de estado en el paso $n + 1$ por medio de la expresión:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\dot{\mathbf{x}}_n + \dot{\mathbf{x}}_{n+1}] \quad (4.12)$$

Donde \mathbf{x}_n y \mathbf{v}_n son los valores del vector de estado y del vector de tensiones en $t = t_n$, y \mathbf{x}_{n+1} y \mathbf{v}_{n+1} son los valores del vector de estado y del vector de tensiones en $t = t_{n+1}$.

Para $t = t_{n+1}$ también se debe satisfacer la ecuación de red:

$$\mathbf{i}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{Y}\mathbf{v}_{n+1} \quad (4.13)$$

El cálculo de las variables de estado en el paso $n + 1$ por medio de la ecuación (4.12) implica la resolución de un sistema de ecuaciones no lineales. Ello se puede apreciar al sustituir en la ecuación (4.12) $\dot{\mathbf{x}}$ por $\mathbf{f}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{v}_n)] \quad (4.14)$$

Si se definen los vectores \mathbf{F} y \mathbf{G} como:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n - \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{v}_n)] \quad (4.15)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{Y}\mathbf{v}_{n+1} - \mathbf{i}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) \quad (4.16)$$

los valores desconocidos \mathbf{x}_{n+1} y \mathbf{v}_{n+1} deben satisfacer la condición:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = 0 \quad (4.17)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = 0 \quad (4.18)$$

Las ecuaciones (4.17) y (4.18) son ecuaciones algebraicas no lineales. Aplicando el método de Newton para solucionar estas ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} \\ \mathbf{v}_{n+1}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \mathbf{v}_{n+1}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Los valores de $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k$ y $\Delta \mathbf{v}_{n+1}^k$ son hallados a partir de:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \\ -\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{v}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Los valores del jacobiano \mathbf{J} en la ecuación anterior se hallan para \mathbf{x}_{n+1}^k y \mathbf{v}_{n+1}^k , y este tiene la siguiente estructura:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{v}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_D & \mathbf{B}_D \\ \mathbf{C}_D & (\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_D) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Las matrices \mathbf{A}_D , \mathbf{B}_D , \mathbf{C}_D y \mathbf{Y}_D dependen de los modelos de los elementos dinámicos del sistema y las cargas estáticas no lineales. Estas matrices tienen las siguientes composiciones:

$$\mathbf{A}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_{dm} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{d1} \\ \mathbf{B}_{d2} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{dm} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{Y}_{dN} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{d1} & \mathbf{C}_{d2} & \cdots & \mathbf{C}_{dm} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

donde \mathbf{m} es el número de elementos dinámicos del sistema y \mathbf{N} el número de barras.

Las ecuaciones (4.17) y (4.18) pueden expresarse en términos de las matrices como:

$$\mathbf{A}_D \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k = -\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \quad (4.23)$$

$$\mathbf{C}_D \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k + (\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_D) \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k = -\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \quad (4.24)$$

A partir de estas ecuaciones es posible hallar $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k$ y $\Delta \mathbf{v}_{n+1}^k$ a partir de:

$$\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k = -\mathbf{A}_D^{-1} \left[\mathbf{F}_{n+1}^k + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k \right] \quad (4.25)$$

$$(\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_D - \mathbf{C}_D \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{B}_D) \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k = -\mathbf{G}_{n+1}^k + \mathbf{C}_D \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{F}_{n+1}^k \quad (4.26)$$

Finalmente teniendo estos valores se hallan \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} y \mathbf{v}_{n+1}^{k+1} a partir de la ecuación 4.19. Hay que tener en cuenta que el procedimiento anterior es válido cuando las funciones \mathbf{F} y \mathbf{G} son diferenciables. Cuando ocurre una discontinuidad tal como una falla u operación de interruptores, solamente se resuelven las ecuaciones de red para corregir los valores del vector \mathbf{v} en el instante en que ocurre la perturbación, el vector de estado \mathbf{x} no se cambia. Luego se continúa con el proceso de integración.

En las siguientes secciones se especifican los vectores \mathbf{F} y \mathbf{G} y las matrices \mathbf{A}_D , \mathbf{B}_D , \mathbf{C}_D y \mathbf{Y}_D correspondientes a cada dispositivo modelado.

4.4. Sistema de ecuaciones del motor de inducción

Las ecuaciones que describen el comportamiento del motor de inducción en forma de espacio de estados son:

$$p(v'_d) = -\frac{1}{T'_o} [v'_d + (x_s - x'_s)i_{sq}] + (1 - \omega_r)v'_q \quad (4.27)$$

$$p(v'_q) = -\frac{1}{T'_o} [v'_q - (x_s - x'_s)i_{sd}] - (1 - \omega_r)v'_d \quad (4.28)$$

$$p(\omega_r) = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (4.29)$$

Entonces se tiene un sistema de tres variables de estado. Los elementos del vector \mathbf{F} correspondiente a cada variable de estado del motor de inducción son:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1 = & v'_{d1} - v'_{d2} - \frac{dt}{2} \left\{ -\frac{1}{T'_o} [v'_{d1} + v'_{d2} + (x_s - x'_s)(i_{sq1} + i_{sq2})] \cdots \right. \\ & \left. \cdots + (1 - \omega_{r1})v'_{q1} + (1 - \omega_{r2})v'_{q2} \right\} \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_2 = & v'_{q1} - v'_{q2} - \frac{dt}{2} - \left\{ \frac{1}{T'_o} [v'_{q1} + v'_{q2} - (x_s - x'_s)(i_{sd1} + i_{sd2})] \cdots \right. \\ & \left. \cdots - (1 - \omega_{r1})v'_{d1} - (1 - \omega_{r2})v'_{d2} \right\} \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\mathbf{F}_3 = \omega_{r1} - \omega_{r2} - \frac{dt}{4H} [T_{m1} + T_{m2} - (T_{e1} + T_{e2})] \quad (4.32)$$

Donde las expresiones para las corrientes de eje directo y en cuadratura del estator del motor de inducción son las siguientes:

$$i_{sd} = \frac{R_s (v_d - v'_d) + X'_s (v_q - v'_q)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.33)$$

$$i_{sq} = \frac{R_s (v_q - v'_q) - X'_s (v_d - v'_d)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.34)$$

Las corrientes real e imaginaria inyectadas a la barra por el motor de inducción corresponden a:

$$i_R = - \frac{R_s (V_R - v'_d) + X'_s (V_I - v'_q)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.35)$$

$$i_I = - \frac{R_s (V_I - v'_q) - X'_s (V_R - v'_d)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.36)$$

La deducción de las ecuaciones (4.33), (4.34), (4.35) y (4.36) se encuentra en el apéndice A, sección A.1.

Los elementos del vector \mathbf{G} correspondientes al motor de inducción son:

$$\mathbf{G}_R = \mathbf{Y}_{VR} + \frac{R_s (V_R - v'_d) + X'_s (V_I - v'_q)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.37)$$

$$\mathbf{G}_I = \mathbf{Y}_{VI} + \frac{R_s (V_I - v'_q) - X'_s (V_R - v'_d)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.38)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{A}_D para el motor de inducción están dados por las siguientes ecuaciones (ver apéndice A, sección A.2):

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial v'_d} = 1 + \frac{dt}{2T'_o} \left[1 + (X_s - X'_s) \frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \right] \quad (4.39)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial v'_q} = - \frac{dt}{2} \left[\frac{(X_s - X'_s) R_s}{T'_o [R_s^2 + (X'_s)^2]} + (1 - \omega_r) \right] \quad (4.40)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial \omega_r} = \frac{dt}{2} v'_q \quad (4.41)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial v'_d} = -\frac{dt}{2} \left[-\frac{(X_s - X'_s) R_s}{T'_o [R_s^2 + (X'_s)^2]} - (1 - \omega_r) \right] \quad (4.42)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial v'_q} = 1 + \frac{dt}{2T'_o} \left[1 + (X_s - X'_s) \frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \right] \quad (4.43)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial \omega_r} = -\frac{dt}{2} v'_d \quad (4.44)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_3}{\partial v'_d} = \frac{dt}{4H} \left(\frac{\partial T_e}{\partial v'_d} \right) = \frac{dt}{4H} \left[i_{sd} - v'_d \left(\frac{R_s}{R_s - X'_s} \right) + v'_q \left(\frac{X'_s}{R_s - X'_s} \right) \right] \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_3}{\partial v'_q} = \frac{dt}{4H} \left(\frac{\partial T_e}{\partial v'_q} \right) = \frac{dt}{4H} \left[i_{sq} - v'_d \left(\frac{X'_s}{R_s - X'_s} \right) - v'_q \left(\frac{R_s}{R_s - X'_s} \right) \right] \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_3}{\partial \omega_r} = 1 - \frac{dt}{4H} \left(\frac{\partial T_m}{\partial \omega_r} \right) = 1 + \frac{dt}{4H} [T_o m (1 - \omega_r)^{m-1}] \quad (4.47)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{B}_D para el motor de inducción están dados por las siguientes ecuaciones (ver apéndice A, sección A.2):

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial V_R} = \frac{dt}{2T'_o} (X_s - X'_s) \frac{\partial i_{sq}}{\partial V_R} \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial V_I} = \frac{dt}{2T'_o} (X_s - X'_s) \frac{\partial i_{sq}}{\partial V_I} \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial V_R} = -\frac{dt}{2T'_o} (X_s - X'_s) \frac{\partial i_{sd}}{\partial V_R} \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial V_I} = -\frac{dt}{2T'_o} (X_s - X'_s) \frac{\partial i_{sd}}{\partial V_I} \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_3}{\partial V_R} = -\frac{dt}{4H} \left(\frac{\partial T_e}{\partial V_R} \right) \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_3}{\partial V_I} = -\frac{dt}{4H} \left(\frac{\partial T_e}{\partial V_I} \right) \quad (4.53)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{C}_D para el motor de inducción están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial v'_d} = -\frac{R_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.54)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial v'_d} = -\frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.55)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial v'_q} = -\frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.56)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial v'_q} = -\frac{R_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.57)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial \omega_r} = 0 \quad (4.58)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial \omega_r} = 0 \quad (4.59)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{Y}_D para el motor de inducción están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial i_R}{\partial V_R} = -\frac{R_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.60)$$

$$\frac{\partial i_R}{\partial V_I} = -\frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.61)$$

$$\frac{\partial i_I}{\partial V_R} = \frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.62)$$

$$\frac{\partial i_I}{\partial V_I} = -\frac{R_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (4.63)$$

4.5. Sistema de ecuaciones de la carga controlada por termostato

Las ecuaciones que describen el comportamiento de las cargas controladas por termostato en forma de espacio de estados son:

$$p(\tau_H) = \frac{K_1}{T_1} G_C V^2 + \frac{1}{T_1} \tau_A - \frac{1}{T_1} \tau_H \quad (4.64)$$

$$p(x_1) = \tau_{err} \left(\frac{K_I}{T_C} \right) \quad (4.65)$$

donde G_C es la conductancia de carga.

Entonces se tiene un sistema de dos variables de estado y en la figura 3.5 se observa que x_1 es una variable restringida. Los elementos del vector \mathbf{F} correspondiente a cada variable de estado de las cargas controladas termostáticamente son:

$$\mathbf{F}_1 = \tau_{H1} - \tau_{H2} - \frac{dt}{2T_1} [K_1 G_{C1} V_1^2 + K_1 G_{C2} V_2^2 + 2\tau_A - (\tau_{H1} + \tau_{H2})] \quad (4.66)$$

$$\mathbf{F}_2 = x_{11} - x_{12} - \frac{dt}{2} \left(\frac{K_I}{T_C} \right) (\tau_{err1} + \tau_{err2}) \quad (4.67)$$

Las corrientes real e imaginaria inyectadas a la barra por la carga corresponden a (ver apéndice A, sección A.3):

$$i_R = -G_C \mathbf{v}_R \quad (4.68)$$

$$i_I = -G_C \mathbf{v}_I \quad (4.69)$$

Los elementos del vector \mathbf{G} correspondiente a las cargas controladas por termostato son:

$$\mathbf{G}_R = \mathbf{Y}_{vR} + G_C \mathbf{v}_R \quad (4.70)$$

$$\mathbf{G}_I = \mathbf{Y}_{vI} + G_C \mathbf{v}_I \quad (4.71)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{A}_D para las cargas controladas por termostato están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial \tau_H} = 1 + \frac{dt}{2T_1} (K_1 K_p V^2 + 1) \quad (4.72)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial x_1} = -\frac{dt}{2T_1} (K_1 V^2) \quad (4.73)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial \tau_H} = \frac{dt}{2} \left(\frac{K_I}{T_C} \right) \quad (4.74)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial x_1} = 1 \quad (4.75)$$

$$\text{donde } V = \sqrt{V_R^2 + V_I^2} \quad (4.76)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{B}_D para las cargas controladas por termostato están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial V_R} = -\frac{dt}{T_1} (K_1 G_c V_R) \quad (4.77)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial V_I} = -\frac{dt}{T_1} (K_1 G_c V_I) \quad (4.78)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial V_R} = 0 \quad (4.79)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial V_I} = 0 \quad (4.80)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{C}_D para las cargas controladas por termostato están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial \tau_H} = -\frac{\partial i_R}{\partial \tau_H} = -K_p V_R \quad (4.81)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial \tau_H} = -\frac{\partial i_I}{\partial \tau_H} = -K_p V_I \quad (4.82)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial x_1} = -\frac{\partial i_R}{\partial x_1} = V_R \quad (4.83)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial x_1} = -\frac{\partial i_I}{\partial x_1} = V_I \quad (4.84)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{Y}_D para las cargas controladas por termostato están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial i_R}{\partial V_R} = -G_c \quad (4.85)$$

$$\frac{\partial i_R}{\partial V_I} = 0 \quad (4.86)$$

$$\frac{\partial i_I}{\partial V_R} = 0 \quad (4.87)$$

$$\frac{\partial i_I}{\partial V_I} = -G_c \quad (4.88)$$

4.6. Sistema de ecuaciones del compensador estático de reactiva

Las ecuaciones que describen el comportamiento del compensador estático de reactiva en forma de espacio de estados son:

$$p(v_1) = \frac{1}{T_D} [K(V - V_{ref}) - v_1] \quad (4.89)$$

$$p(v_3) = \frac{1}{T_r} \left[\frac{T_n}{T_D} K(V - V_{ref}) + \left(1 - \frac{T_n}{T_D}\right) v_1 - v_3 \right] \quad (4.90)$$

Entonces se tiene un sistema de dos variables de estado, en la figura 3.13 se observa que v_3 es una variable restringida. Los elementos del vector \mathbf{F} correspondiente a cada variable de estado del compensador estático de reactiva son:

$$\mathbf{F}_1 = v_{11} - v_{12} - \frac{dt}{2T_D} [K(V_1 + V_2 - 2V_{ref}) - (v_{11} + v_{12})] \quad (4.91)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_2 = & v_{31} - v_{32} - \frac{dt}{2T_r} \left\{ \frac{T_n}{T_D} K (V_1 + V_2 - 2V_{ref}) \cdots \right. \\ & \left. \cdots + \left(1 - \frac{T_n}{T_D} \right) (v_{11} + v_{12}) - (v_{31} + v_{32}) \right\} \end{aligned} \quad (4.92)$$

Las corrientes real e imaginaria inyectadas a la barra corresponden a (ver apéndice A, sección A.4):

$$i_R = \mathbf{v}_I (B_C - v_3) \quad (4.93)$$

$$i_I = -\mathbf{v}_R (B_C - v_3) \quad (4.94)$$

Los elementos del vector \mathbf{G} correspondiente al SVC son:

$$\mathbf{G}_R = \mathbf{Y}\mathbf{v}_R - \mathbf{v}_I (B_C - v_3) \quad (4.95)$$

$$\mathbf{G}_I = \mathbf{Y}\mathbf{v}_I + \mathbf{v}_R (B_C - v_3) \quad (4.96)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{A}_D para el SVC están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial v_1} = 1 + \frac{dt}{2T_D} \quad (4.97)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial v_3} = 0 \quad (4.98)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_3}{\partial v_1} = -\frac{dt}{2T_r} \left[1 - \frac{T_n}{T_D} \right] \quad (4.99)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_3}{\partial v_3} = 1 + \frac{dt}{2T_r} \quad (4.100)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{B}_D para el SVC están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial V_R} = -\frac{dt}{2T_D} K \frac{V_R}{\sqrt{V_R^2 + V_I^2}} \quad (4.101)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial V_I} = -\frac{dt}{2T_D} K \frac{V_I}{\sqrt{V_R^2 + V_I^2}} \quad (4.102)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_3}{\partial V_R} = -\frac{dt}{2T_R} K \left(\frac{T_n}{T_D} \right) \frac{V_R}{\sqrt{V_R^2 + V_I^2}} \quad (4.103)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_3}{\partial V_I} = -\frac{dt}{2T_R} K \left(\frac{T_n}{T_D} \right) \frac{V_I}{\sqrt{V_R^2 + V_I^2}} \quad (4.104)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{C}_D para el SVC están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial v_3} = -\frac{\partial i_R}{\partial v_3} = V_I \quad (4.105)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial v_3} = -\frac{\partial i_I}{\partial v_3} = -V_R \quad (4.106)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial v_1} = -\frac{\partial i_R}{\partial v_1} = 0 \quad (4.107)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial v_1} = -\frac{\partial i_I}{\partial v_1} = 0 \quad (4.108)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{Y}_D para el SVC están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial V_R} = 0 \quad (4.109)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial V_I} = -(B_C - v_3) \quad (4.110)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial V_R} = B_C - v_3 \quad (4.111)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial V_I} = 0 \quad (4.112)$$

4.7. Sistema de ecuaciones del modelo multiplicativo de carga

Las ecuaciones que describen el comportamiento del modelo multiplicativo de carga en forma de espacio de estados son:

$$p(Z_P) = \frac{1}{T_P} \left[\left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_s} - Z_P \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} \right] \quad (4.113)$$

$$p(Z_Q) = \frac{1}{T_Q} \left[\left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_s} - Z_Q \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_r} \right] \quad (4.114)$$

Los elementos del vector \mathbf{F} correspondiente a cada variable de estado del modelo multiplicativo de carga son:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1 = & Z_{P1} - Z_{P2} - \frac{dt}{2T_P} \left[\left(\frac{V_1}{V_o} \right)^{\alpha_s} - Z_{P1} \left(\frac{V_1}{V_o} \right)^{\alpha_r} \dots \right. \\ & \left. \dots + \left(\frac{V_2}{V_o} \right)^{\alpha_s} - Z_{P2} \left(\frac{V_2}{V_o} \right)^{\alpha_r} \right] \end{aligned} \quad (4.115)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_2 = & Z_{Q1} - Z_{Q2} - \frac{dt}{2T_Q} \left[\left(\frac{V_1}{V_o} \right)^{\beta_s} - Z_{Q1} \left(\frac{V_1}{V_o} \right)^{\beta_r} \dots \right. \\ & \left. \dots + \left(\frac{V_2}{V_o} \right)^{\beta_s} - Z_{Q2} \left(\frac{V_2}{V_o} \right)^{\beta_r} \right] \end{aligned} \quad (4.116)$$

Las corrientes real e imaginaria inyectadas a la barra por la carga corresponden a (ver apéndice A, sección A.5):

$$i_R = - \left[\frac{Z_P P_o V_R (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\alpha_r - 2}{2}}}{(V_{Ro}^2 + V_{Io}^2)^{\frac{\alpha_r}{2}}} + \frac{Z_Q Q_o V_I (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\beta_r - 2}{2}}}{(V_{Ro}^2 + V_{Io}^2)^{\frac{\beta_r}{2}}} \right] \quad (4.117)$$

$$i_I = - \left[\frac{Z_P P_o V_I (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\alpha_r - 2}{2}}}{(V_{Ro}^2 + V_{Io}^2)^{\frac{\alpha_r}{2}}} - \frac{Z_Q Q_o V_R (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\beta_r - 2}{2}}}{(V_{Ro}^2 + V_{Io}^2)^{\frac{\beta_r}{2}}} \right] \quad (4.118)$$

El vector \mathbf{G} correspondiente a la carga es:

$$\mathbf{G}_R = \mathbf{Y}_{vR} + \frac{Z_P P_o V_R (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\alpha_t - 2}{2}}}{(V_{R_o}^2 + V_{I_o}^2)^{\frac{\alpha_t}{2}}} + \frac{Z_Q Q_o V_I (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\beta_t - 2}{2}}}{(V_{R_o}^2 + V_{I_o}^2)^{\frac{\beta_t}{2}}} \quad (4.119)$$

$$\mathbf{G}_I = \mathbf{Y}_{vI} + \frac{Z_P P_o V_I (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\alpha_t - 2}{2}}}{(V_{R_o}^2 + V_{I_o}^2)^{\frac{\alpha_t}{2}}} - \frac{Z_Q Q_o V_R (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\beta_t - 2}{2}}}{(V_{R_o}^2 + V_{I_o}^2)^{\frac{\beta_t}{2}}} \quad (4.120)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{A}_D para la carga están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial Z_P} = 1 + \frac{dt}{2T_P} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_t} \quad (4.121)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial Z_Q} = 0 \quad (4.122)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial Z_P} = 0 \quad (4.123)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial Z_Q} = 1 + \frac{dt}{2T_Q} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_t} \quad (4.124)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{B}_D para la carga están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial V_R} = -\frac{dt}{2T_P} V_R \left[\alpha_s \frac{V^{\alpha_s - 2}}{V_o^{\alpha_s}} - Z_P \alpha_t \frac{V^{\alpha_t - 2}}{V_o^{\alpha_t}} \right] \quad (4.125)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial V_I} = -\frac{dt}{2T_P} V_I \left[\alpha_s \frac{V^{\alpha_s - 2}}{V_o^{\alpha_s}} - Z_P \alpha_t \frac{V^{\alpha_t - 2}}{V_o^{\alpha_t}} \right] \quad (4.126)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial V_R} = -\frac{dt}{2T_Q} V_R \left[\beta_s \frac{V^{\beta_s - 2}}{V_o^{\beta_s}} - Z_Q \beta_t \frac{V^{\beta_t - 2}}{V_o^{\beta_t}} \right] \quad (4.127)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_2}{\partial V_I} = -\frac{dt}{2T_Q} V_I \left[\beta_s \frac{V^{\beta_s - 2}}{V_o^{\beta_s}} - Z_Q \beta_t \frac{V^{\beta_t - 2}}{V_o^{\beta_t}} \right] \quad (4.128)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{C}_D para la carga están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial Z_P} = P_o V_R \frac{V^{\alpha_t-2}}{V_o^{\alpha_t}} \quad (4.129)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial Z_P} = P_o V_I \frac{V^{\alpha_t-2}}{V_o^{\alpha_t}} \quad (4.130)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial Z_Q} = Q_o V_I \frac{V^{\beta_t-2}}{V_o^{\beta_t}} \quad (4.131)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial Z_Q} = -Q_o V_R \frac{V^{\beta_t-2}}{V_o^{\beta_t}} \quad (4.132)$$

Los elementos de la matriz \mathbf{Y}_D para la carga están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial V_R} &= \frac{Z_P P_o}{V_o^{\alpha_t}} \left[(\alpha_t - 2) V^{(\alpha_t-4)} V_R^2 + V^{(\alpha_t-2)} \right] \dots \\ &\dots + \frac{Z_Q Q_o}{V_o^{\beta_t}} \left[(\beta_t - 2) V^{(\beta_t-4)} V_R V_I \right] \end{aligned} \quad (4.133)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{G}_R}{\partial V_I} &= \frac{Z_P P_o}{V_o^{\alpha_t}} \left[(\alpha_t - 2) V^{(\alpha_t-4)} V_R V_I \right] \dots \\ &\dots + \frac{Z_Q Q_o}{V_o^{\beta_t}} \left[(\beta_t - 2) V^{(\beta_t-4)} V_I^2 + V^{(\beta_t-2)} \right] \end{aligned} \quad (4.134)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial V_R} &= \frac{Z_P P_o}{V_o^{\alpha_t}} \left[(\alpha_t - 2) V^{(\alpha_t-4)} V_R V_I \right] \dots \\ &\dots - \frac{Z_Q Q_o}{V_o^{\beta_t}} \left[(\beta_t - 2) V^{(\beta_t-4)} V_R^2 + V^{(\beta_t-2)} \right] \end{aligned} \quad (4.135)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{G}_I}{\partial V_I} &= \frac{Z_P P_o}{V_o^{\alpha_t}} \left[(\alpha_t - 2) V^{(\alpha_t-4)} V_I^2 + V^{(\alpha_t-2)} \right] \dots \\ &\dots - \frac{Z_Q Q_o}{V_o^{\beta_t}} \left[(\beta_t - 2) V^{(\beta_t-4)} V_R V_I \right] \end{aligned} \quad (4.136)$$

4.8. Simulación del ULTC

La figura 4.1 muestra el diagrama de flujo simplificado de la herramienta software HAGP. Se observa la acción del ULTC en cada Δt luego haber sido resuelto el sistema de ecuaciones algebraico-diferencial, cambiado la configuración del sistema y calculado las tensiones en las barras en caso de perturbación en este instante.

El modelo dinámico del ULTC no corresponde a un conjunto de ecuaciones diferenciales como se vió en el capítulo 3, su variable de estado (la posición del tap) es de naturaleza discreta. Por tal motivo se utilizó un algoritmo especial que en cada intervalo de tiempo Δt refleja el comportamiento del ULTC en el sistema eléctrico de potencia. En el apéndice B está consignado el diagrama de flujo de la acción del sistema de control del tap.

4.8.1. Reflejo del tap del ULTC en la matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$

En el paquete de computador HAGP se utiliza una matriz \mathbf{Y} cuyos elementos son los componentes de la matriz de admitancia de barras $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$, como es expresado:

$$\mathbf{Y}_{\text{barra}}(m,n) = G + jB \quad (4.137)$$

$$\mathbf{Y}(2m-1, 2n-1) = G \quad (4.138)$$

$$\mathbf{Y}(2m-1, 2n) = -B \quad (4.139)$$

$$\mathbf{Y}(2m, 2n-1) = B \quad (4.140)$$

$$\mathbf{Y}(2m, 2n) = G \quad (4.141)$$

Una vez dada la orden de cambio del tap por el sistema de control automático del ULTC, la matriz de admitancias se afecta de la siguiente forma, ver ecuación (3.76):

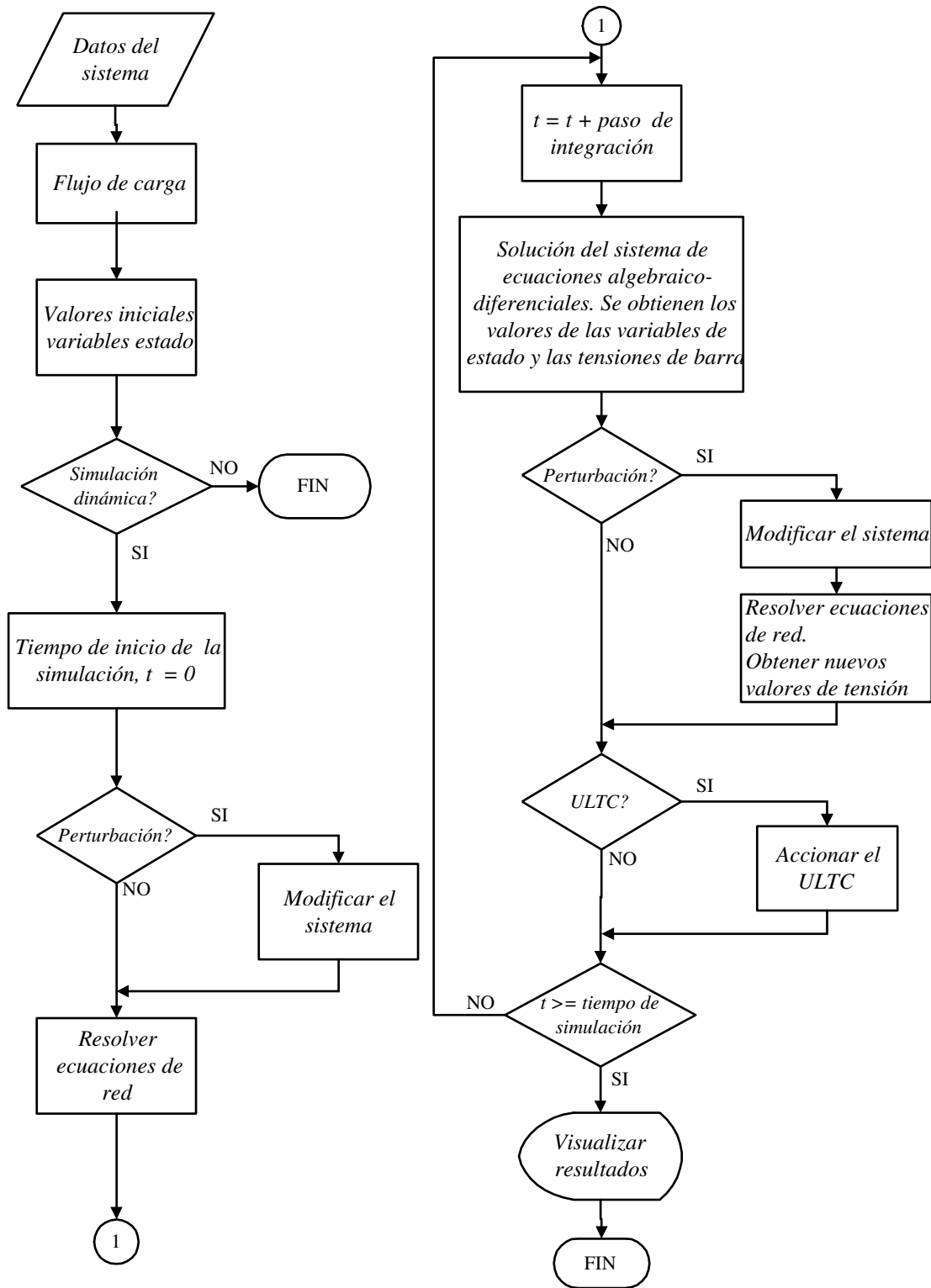


Figura 4.1: Diagrama de flujo simplificado del HAGP

$$\mathbf{Y}(2f-1, 2f-1) = \mathbf{Y}(2f-1, 2f-1) + G_s \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_{ant}^2} \right) \quad (4.142)$$

$$\mathbf{Y}(2f-1, 2f) = \mathbf{Y}(2f-1, 2f) - B_s \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_{ant}^2} \right) \quad (4.143)$$

$$\mathbf{Y}(2f, 2f-1) = \mathbf{Y}(2f, 2f-1) + B_s \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_{ant}^2} \right) \quad (4.144)$$

$$\mathbf{Y}(2f, 2f) = \mathbf{Y}(2f, 2f) + G_s \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_{ant}^2} \right) \quad (4.145)$$

$$\mathbf{Y}(2t-1, 2f-1) = \mathbf{Y}(2t-1, 2f-1) + G_s \left(-\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ant}} \right) \quad (4.146)$$

$$\mathbf{Y}(2t-1, 2f) = \mathbf{Y}(2t-1, 2f) - B_s \left(-\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ant}} \right) \quad (4.147)$$

$$\mathbf{Y}(2t, 2f-1) = \mathbf{Y}(2t, 2f-1) + B_s \left(-\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ant}} \right) \quad (4.148)$$

$$\mathbf{Y}(2t, 2f) = \mathbf{Y}(2t, 2f) + G_s \left(-\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ant}} \right) \quad (4.149)$$

$$\mathbf{Y}(2f-1, 2t-1) = \mathbf{Y}(2f-1, 2t-1) + G_s \left(-\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ant}} \right) \quad (4.150)$$

$$\mathbf{Y}(2f-1, 2t) = \mathbf{Y}(2f-1, 2t) - B_s \left(-\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ant}} \right) \quad (4.151)$$

$$\mathbf{Y}(2f, 2t-1) = \mathbf{Y}(2f, 2t-1) + B_s \left(-\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ant}} \right) \quad (4.152)$$

$$\mathbf{Y}(2f, 2t) = \mathbf{Y}(2f, 2t) + G_s \left(-\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ant}} \right) \quad (4.153)$$

donde:

$Y_s = G_s + jB_s$ es la admitancia del transformador

f = número de la barra no controlada del transformador

t = número de la barra controlada del transformador

n = nuevo valor del tap n_{ant} = anterior valor del tap

Capítulo 5

Resultados numéricos

5.1. Introducción

Este capítulo presenta los resultados numéricos obtenidos al aplicar el conjunto de funciones desarrolladas e incluidas en el paquete HAGP. La validez de tales resultados será comprobada mediante la comparación de éstos con los resultados obtenidos con otros paquetes computacionales.

5.2. Herramientas computacionales

Se utilizaron tres herramientas para la simulación: el paquete HAGP [Rodríguez, 2003], modificado en este trabajo de grado y los paquetes computacionales SIMPOW [ABB, 2001] y SIMULINK para la comprobación de resultados.

5.2.1. El paquete HAGP

El paquete HAGP (Herramienta Software para el Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación de Sistemas Eléctricos de Potencia), es un conjunto de funciones elaboradas en MATLAB que permite realizar análisis de estabilidad de ángulo y de tensión de gran perturbación en sistemas de tamaño pequeño y mediano.

Incluye modelos detallados de los generadores y sus controles asociados (sistema de excitación y sistema de regulación carga-velocidad y turbina), modelos estáticos de cargas (modelo ZIP), modelos dinámicos de cargas (motor de inducción, carga regulada

por termostato) y elementos de control del sistema (transformadores con cambia tap automático y compensadores estáticos de reactiva). Las principales características del paquete son las siguientes:

- Resuelve flujo de cargas a través del paquete MATPOWER [Zimmerman y Gan, 1997] para obtener los valores iniciales de las variables de interés.
- Emplea un paso de tiempo fijo durante todo el intervalo de simulación.
- Utiliza la regla trapezoidal para resolver las ecuaciones diferenciales y algebraicas del sistema.
- Genera gráficas de la respuesta en el tiempo de las diferentes cantidades del sistema.
- Los datos de entrada de red y de los elementos dinámicos se introducen en archivos MATLAB.
- Sólo permite evaluar el comportamiento dinámico del sistema en condiciones balanceadas.

Una descripción detallada del paquete HAGP está incluida en el apéndice D, que contiene el manual del usuario.

5.2.2. El paquete SIMPOW

El paquete SIMPOW es un programa industrial desarrollado por Asea Brown Boveri (ABB) [ABB, 2001]. Incluye las siguientes funciones especiales:

- OPTPOW, herramienta para análisis de flujo de cargas.
- DYNPOW, herramienta para análisis dinámico. Permite evaluar la estabilidad de gran perturbación mediante simulación en el dominio del tiempo. Posee diferentes métodos numéricos para resolver las ecuaciones del sistema.
- DYNPOST, herramienta de almacenamiento de resultados gráficos.
- STAPOW, herramienta para análisis de fallas.
- DSL, herramienta para elaboración de nuevos modelos.

5.2.3. El paquete SIMULINK

SIMULINK es un paquete software para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Esta herramienta soporta sistemas lineales y no lineales, modelados en el tiempo continuo, discreto o un híbrido de ambos.

SIMULINK provee una interfaz gráfica de usuario para la creación de modelos en forma de diagramas de bloques. Incluye una extensa librería que comprende elementos de diferentes tipos. Permite además crear bloques con modelos propios. Luego de definir el modelo del sistema se simula su comportamiento sobre un intervalo de tiempo especificado.

5.3. Ejemplos implementados en HAGP

A continuación se presentan los datos y resultados de los ejemplos de sistemas eléctricos de potencia implementados en los paquetes HAGP, SIMULINK y SIMPOW.S

5.3.1. Ejemplo caso 1

El sistema de 500 MVA, ilustrado en la figura 5.1, está compuesto por un motor de inducción conectado a una barra infinita a través de un transformador y dos líneas de transmisión.

La perturbación considerada es un cortocircuito trifásico sólido en un extremo del circuito #2 entre las barras 2 y 1 como se muestra en la figura 5.1. La falla es despejada abriendo ambos extremos de la línea en 70 ms.

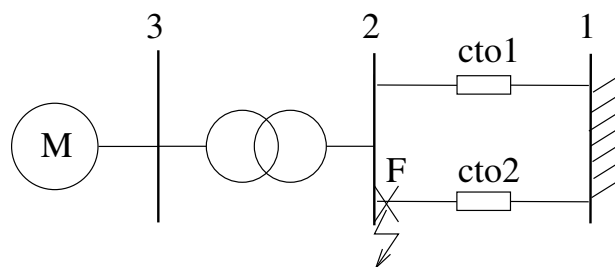


Figura 5.1: Sistema caso 1

Los parámetros de las líneas de transmisión se muestran en la tabla 5.1. Los datos de transformadores se especifican en la tabla 5.2. La potencia reactiva suministrada por los condensadores está contenida en la tabla 5.3. Los datos del motor de inducción se encuentran consignados en la tabla 5.4.

Tabla 5.1: Líneas de Transmisión (500 MVA)

Línea	Cto	R	X	B
1 – 2	1	0,0	0,5295	0,03696
1 – 2	2	0,0	0,5295	0,03696

Tabla 5.2: Transformadores (500 MVA)

Transformador	Primario	Secundario	R	X	tap
T1	Barra #2	Barra #3	0,0	0,0833	1,0383

Tabla 5.3: Condensadores en paralelo

Barra	MVAr
2	153
3	262

Tabla 5.4: Parámetros del motor de inducción (500 MVA)

Parámetro	Valor
R_s	0,031
X_s	0,1
R_r	0,018
X_r	0,18
X_m	3,2
H	0,7s
T_0	0,5982 pu
P_m (MW)	300
Q_m (MVAR)	200

Las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 muestran la respuesta en el tiempo de la tensión en bornes, de la velocidad del motor y la potencia inyectada en la barra 3 respectivamente ante una perturbación. La tensión cae a una magnitud baja y el motor comienza a desacelerar continuamente. A su vez, la potencia activa demandada disminuye.

5.3.2. Ejemplo caso 2

El sistema de potencia de 1000 MVA, ilustrado en la figura 5.5, está compuesto por una carga controlada por termostato conectada a una barra infinita a través de dos líneas de transmisión y transformadores. La perturbación considerada es la pérdida de una de las líneas entre las barras 2 y 3, sin ocurrir falla. Los parámetros de las líneas de transmisión se muestran en la tabla 5.5. Los datos de transformadores se especifican en la tabla 5.6. Los datos de la carga controlada termostáticamente se muestran en la tabla 5.7.

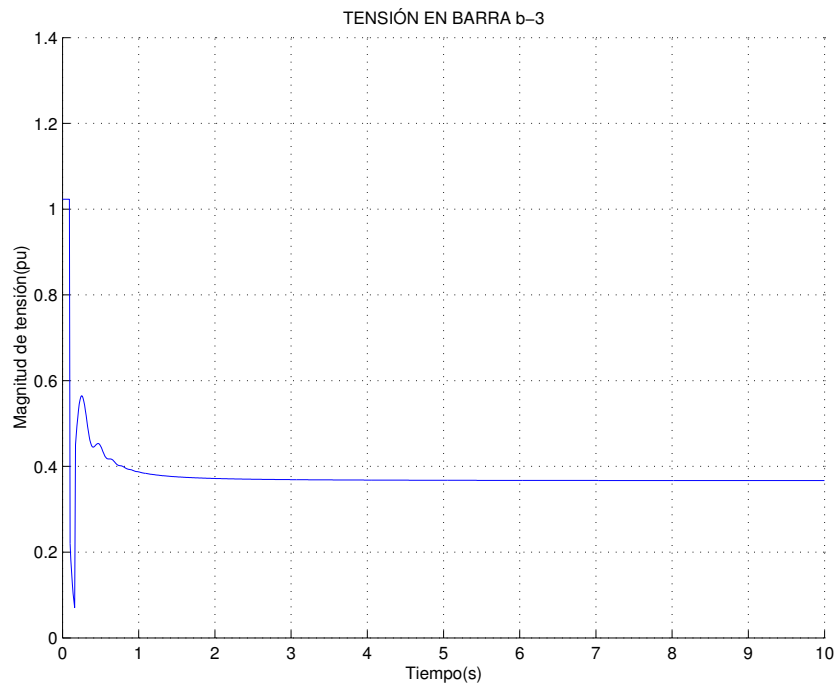
Tabla 5.5: Líneas de Transmisión (1000 MVA)

Línea	Cto	R	X	B
2 – 3	1	0,0	0,2	0,0
2 – 3	2	0,0	0,2	0,0

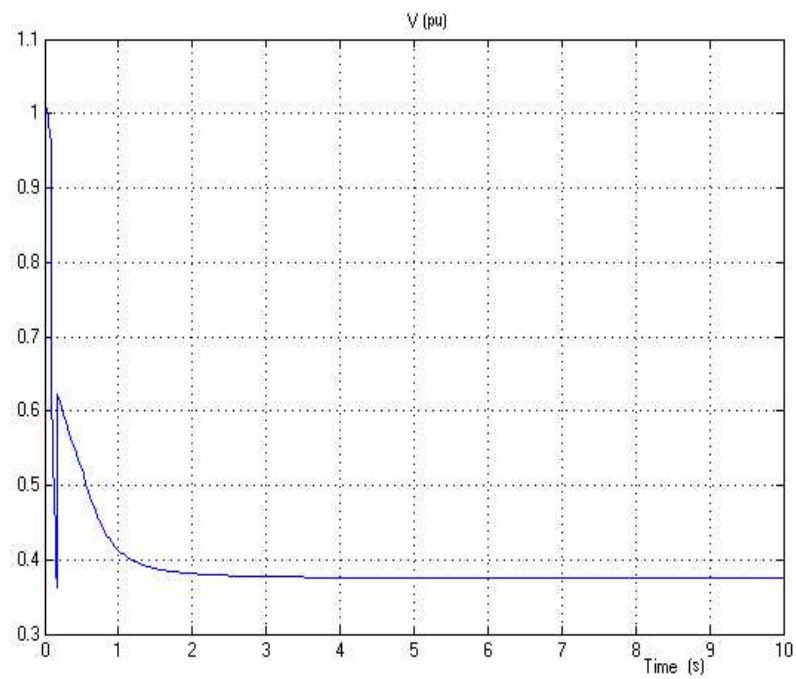
Tabla 5.6: Transformadores (1000 MVA)

Transformador	R	X	tap
T1	0,0	0,05	1,0
T2	0,0	0,05	1,0

Las figuras 5.6 y 5.7 muestran la respuesta en el tiempo de la tensión y conductancia en la barra 4 respectivamente. Inicialmente la tensión cae gracias al efecto de la salida de la línea. El control termostático comienza a restaurar la carga elevando su conductancia. Esto produce una caída más pronunciada en la tensión posterior a la perturbación. Debido a las magnitudes bajas de las constantes de tiempo de retardo utilizadas, este efecto es muy notable en los primeros 20 segundos de la simulación.

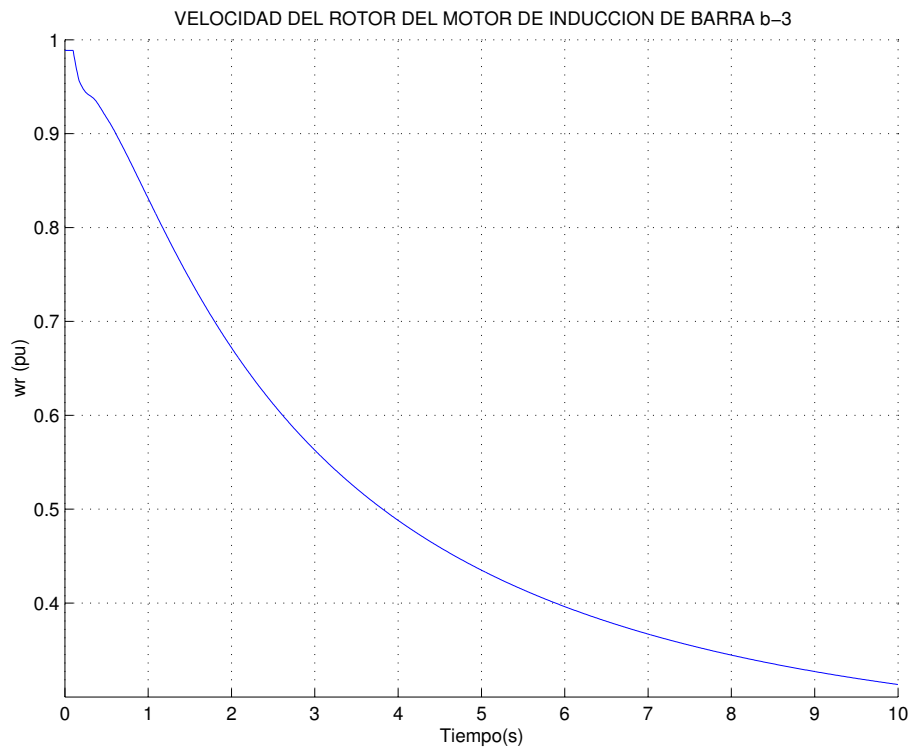


a)

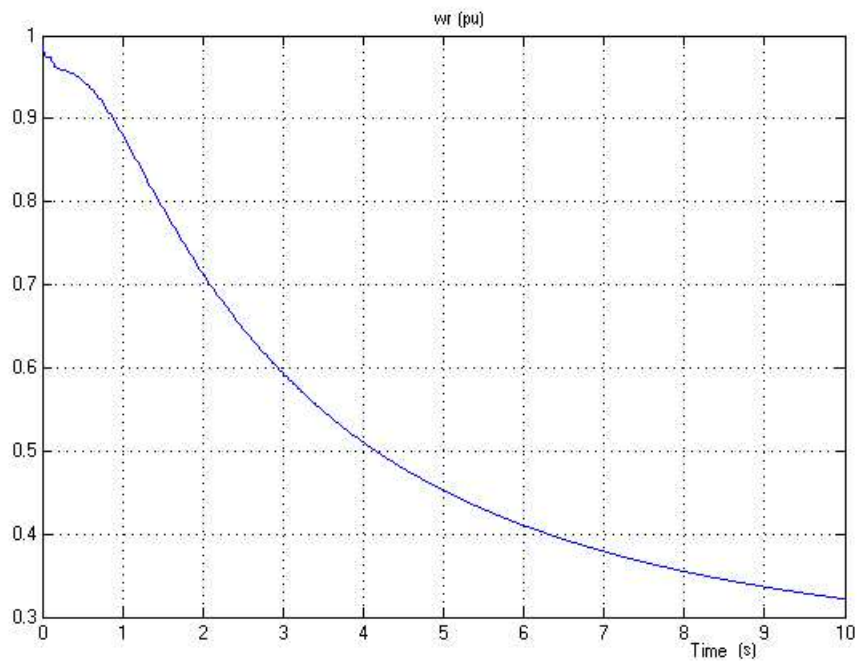


b)

Figura 5.2: Tensión en la barra 3, ejemplo caso1 a) HAGP b) Simulink

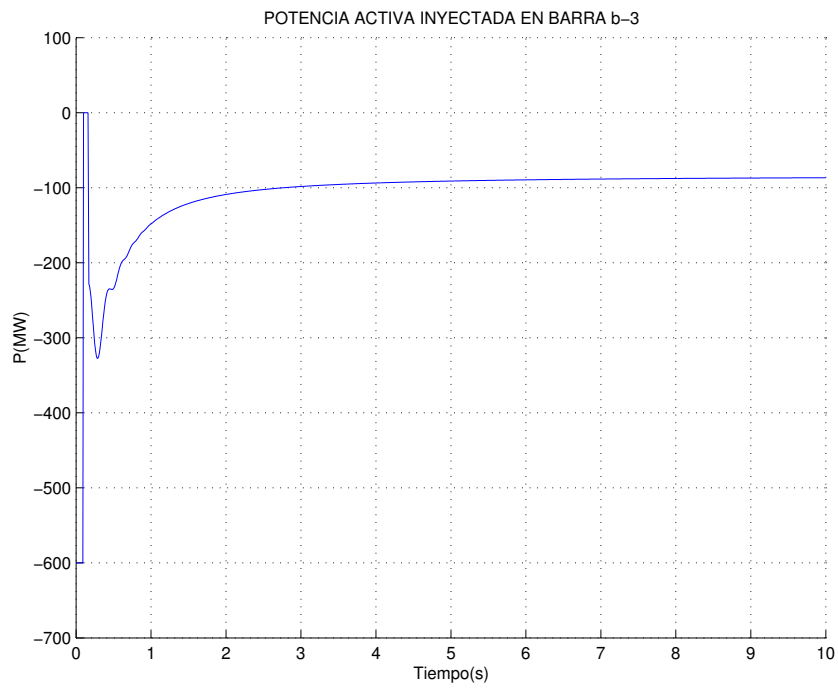


a)

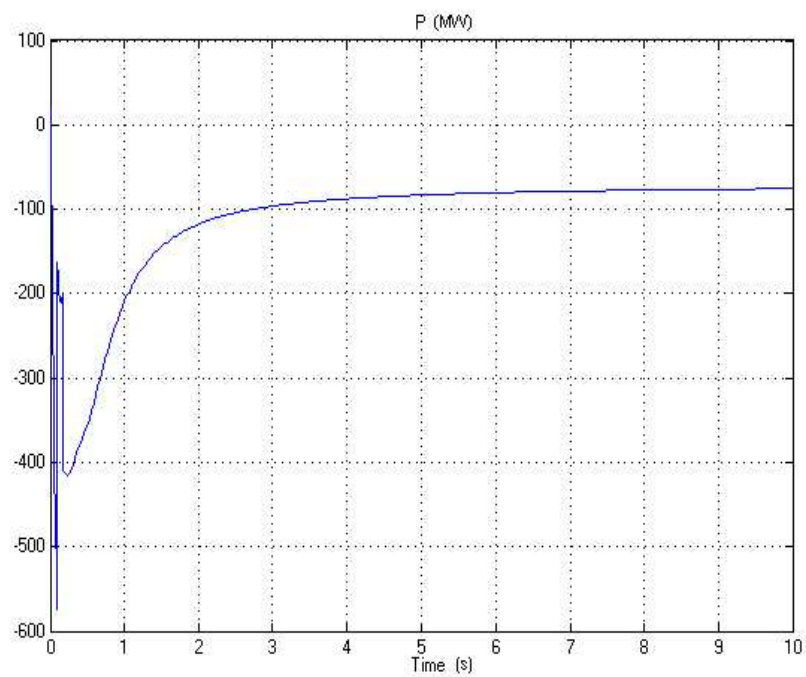


b)

Figura 5.3: Velocidad del rotor, ejemplo caso1 a) HAGP b) Simulink



a)



b)

Figura 5.4: Potencia activa inyectada en la barra 3, ejemplo caso1 a) HAGP b) Simulink

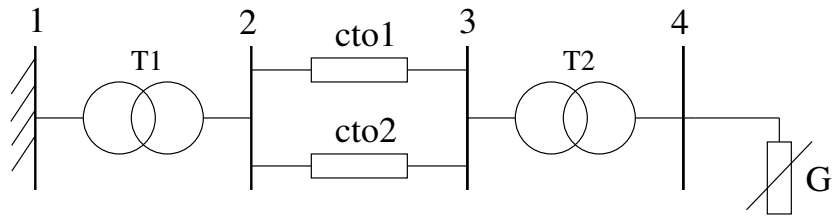
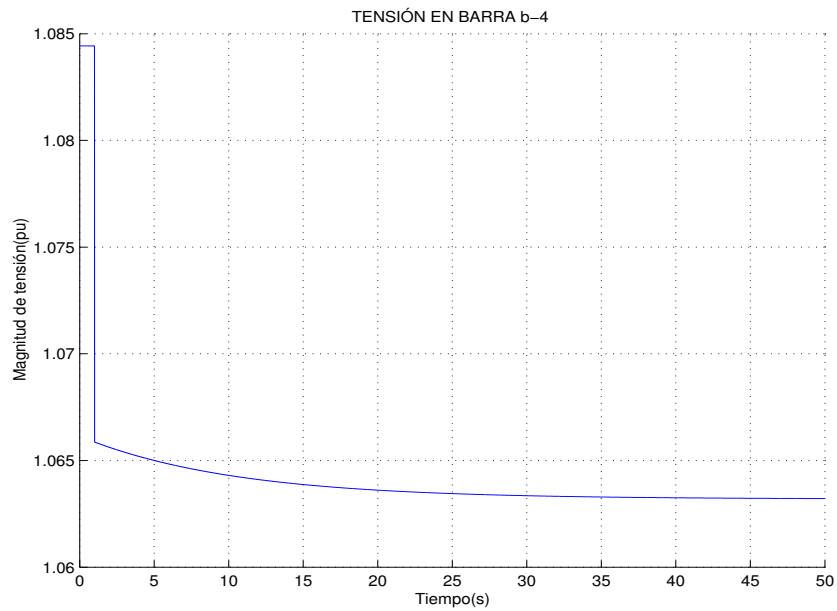


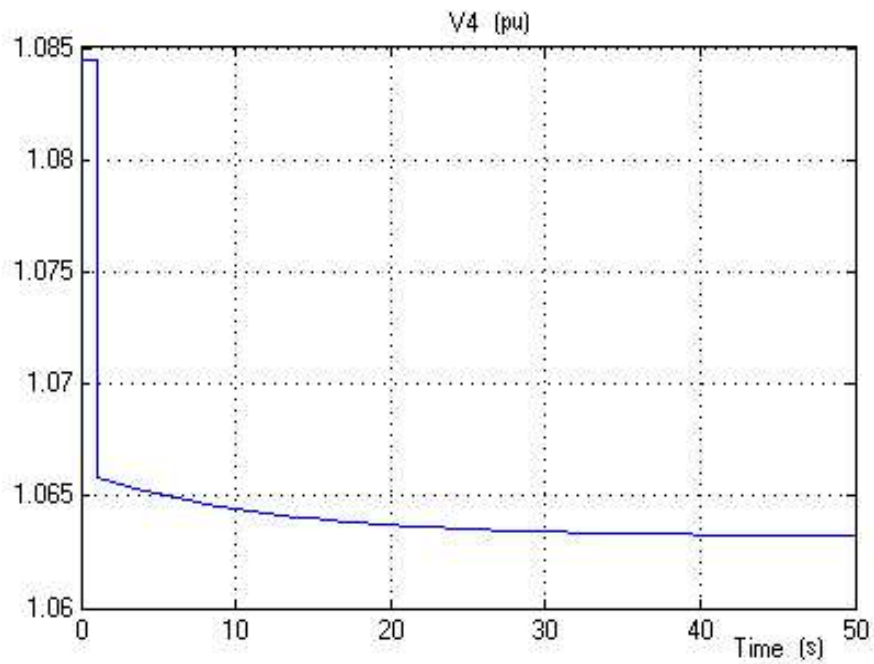
Figura 5.5: Sistema caso 2

Tabla 5.7: Parámetros de la carga controlada por termostato

Parámetro	Valor
T_1	10
K_p	1
T_C	10
K_I	1
K_1	1
FG_{max}	4
τ_A	28°C
P(MW)	1000

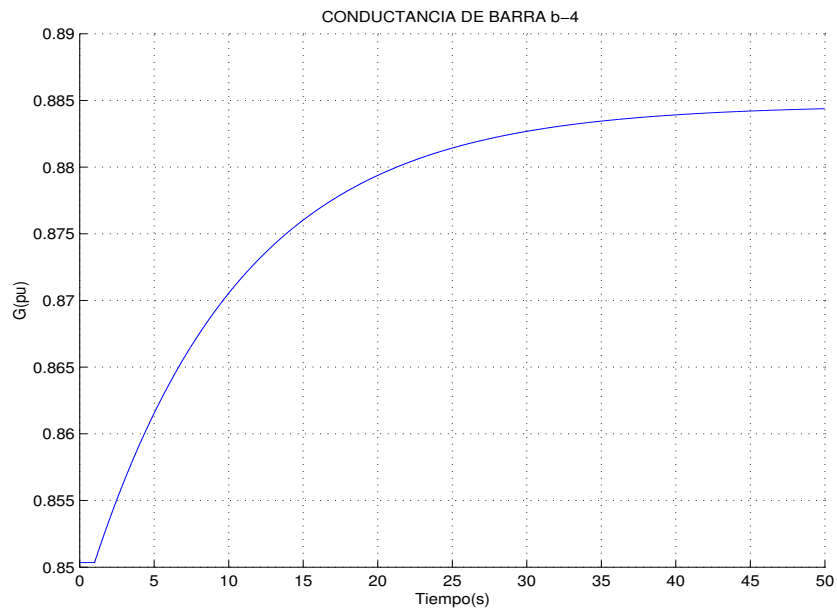


a)

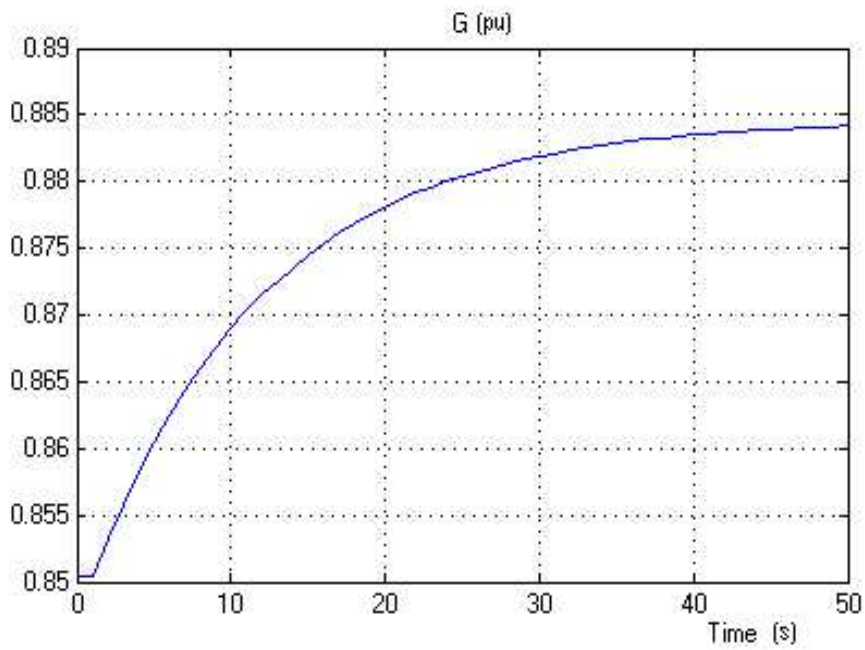


b)

Figura 5.6: Tensión en la barra 3, ejemplo caso 2 a) HAGP b) Simulink



a)



b)

Figura 5.7: Conductancia, ejemplo caso 2 a) HAGP b) Simulink

5.3.3. Ejemplo caso 3

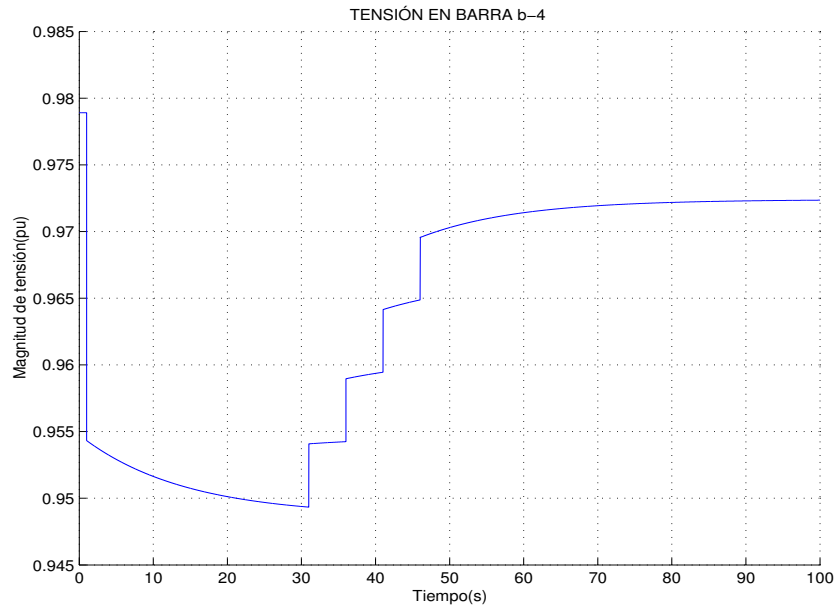
El sistema de potencia de la sección 5.3.2, figura 5.5, se analiza reemplazando el transformador convencional T2 por un ULTC. Los parámetros del sistema de control del ULTC son los siguientes:

1. Tiempo de retraso para el primer movimiento del tap: 30 s
2. Tiempo de retraso para movimientos posteriores del tap: 5 s
3. Banda muerta: $\pm 1\%$ pu de la tensión de barra
4. Rango del Tap: ± 16 pasos
5. Medida del paso: $5/8\%$ ($=0,00625$ pu)

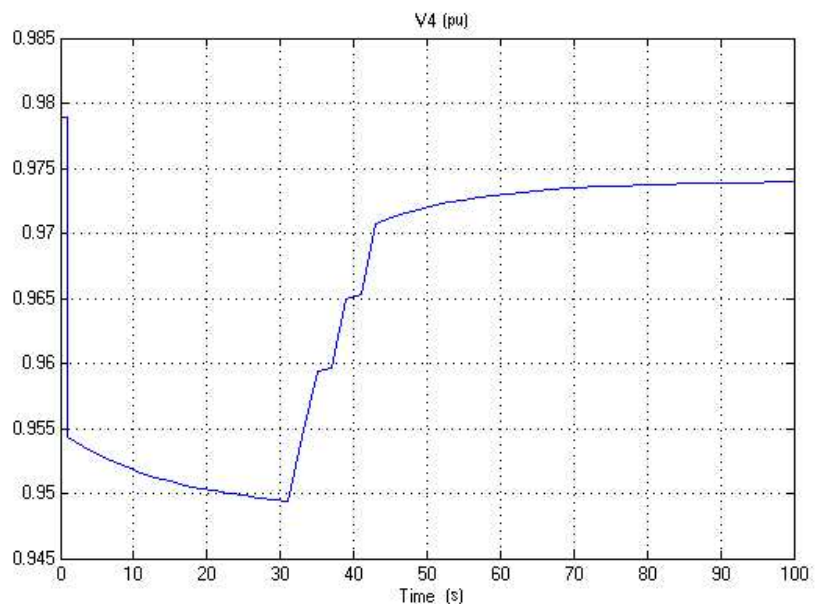
Las figuras 5.8 muestran la respuesta en el tiempo de la tensión en la barra 4. Las figuras 5.9 muestran la respuesta en el tiempo del tap del ULTC. Inicialmente la tensión cae gracias al efecto de la pérdida de la línea. Alrededor de los 30 segundos, el ULTC reacciona disminuyendo la posición del tap y elevando así la tensión de la barra 4 a un valor muy cercano al valor de referencia; luego se mantiene constante durante el resto del tiempo.

De las figuras se observa que los resultados obtenidos con el paquete HAGP y SIMULINK son similares en forma cualitativa, de tal manera que ambos predicen la estabilidad del sistema. Numéricamente los resultados divergen un poco. Las posibles razones son las siguientes:

- Los modelos utilizados para representar el ULTC y la carga controlada termostáticamente difieren de un paquete a otro.
- El método numérico es distinto para cada paquete. El paquete HAGP utiliza la regla trapezoidal para todas las variables de estado y las tensiones en la red. De otro lado, en el paquete SIMULINK las ecuaciones diferenciales y algebraicas se resuelven separadamente. Las ecuaciones diferenciales se resuelven empleando el método de Runge-Kutta.

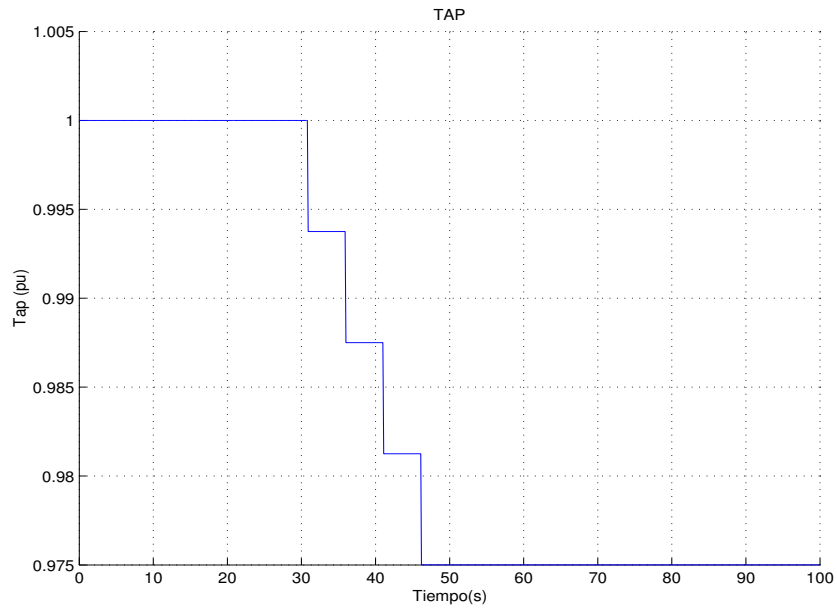


a)

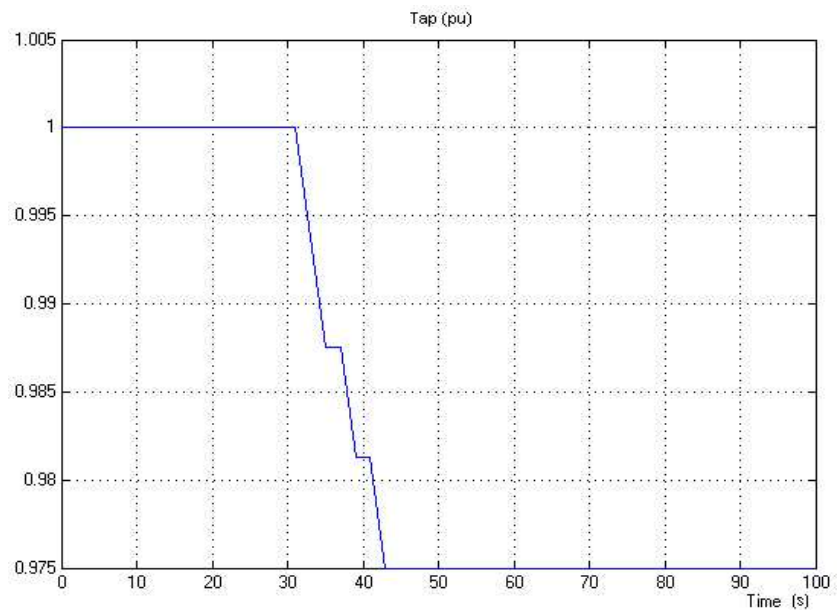


b)

Figura 5.8: Tensión en la barra 3, ejemplo caso 3 a) HAGP b) Simulink



a)



b)

Figura 5.9: Posición del tap, ejemplo caso 3 a) HAGP b) Simulink

5.3.4. Ejemplo caso 4

El sistema del ejemplo caso SVC comprende dos áreas interconectadas débilmente, conformada cada una por dos generadores. El sistema se ilustra en la figura 5.10. Se considera un SVC conectado a la barra 8. Los datos del SVC se encuentran en la tabla 5.8.

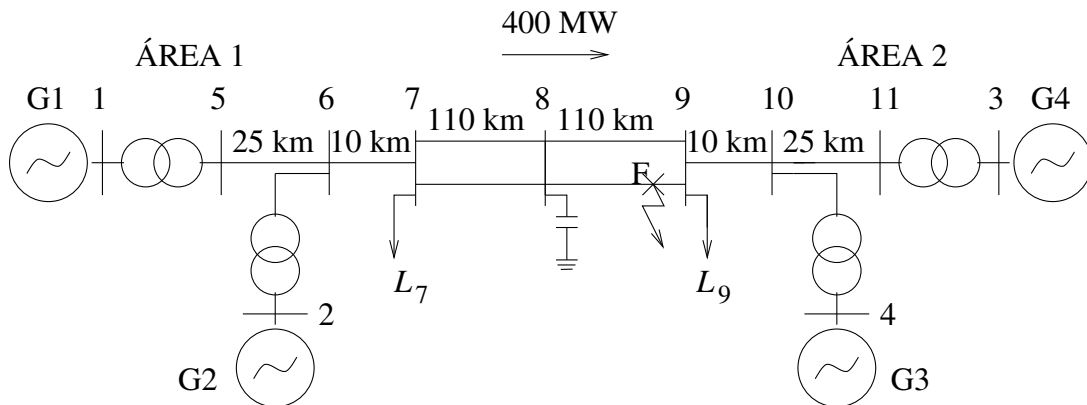


Figura 5.10: Sistema ejemplo del caso 4

Tabla 5.8: Parámetros del SVC

Parámetro	Valor
V_{ref}	1
T_n	0,65s
T_d	0,2
T_r	0,02
k	1
B_{max} (MVAR)	200
B_{min} (MVAR)	0

Los cuatro generadores del sistema son casi idénticos. Los parámetros en por unidad tomando como base 900 MVA y 20 kV están contenidos en la tabla 5.9. Cada transformador elevador tiene una impedancia de $0 + j0,15$ pu tomando como base 900 MVA y 20/230 kV, el tap tiene un valor de 1 pu. Los parámetros de las líneas de transmisión tomando como base 230 kV y 100 MVA son los siguientes:

$$r = 0,0001 \text{ pu/km} , x_L = 0,001 \text{ pu/km} , b_C = 0,00175 \text{ pu/km}$$

Tabla 5.9: Parámetros de los generadores del ejemplo caso SVC

Parámetro	Valor
X_d	1,8
X_q	1,7
X'_d	0,3
X'_q	0,55
X''_d	0,25
X''_q	0,25
X_l	0,2
R_a	0,0025
T'_{do}	8s
T'_{qo}	0,4s
T''_{do}	0,03s
T''_{qo}	0,05s
A_{sat}	0,015
B_{sat}	9,6
Ψ_{t1}	0,9
Ψ_{t2}	∞
H para G1 y G2	6,5s
H para G3 y G4	6,175s
K_D	0

La longitud de las líneas aparece en la figura 5.10. La condición operativa inicial del sistema se muestra en la tabla 5.10. Las cargas y la potencia reactiva suministrada por los bancos de condensadores se muestran en las tablas 5.11 y 5.12 respectivamente.

Tabla 5.10: Condición operativa inicial

Magnitud	G1	G2	G3	G4
P (MW)	700	700	719	700
Q (MVAR)	185	235	176	202
\vec{E}_t (pu)	$1,03 \angle 20,2^\circ$	$1,01 \angle 10,5^\circ$	$1,03 \angle -6,8^\circ$	$1,01 \angle -17^\circ$

Tabla 5.11: Datos de carga

Barra	P(MW)	Q(MVAr)
7	967	100
9	1767	100

Tabla 5.12: Condensadores en paralelo

Barra	MVAr
7	200
9	350

Las componentes de potencia activa se modelan como cargas de corriente constante y las de potencia reactiva como cargas de impedancia constante. Se evalúa el comportamiento del sistema ante la ocurrencia de un cortocircuito trifásico sólido en el circuito # 1 entre las barras 7 y 8. La falla se despeja abriendo simultáneamente los interruptores en ambos extremos de la línea, 80 ms luego de su ocurrencia. Se consideran dos tipos de control:

- Tensión constante en el devanado de excitación de los generadores.
- Sistema de excitación tipo DC1A [Rodríguez, 2003]. Los parámetros están contenidos en la tabla 5.13. Los parámetros R_c , X_c , T_b y T_c no se utilizan debido a que no existen compensadores en este caso.

Tabla 5.13: Parámetros del sistema de excitación DC1A

Parámetro	Valor
K_a	20
T_a	0,055s
T_e	0,36s
K_f	0,125
T_f	1,8s
A_{ex}	0,0056
B_{ex}	1,075
T_r	0,05
V_{rmax}	7,0
V_{rmin}	-6,6

En este sistema, que consta de dos áreas interconectadas, los resultados muestran que con tensión de excitación constante se presentan oscilaciones hasta desembocar en colapso de tensión alrededor de los seis segundos. Esto se ilustra en las figuras 5.11 a la 5.13.

Con excitación tipo DC1A para todos los generadores y sin el SVC, el sistema presenta problemas de estabilidad de tipo oscilatorio como se observa en la figura 5.14. Las figuras 5.15 a la 5.17 exponen los resultados obtenidos al implementar el SVC en la barra 8; en este caso, las oscilaciones son amortiguadas, mas sin embargo la inestabilidad oscilatoria persiste.

De las figuras se observa que los resultados obtenidos con ambos paquetes son similares en forma cualitativa, de tal manera que ambos predicen la estabilidad del sistema. Numéricamente los resultados difieren un poco. Las posibles razones son las siguientes:

- El modelo utilizado para representar el SVC, la saturación magnética de la máquina síncrona y del excitador (en el caso del tipo DC1A) difiere de un paquete a otro. Por lo tanto la mayor discrepancia en los resultados se da cuando se incluye el sistema de excitación tipo DC1A.
- El método numérico es distinto para cada paquete. El paquete SIMPOW varía el tamaño del paso de integración durante la simulación y utiliza la regla trapezoidal sólo para las variables de estado con constantes de tiempo más elevadas. De otro lado, el paquete HAGP utiliza la regla trapezoidal para todas las variables de

estado y las tensiones en la red, y el tamaño del paso de integración es fijo durante la simulación.

En este ejemplo se observa el impacto de los controles de excitación en la estabilidad del sistema.

5.3.5. Ejemplo caso 5

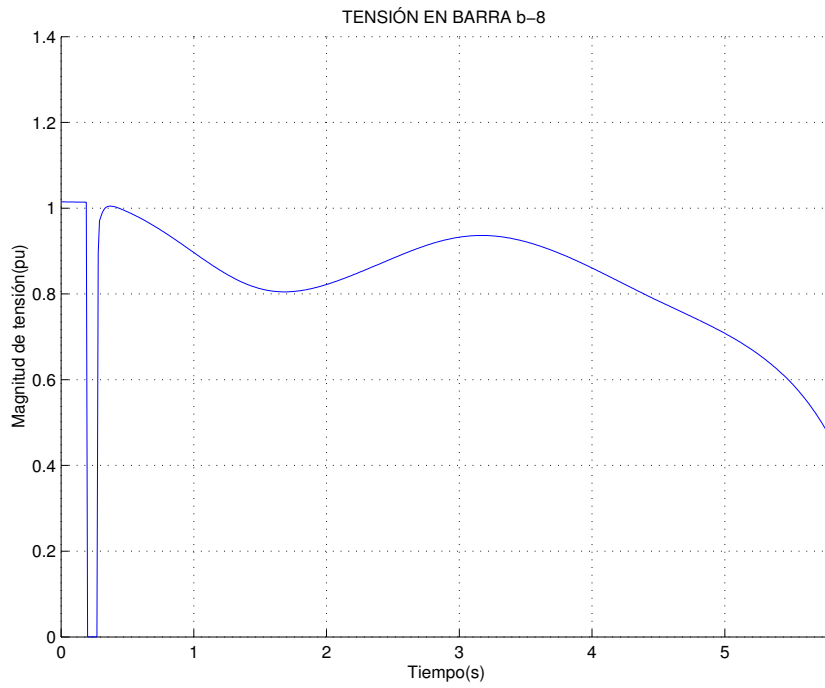
El sistema de potencia de 1000 MVA, ilustrado en la figura 5.18, está compuesto por una carga genérica conectada a una barra infinita a través de dos líneas de transmisión. La perturbación considerada es la pérdida del circuito 2 de la línea entre las barras 1 y 2, sin ocurrir falla. Los parámetros de las líneas de transmisión se muestran en la tabla 5.14. Los datos de la carga se encuentran consignados en la tabla 5.15.

Tabla 5.14: Líneas de Transmisión (1000 MVA)

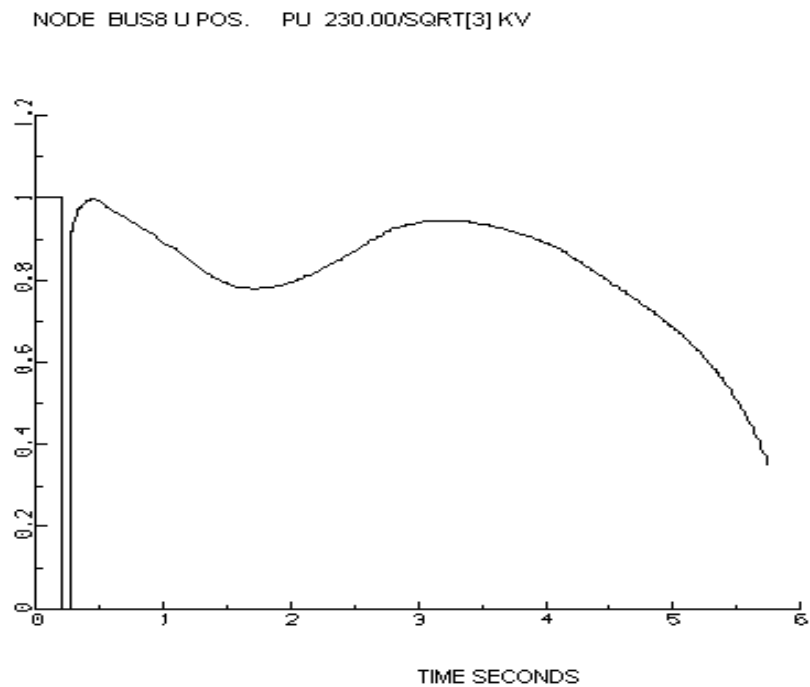
Línea	Cto	R	X
1 – 2	1	0,0	0,43
1 – 2	2	0,0	0,40

Tabla 5.15: Parámetros de carga

Parámetro	Valor
T_P	300s
T_Q	300s
α_s	0,5
β_s	0,8
α_t	1
β_t	2
Z_P^{mn}	0,0
Z_P^{max}	2
Z_Q^{mn}	0,0
Z_Q^{max}	2
P(MW)	1000
Q(MVAR)	500

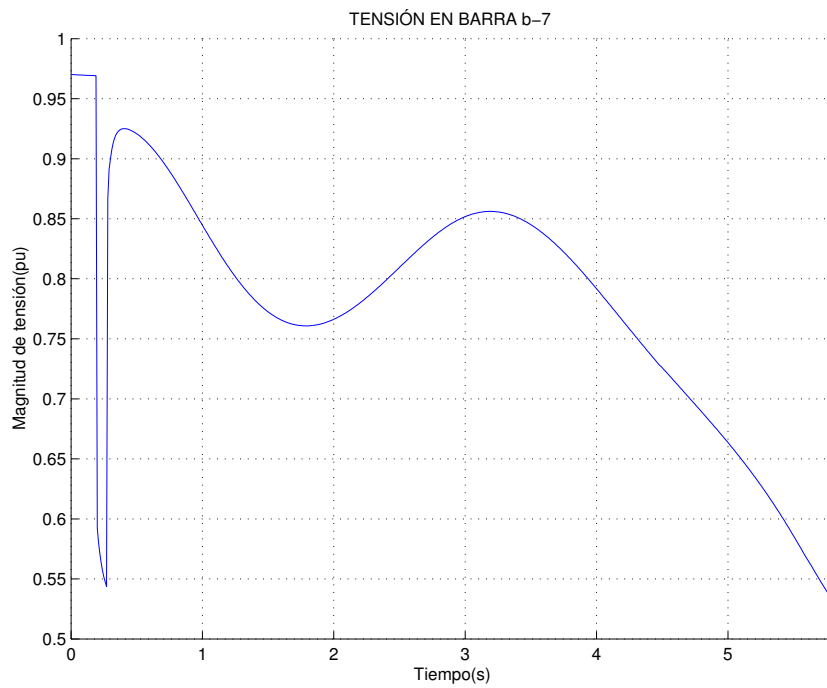


a)



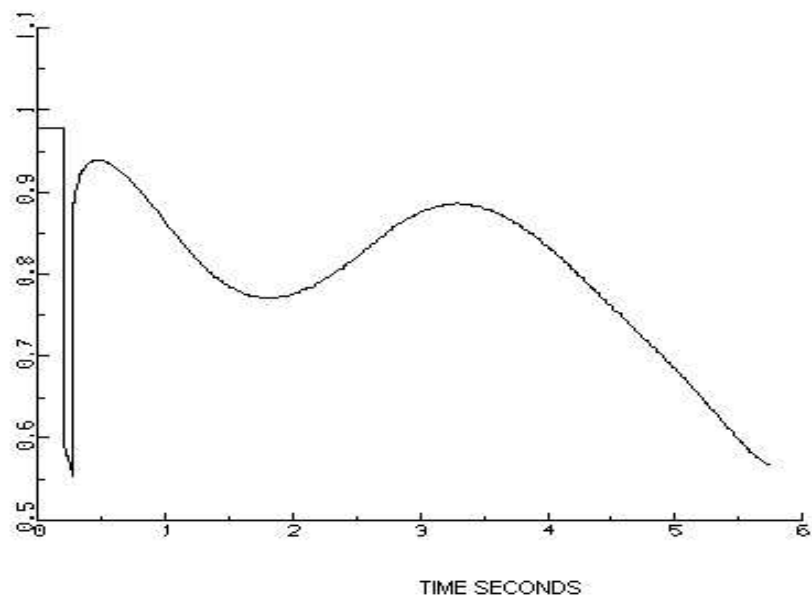
b)

Figura 5.11: Tensión en la barra 8 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Tensión de excitación constante.



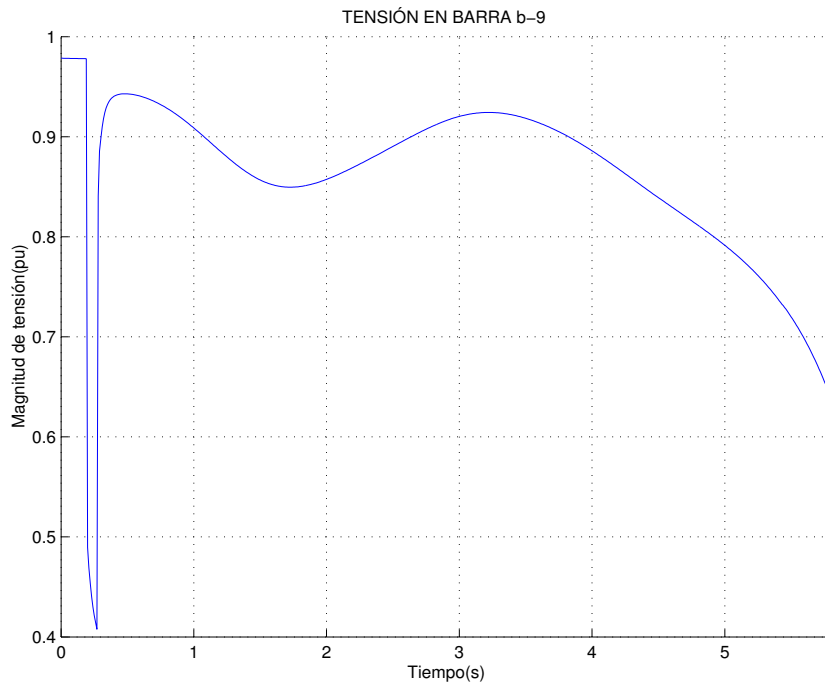
a)

NODE BUS7 U POS. PU 230.00/SQRT[3] KV

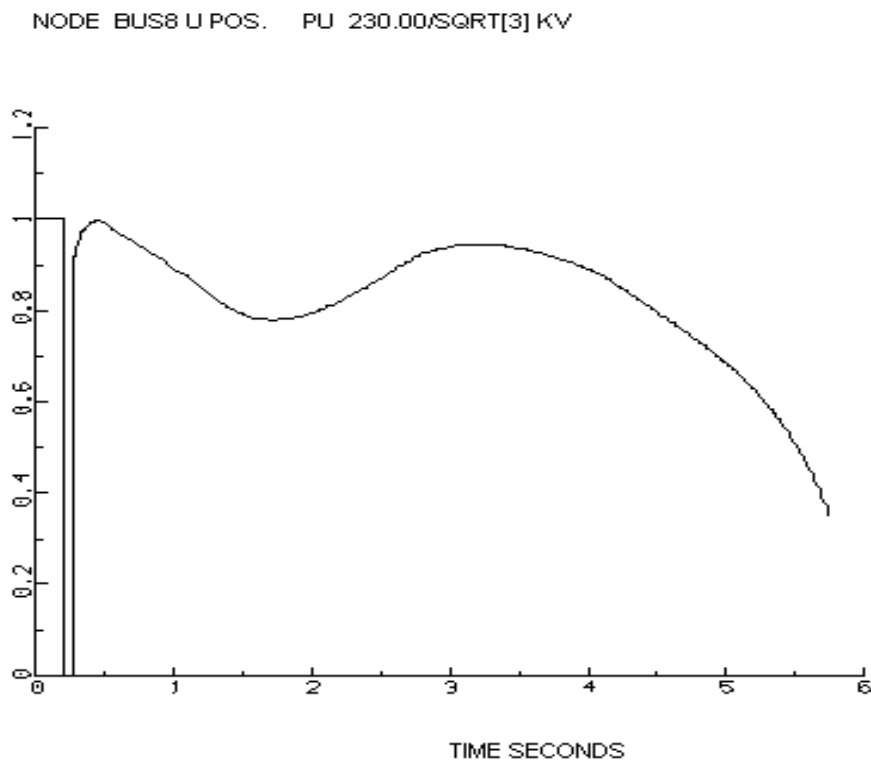


b)

Figura 5.12: Tensión en la barra 7 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Tensión de excitación constante.

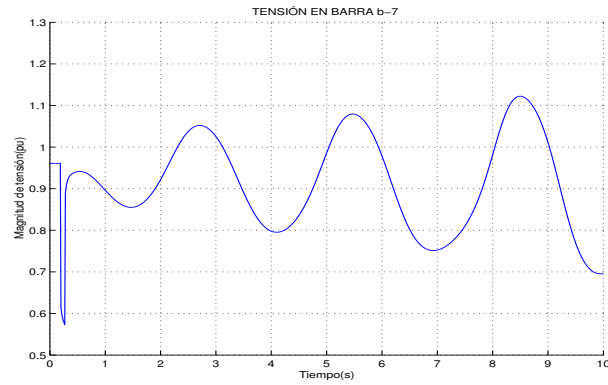


a)

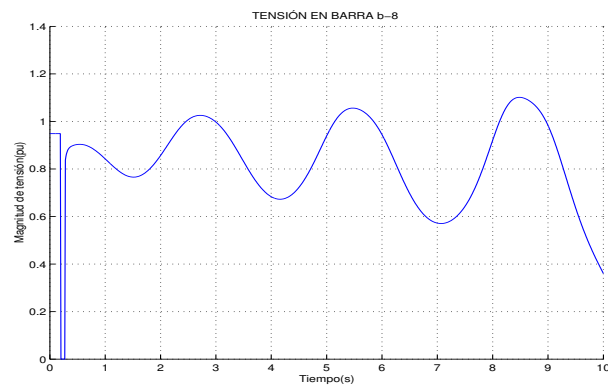


b)

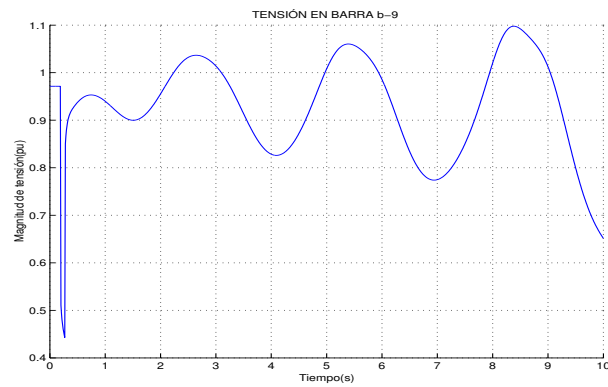
Figura 5.13: Tensión en la barra 9 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Tensión de excitación constante.



a)

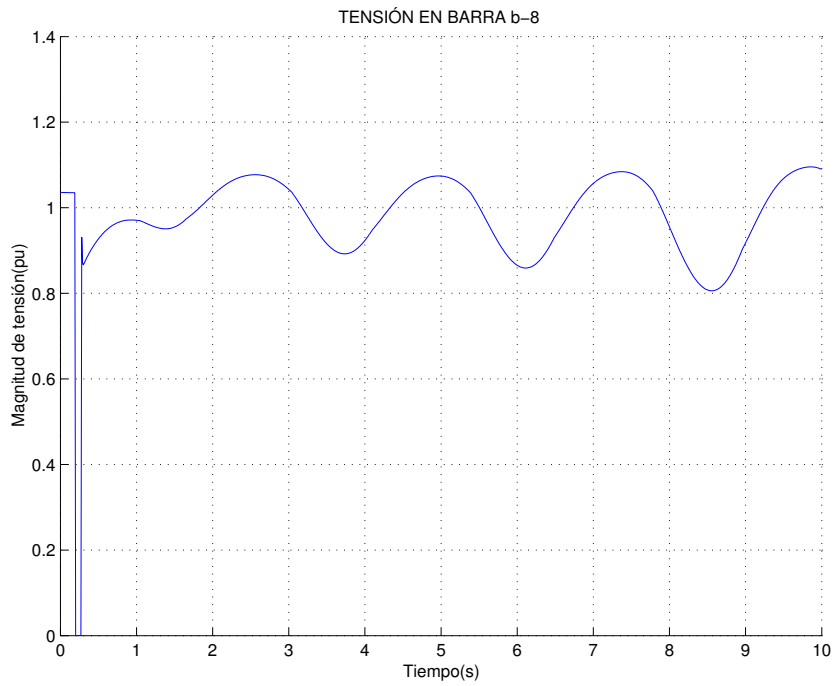


b)

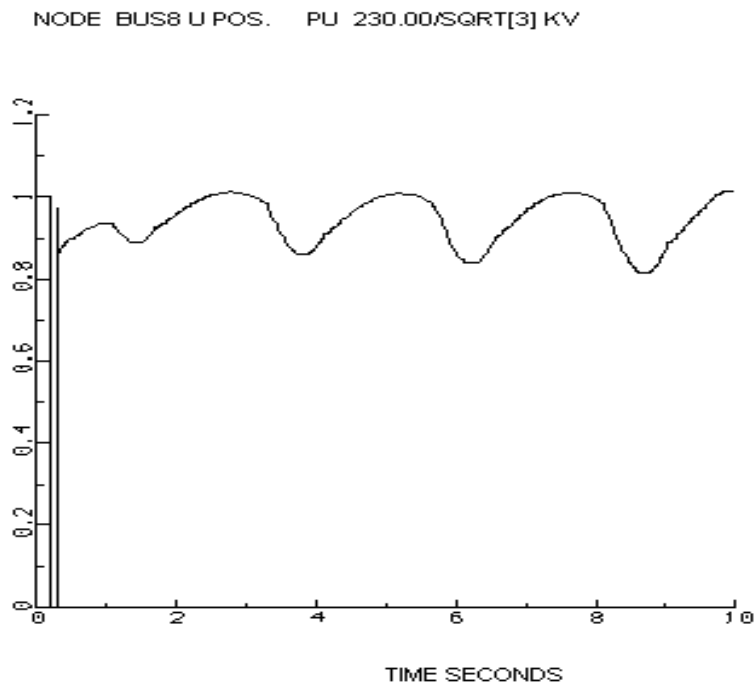


c)

Figura 5.14: a) Tensión en la barra 7. b) Tensión en la barra 8. c) Tensión en la barra 9. Ejemplo caso 4 sin SVC. Excitador tipo DC1A.

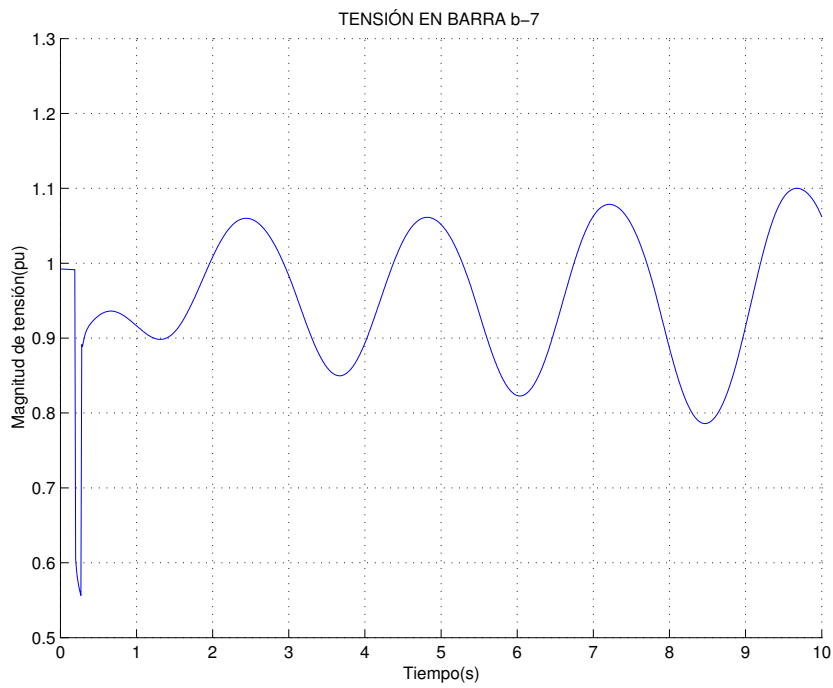


a)

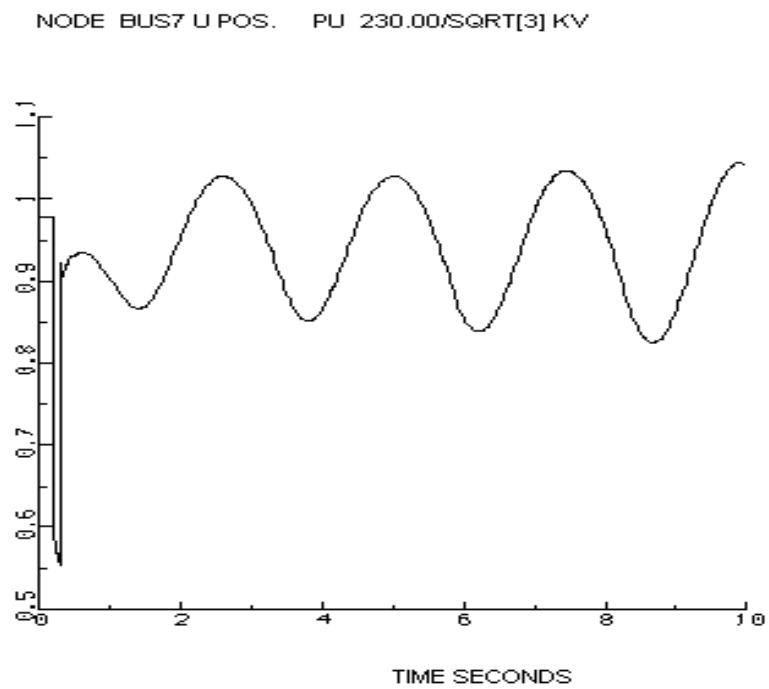


b)

Figura 5.15: Tensión en la barra 8 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Excitador tipo DC1A.

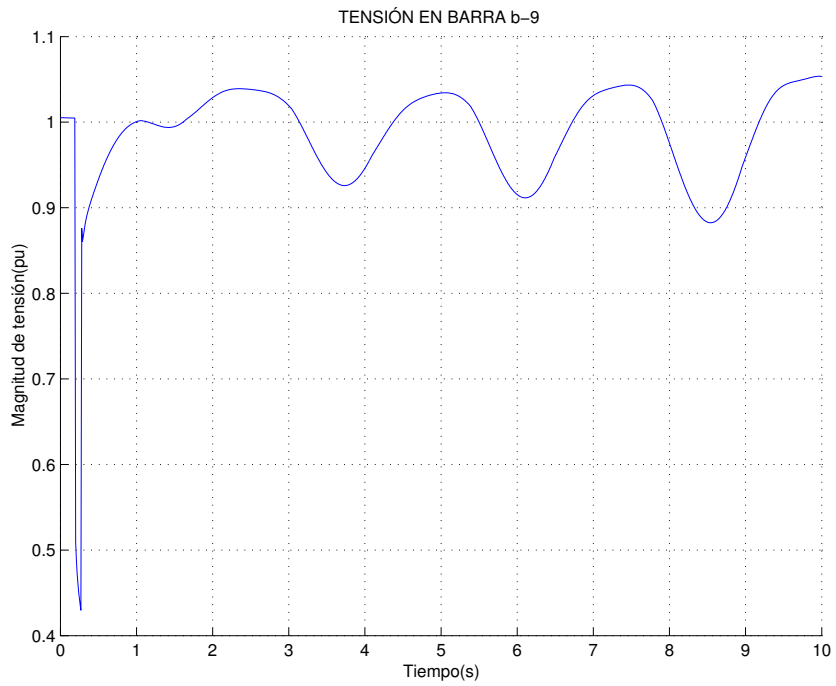


a)

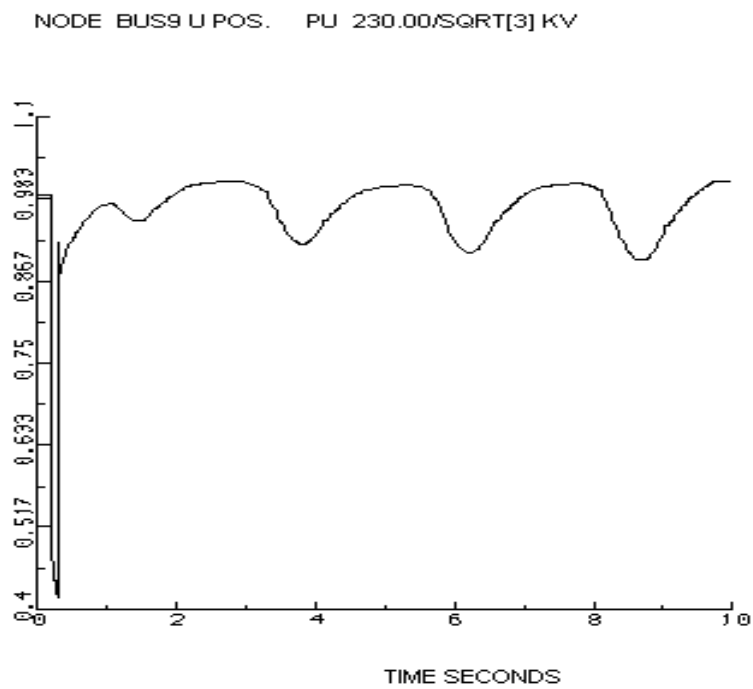


b)

Figura 5.16: Tensión en la barra 7 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Excitador tipo DC1A.



a)



b)

Figura 5.17: Tensión en la barra 9 obtenida con a) HAGP y b) SIMPOW. Ejemplo caso 4. Excitador tipo DC1A.

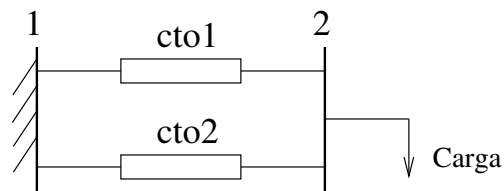


Figura 5.18: Sistema caso 5

Para este caso sólo se presentaron los resultados obtenidos con el paquete HAGP. La validez de los resultados se puede comprobar comparándolos con las gráficas que se muestran en el ejemplo de la página 130 de [Cutsem y Vournas, 2001].

Como se puede apreciar en la figura 5.19, la tensión cae gracias al efecto que produce la salida de una línea entre las barras 1 y 2. Inicialmente la carga genérica responde con sus características transitorias (ecuaciones (3.90) y (3.91)) y como consecuencia, la demanda de potencia de carga cae instantáneamente. Posteriormente, las variables de estado Z_P y Z_Q se incrementan de acuerdo a las ecuaciones (3.92) y (3.93) causando que las potencias activa y reactiva se recuperen hacia su característica de estado estacionario (ver figura 5.21). A lo largo de este proceso la tensión decrece aún más como se ve en la figura 5.19. Entonces, la carga genérica es un modelo de restauración de potencia de carga.

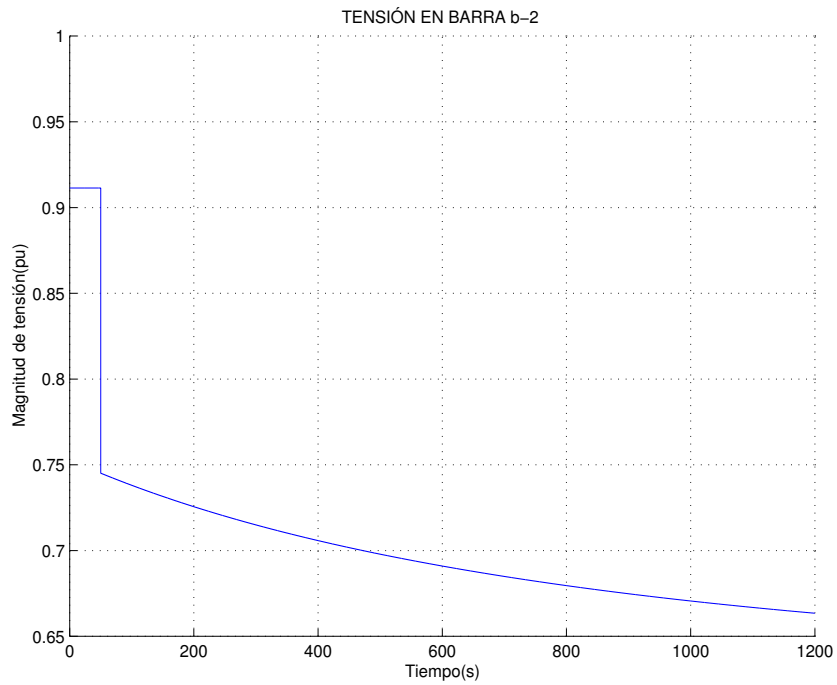


Figura 5.19: Tensión en la barra 2 con HAGP. Ejemplo caso 5

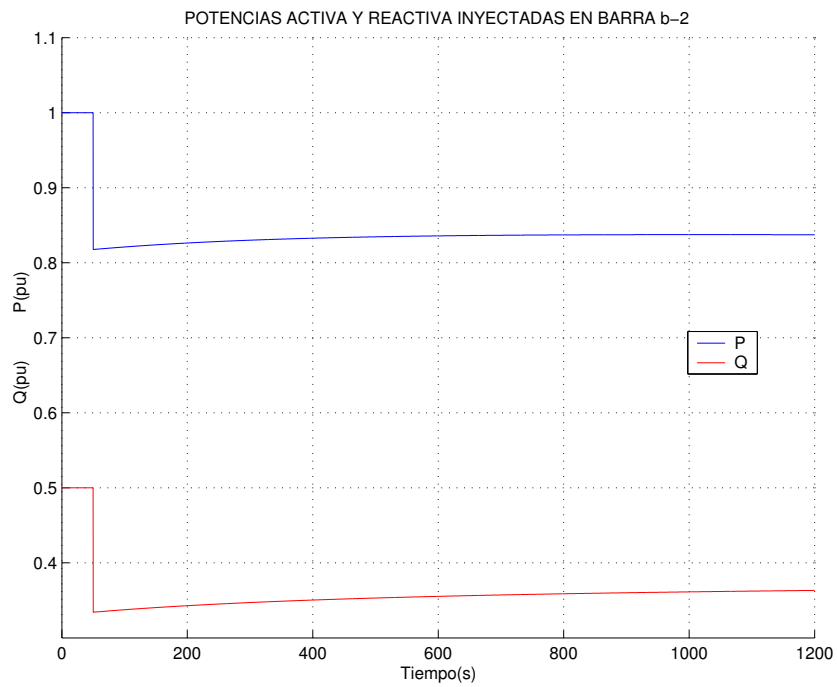


Figura 5.20: Demanda de potencias en la barra 2 con HAGP. Ejemplo caso 5

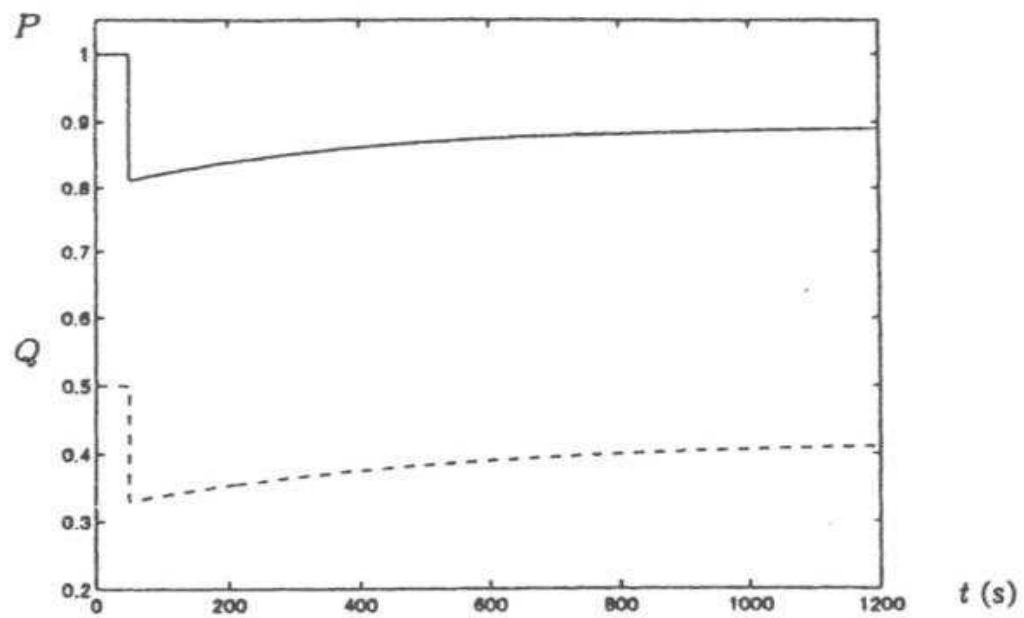


Figura 5.21: Potencias demandada de carga genérica ante una caída de tensión [Cutsem y Vournas, 2001]

Capítulo 6

Conclusiones, aportes y sugerencias

En este capítulo final se presentan las conclusiones del desarrollo que se ha realizado en este proyecto de grado. En la primera sección se da una breve descripción del trabajo que se realizó y se mencionan las conclusiones obtenidas del mismo. En la segunda sección se detallan las aportes. En la última sección se ofrecen algunas sugerencias para futuros desarrollos.

6.1. Resumen y conclusiones

El objetivo general de este trabajo de grado era elaborar un conjunto de funciones para el análisis de la estabilidad de tensión ante grandes perturbaciones de sistemas eléctricos de potencia de cualquier topología. Los resultados expuestos en los anteriores capítulos indican el logro satisfactorio de los objetivos propuestos.

Se desarrollaron modelos detallados de elementos dinámicos de cargas (motor de inducción, carga con restauración por termostatos, modelo de carga genérica) y elementos de control (transformador con cambia tap bajo carga y compensador estático de reactiva). La implementación de estos modelos respeta la metodología utilizada en la herramienta HAGP y no lo limita a futuras inclusiones de nuevos modelos y algoritmos. Se pretende que el paquete sirva como base para futuros desarrollos y sea empleado satisfactoriamente en diversas actividades académicas.

Las conclusiones que se presentan a continuación, son el resultado de experimentaciones numéricas llevadas a cabo durante la elaboración del paquete:

- La estabilidad de tensión de un sistema eléctrico de potencia es altamente dependiente de la naturaleza de las cargas que posee. Por tal motivo es importante

contar con modelos que representen adecuadamente las cargas.

- El paso de integración debe estar acorde con las constantes de tiempo de los modelos para visualizar el impacto de estos en el sistema.
- Tiempos de simulación en el orden de varias decenas de segundos son los apropiados para simular el comportamiento del sistema cuando sólo se incluyen modelos de dinámica lenta como es el caso de ULTC's, cargas controladas por termostatos y modelos genéricos de carga, comunes en el estudio de estabilidad de tensión en el mediano y largo plazo.
- Los elementos de dinámica rápida implementados en el HAGP son los motores de inducción y los compensadores estáticos de potencia reactiva.
- El colapso de tensión en una barra puede ocasionar problemas de convergencia en la solución.

6.2. Aportes originales

Las principales aportes de esta tesis de grado son las siguientes:

- La modificación de los algoritmos de flujo de carga del paquete HAGP para el modelo estacionario del motor de inducción.
- La modificación de los algoritmos de flujo de carga del paquete HAGP para el modelo estacionario del SVC.
- La elaboración e implementación del modelo dinámico de motores de inducción en la herramienta HAGP.
- La elaboración e implementación del modelo de cargas controladas termostáticamente en la herramienta HAGP.
- La elaboración e implementación de un modelo de compensador estático de reactiva en la herramienta HAGP.
- La elaboración e implementación de algoritmos para la simulación de la respuesta del ULTC en estado dinámico del sistema en el paquete HAGP.
- La elaboración e implementación del modelo multiplicativo de cargas agregadas.

6.3. Sugerencias para posteriores desarrollos

Como se ha mencionado, se espera que el paquete elaborado sirva como base para posteriores desarrollos e investigaciones, dentro de los cuales se pueden mencionar:

- La inclusión del efecto de saturación en motores de inducción.
- La implementación del modelo de motores de inducción de rotor de doble jaula de ardilla.
- La implementación del modelo de motores de inducción de rotor de barras profundas.
- La implementación del modelo de motores de inducción monofásicos.
- La inclusión del modelo genérico aditivo de carga.
- La inclusión de modelos de limitadores de sobreexcitación, limitadores de subexcitación y limitadores de V/Hz.
- La inclusión de modelos de compensador síncrono estático (STATCOM).
- La implementación de modelos de los sistemas de protección.
- La inclusión de modelos que representen las funciones de control automático de generación.
- La implementación del software elaborado en un lenguaje de programación a más bajo nivel.
- La elaboración de una interfaz gráfica de entrada de datos.
- La simulación del sistema en condiciones desbalanceadas.

Bibliografía

- ABB. *SIMPOW Power System Simulation Software, User Manual*. Power Systems Analysis Department, Vasteras, Sweden, 2001.
- CIGRÉ. “Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena”. Technical report, 1993.
- Cutsem T. V. y Vournas C. *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001, 1st. edition.
- de Castro Fernández R. y Diaz H. “Modelos dinámicos para el análisis de estabilidad de tensión”. <http://www.dinel.upm.es/hdiaz/analisis.htm>, 2001.
- Expósito A. G. *Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica*. McGraw-Hill Interamericana de España, 2002, 1da. edition.
- Fitzgerald A. E. *Máquinas Eléctricas*. McGraw-Hill, 1992, 5ta. edition.
- Grainger J. J. y Stevenson W. D. *Análisis de Sistemas de Potencia*. McGraw-Hill, 1996, 1da. edition.
- Kundur P. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc., 1994, 1st. edition.
- M. Gustafsson N. K. “Voltage Collapse in Power Systems”. Technical Report 215L, Chalmers University of Technology, December 1995.
- Ramírez J. M. y Vásquez H. “Modelos propuestos para la planta de Salvajina”. <http://mafalda.univalle.edu.co/enycompu/edicion16/>, Vol. Revista Energia y Computación, 2004.

- Repo S. *On-line Voltage Stability Assessment of Power System. An Approach of Black-box Modelling*. Tesis doctoral, Tampere University of Technology, september 2001.
- Report I. C. “Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools and Industry Experience”. Technical Report 90TH0358-2-PWR, 1990.
- Rodríguez C. *Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones. Diseño y elaboración*. Tesis pregrado, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Diciembre 2003.
- Ruiz D., Asiaín T. y Olguín D. “A Method for Initializing Induction Motors modeling during Power System Transient Stability Studies”. *IEEE Trans.*, Vol. PWRS-4, No. 2, pp. 177–179, September 1999.
- T. Kataoka S. N. “A Method for Aggregation of a Group of Induction Motors Loads”. *IEEE Trans.*, pp. 1683–1688, 2000.
- Taylor C. W. *Power System voltage stability*. McGraw-Hill, New York, USA, 1994.
- Vargas H. R. *Mejora de los algoritmos del análisis modal selectivo para el estudio de estabilidad de pequeña perturbación de grandes sistemas de energía eléctrica*. Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Julio 2002.
- Zimmerman R. y Gan D. *MATPOWER Version 2.0, User’s Manual*. PSERC, School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, 1997.

Apéndice A

Demostración de las expresiones enunciadas en el capítulo 4

A.1. Las corrientes de estator del motor de inducción

A continuación se deducen las expresiones para las corrientes de eje directo y en cuadratura del estator del motor de inducción, mostradas en las ecuaciones (4.35) y (4.36).

Las ecuaciones (3.50) y (3.51) de las tensiones del estator del circuito transitorio del motor de inducción se reorganizan para llegar a la siguiente expresión:

$$v_d + jv_q = i_d R_s - X'_s i_{sq} + v'_d + j(R_s i_q + X'_s i_{sd} + v'_q) \quad (\text{A.1})$$

entonces,

$$v_d = i_d R_s - X'_s i_{sq} + v'_d \quad (\text{A.2})$$

$$v_q = R_s i_q + X'_s i_{sd} + v'_q \quad (\text{A.3})$$

Apartir de estas dos ecuaciones, se despeja de cada una de ellas la corriente i_q y se obtienen dos expresiones más. De la ecuación (A.2)

$$i_{sq} = \frac{i_{sd} R_s + v'_d - v_d}{X'_s} \quad (\text{A.4})$$

De la ecuación (A.3)

$$i_{sq} = \frac{-i_{sd}X'_s - v'_q + v_q}{R_s} \quad (\text{A.5})$$

Al igualar las ecuaciones (A.4) y (A.5) se obtiene una expresión para la corriente del eje directo del estator i_{sd} en función de las tensiones del eje directo y del eje en cuadratura del estator y de las variables de estado del motor de inducción,

$$i_{sd} = \frac{R_s (v_d - v'_d) + X'_s (v_q - v'_q)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.6})$$

De igual forma, se deduce una expresión similar para la corriente en cuadratura del estator i_q .

$$i_{sq} = \frac{R_s (v_q - v'_q) - X'_s (v_d - v'_d)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.7})$$

Las corrientes real e imaginaria inyectadas a la barra son opuestas a las corrientes del estator. Por lo tanto, quedan expresadas de la siguiente forma:

$$i_R = - \frac{R_s (V_R - v'_d) + X'_s (V_I - v'_q)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.8})$$

$$i_I = - \frac{R_s (V_I - v'_q) - X'_s (V_R - v'_d)}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.9})$$

A.2. Derivadas del motor de inducción

Las derivadas de las corrientes de las ecuaciones (A.6) y (A.7) con respecto a las variables de estado del motor de inducción son:

$$\frac{\partial i_{sd}}{\partial v'_d} = -\frac{R_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{\partial i_{sd}}{\partial v'_q} = -\frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{\partial i_{sd}}{\partial \omega_r} = 0 \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{\partial i_{sq}}{\partial v'_d} = \frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{\partial i_{sq}}{\partial v'_q} = -\frac{R_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{\partial i_{sq}}{\partial \omega_r} = 0 \quad (\text{A.15})$$

Al derivar la ecuación (3.56) del torque eléctrico con respecto a las variables de estado del motor de inducción se obtienen las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial T_e}{\partial v'_d} = i_{sd} + v'_d \left(\frac{\partial i_{sd}}{\partial v'_d} \right) + v'_q \left(\frac{\partial i_{sq}}{\partial v'_d} \right) \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial v'_q} = i_{sq} + v'_d \left(\frac{\partial i_{sd}}{\partial v'_q} \right) + v'_q \left(\frac{\partial i_{sq}}{\partial v'_q} \right) \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial \omega_r} = 0 \quad (\text{A.18})$$

En la ecuación (A.19) se reemplazan las expresiones dadas por las ecuaciones (A.10) y (A.13):

$$\frac{\partial T_e}{\partial v'_d} = i_{sd} - v'_d \frac{R_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} + v'_q \frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.19})$$

De igual manera se obtiene la derivada del torque eléctrico con respecto a la tensión

transitoria del eje en cuadratura:

$$\frac{\partial T_e}{\partial v'_q} = i_{sq} - v'_d \frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} - v'_q \frac{R_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.20})$$

Al derivar la ecuación (3.56) del torque eléctrico con respecto a la tensión real e imaginaria se obtienen las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial T_e}{\partial V_R} = v'_d \left(\frac{\partial i_{sd}}{\partial V_R} \right) + v'_q \left(\frac{\partial i_{sq}}{\partial V_R} \right) \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial V_I} = v'_d \left(\frac{\partial i_{sd}}{\partial V_I} \right) + v'_q \left(\frac{\partial i_{sq}}{\partial V_I} \right) \quad (\text{A.22})$$

De las ecuaciones (A.6) y (A.7) se deducen las siguientes derivadas:

$$\frac{\partial i_{sd}}{\partial V_R} = \frac{R_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.23})$$

$$\frac{\partial i_{sd}}{\partial V_I} = -\frac{X'_s}{R_s^2 + (X'_s)^2} \quad (\text{A.24})$$

Reemplazando las expresiones (A.23) y (A.24) en las ecuaciones (A.21) y (A.22) se obtiene:

$$\frac{\partial T_e}{\partial V_R} = v'_d \left(\frac{\partial i_{sd}}{\partial V_R} \right) + v'_q \left(\frac{\partial i_{sq}}{\partial V_R} \right) \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial V_I} = v'_d \left(\frac{\partial i_{sd}}{\partial V_I} \right) + v'_q \left(\frac{\partial i_{sq}}{\partial V_I} \right) \quad (\text{A.26})$$

A.3. Las corrientes inyectadas de las cargas con restauración termostática

A continuación se deducen las expresiones para las componentes real e imaginaria de la corriente inyectada por las cargas con restauración termostática, mostradas en las ecuaciones (4.35) y (4.36).

La corriente inyectada por las carga a la barra es:

$$\mathbf{I}_t = -\mathbf{V}_t \mathbf{Y}_L \quad (\text{A.27})$$

reemplazando (A.31) y (A.35) en (A.32) se obtiene;

$$\mathbf{I}_t = -(V_R + jV_I) G \quad (\text{A.28})$$

donde G es la conductancia de carga; por lo tanto, las expresiones para las componentes real e imaginaria de la corriente inyectada son:

$$i_R = -GV_R \quad (\text{A.29})$$

$$i_I = -GV_I \quad (\text{A.30})$$

A.4. Las corrientes inyectadas del SVC

A continuación se deducen las expresiones para las componentes real e imaginaria de la corriente inyectada de los compensadores estáticos de reactiva, mostradas en las ecuaciones (4.35) y (4.36).

La tensión terminal en el SVC es:

$$\mathbf{V}_t = V_R + jV_I \quad (\text{A.31})$$

La corriente inyectada por el SVC a la barra es:

$$\mathbf{I}_t = -\mathbf{V}_t \mathbf{Y}_{SVC} \quad (\text{A.32})$$

donde

$$\mathbf{Y}_{SVC} = j(B_C + B_L) \quad (\text{A.33})$$

y

$$B_L = -v_3 \quad (\text{A.34})$$

por lo tanto

$$\mathbf{Y}_{SVC} = j(B_C - v_3) \quad (\text{A.35})$$

reemplazando (A.31) y (A.35) en (A.32) se obtiene;

$$\mathbf{I}_t = -(V_R + jV_I) * j(B_C - v_3) \quad (\text{A.36})$$

entonces, las expresiones para las componentes real e imaginaria de la corriente inyectada son:

$$i_R = -V_I(B_C - v_3) \quad (\text{A.37})$$

$$i_I = V_R(B_C - v_3) \quad (\text{A.38})$$

A.5. Las corrientes inyectadas del modelo multiplicativo de carga

A continuación se deducen las expresiones para las componentes real e imaginaria de la corriente inyectada de las cargas de modelo genérico multiplicativo, mostradas en las ecuaciones (4.117) y (4.118).

Si P y Q son las componentes de potencia activa y reactiva de la demanda, entonces:

$$\vec{V} \vec{I}^* = -P - jQ \quad (\text{A.39})$$

donde

$\vec{V} = V_R + jV_I$ es la tensión en la barra

$\vec{I} = i_R + ji_I$ es la corriente inyectada en la barra

A partir de la ecuación anterior, se obtienen las siguientes expresiones:

$$V_R i_R + V_I i_I = -P \quad (\text{A.40})$$

$$V_I i_R - V_R i_I = -Q \quad (\text{A.41})$$

Este sistema de ecuaciones puede ser resuelto para hallar i_R y i_I :

$$i_R = - \left[\frac{PV_R}{V_R^2 + V_I^2} + \frac{QV_I}{V_R^2 + V_I^2} \right] \quad (\text{A.42})$$

$$i_I = - \left[\frac{PV_I}{V_R^2 + V_I^2} - \frac{QV_R}{V_R^2 + V_I^2} \right] \quad (\text{A.43})$$

reemplazando los valores para P y Q (ecuaciones 3.90 y 3.91), organizando las expresiones y teniendo en cuenta que $V = \sqrt{V_R^2 + V_I^2}$ se obtiene finalmente:

$$i_R = - \left[\frac{Z_P P_o V_R (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\alpha_t - 2}{2}}}{(V_{Ro}^2 + V_{Io}^2)^{\frac{\alpha_t}{2}}} + \frac{Z_Q Q_o V_I (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\beta_t - 2}{2}}}{(V_{Ro}^2 + V_{Io}^2)^{\frac{\beta_t}{2}}} \right] \quad (\text{A.44})$$

$$i_I = - \left[\frac{Z_P P_o V_I (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\alpha_t - 2}{2}}}{(V_{Ro}^2 + V_{Io}^2)^{\frac{\alpha_t}{2}}} - \frac{Z_Q Q_o V_R (V_R^2 + V_I^2)^{\frac{\beta_t - 2}{2}}}{(V_{Ro}^2 + V_{Io}^2)^{\frac{\beta_t}{2}}} \right] \quad (\text{A.45})$$

Apéndice B

Algoritmo del sistema de control del ULTC

En la herramienta software HAGP se implementó el modelo discreto del ULTC cuya variable de estado es la posición del tap. De la figura B.1 a la figura B.17 se expone el algoritmo que se utilizó en cada intervalo de tiempo Δt para reflejar el comportamiento del ULTC en el sistema eléctrico de potencia.

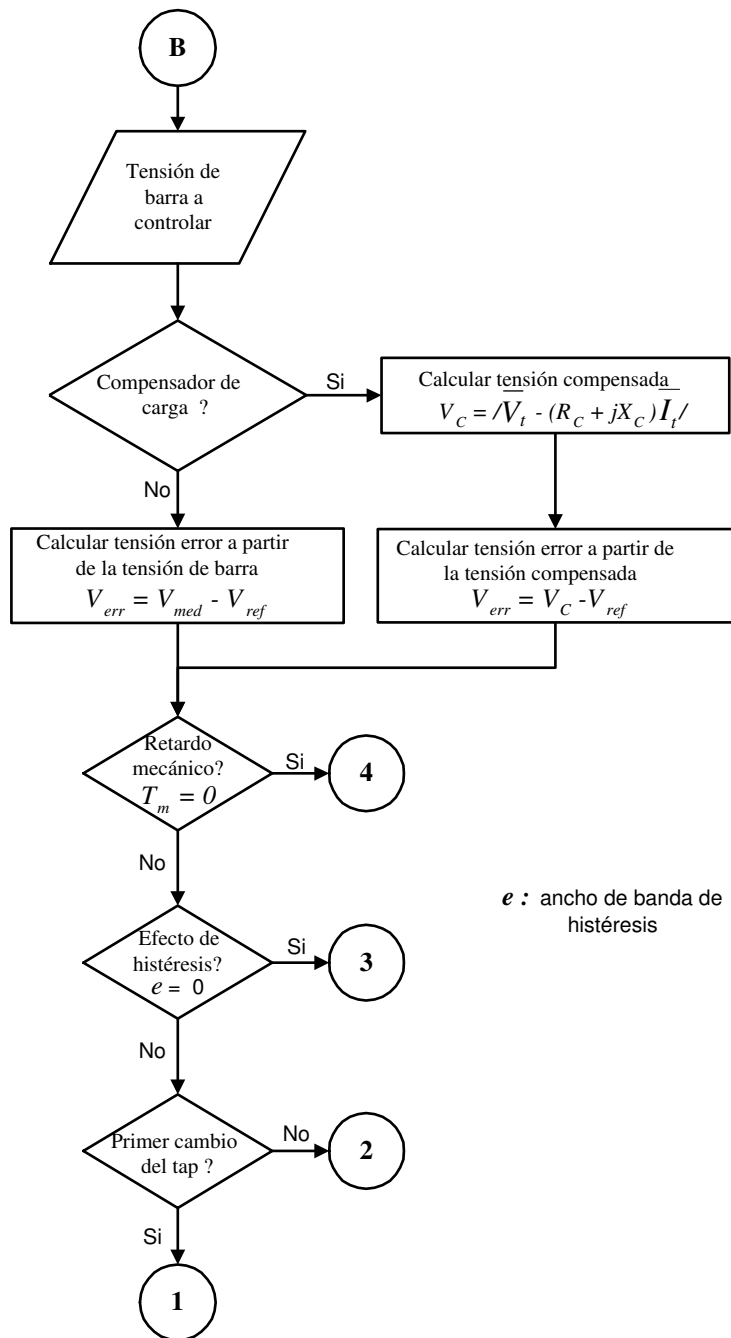


Figura B.1: Diagrama de flujo ULTC

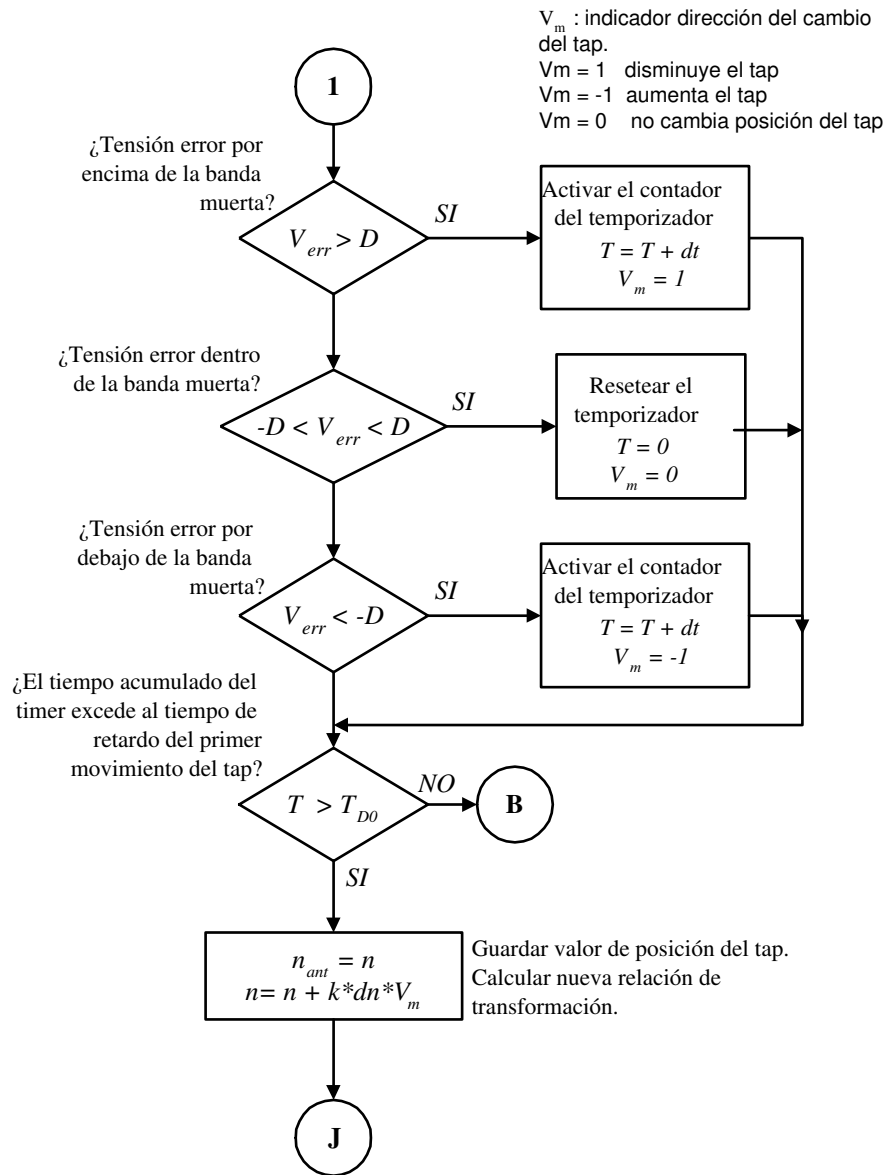


Figura B.2: Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap.

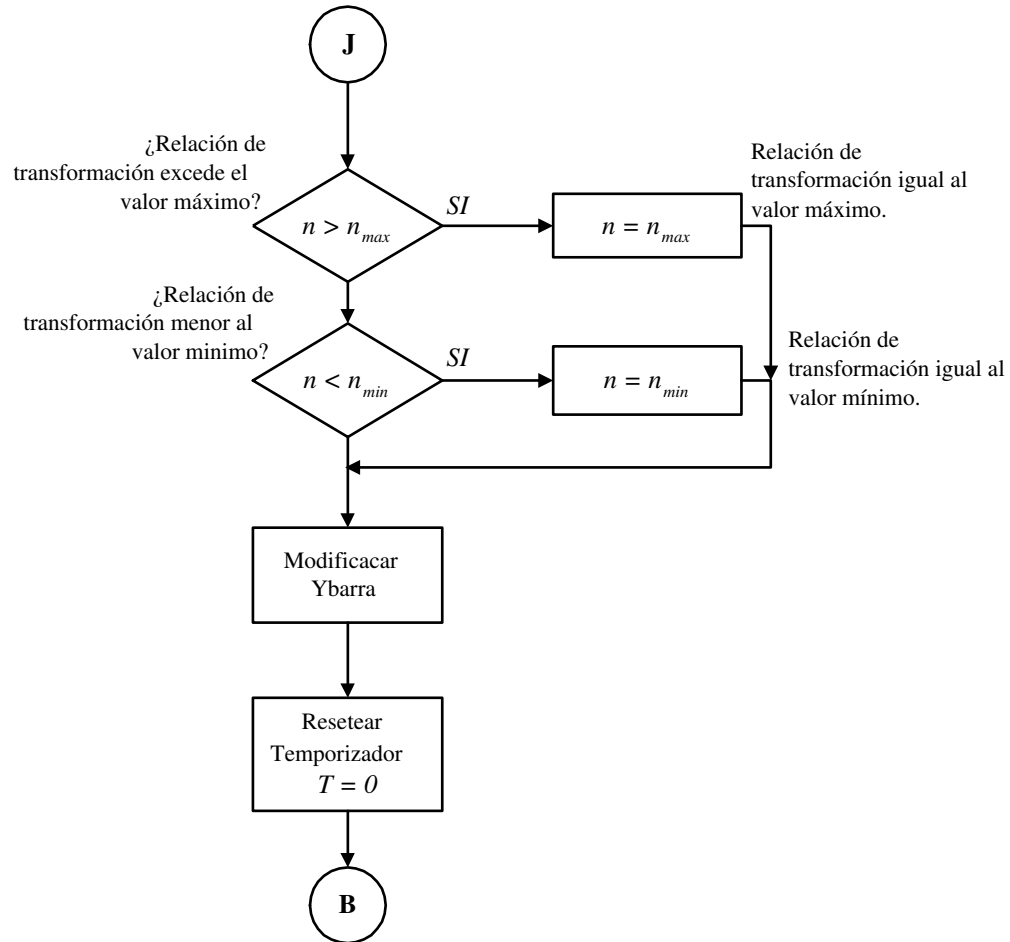


Figura B.3: Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap. Continuación.

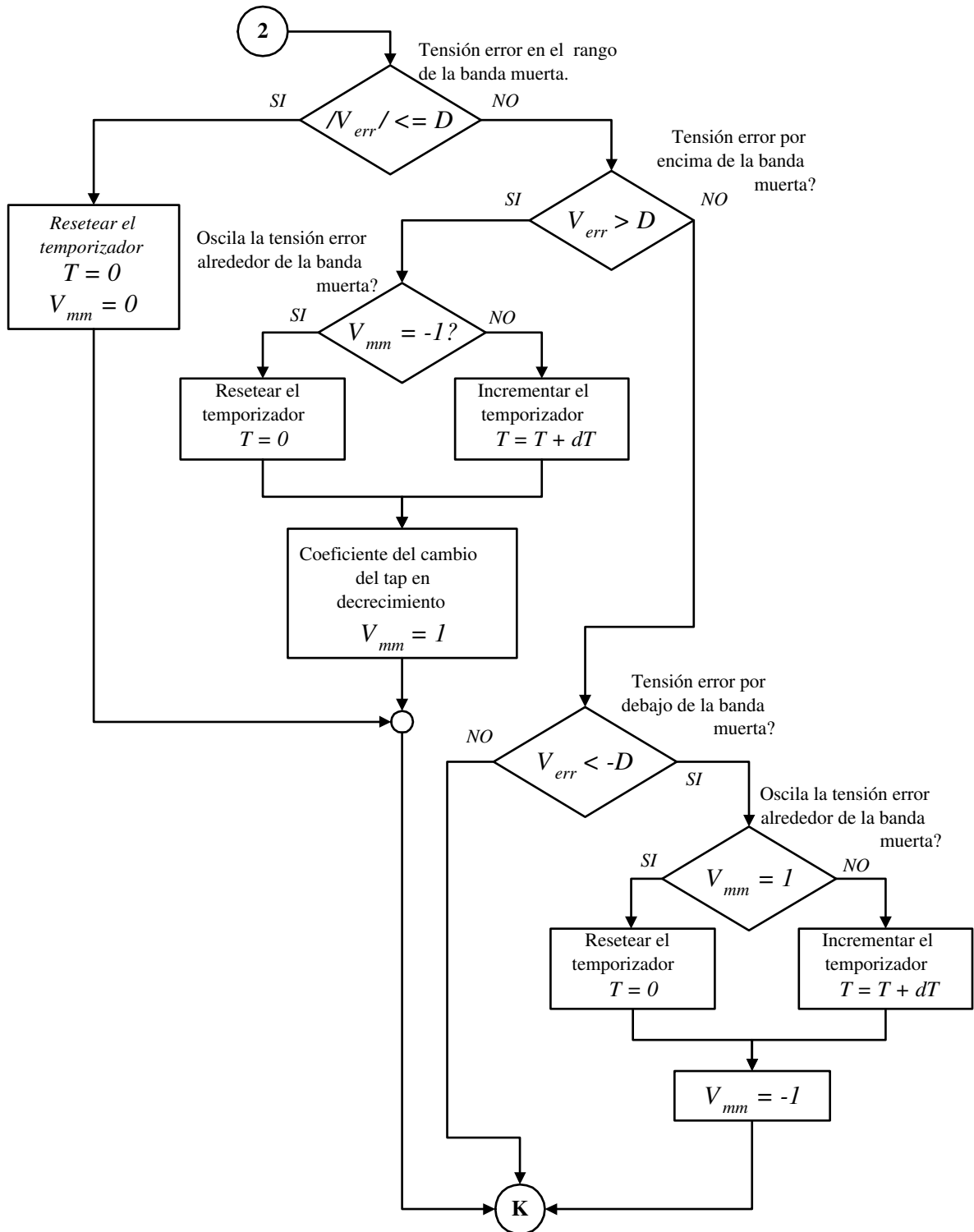


Figura B.4: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap.

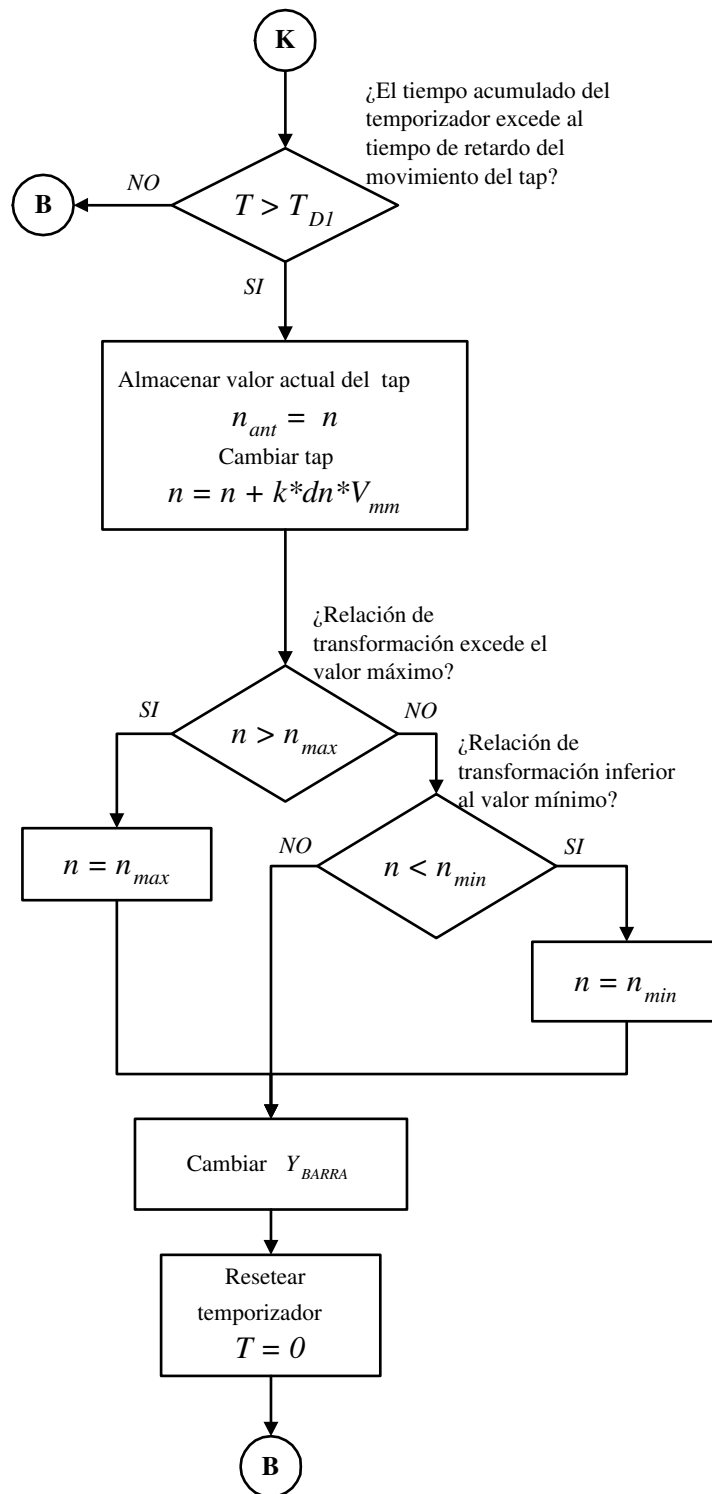


Figura B.5: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap. Continuación.

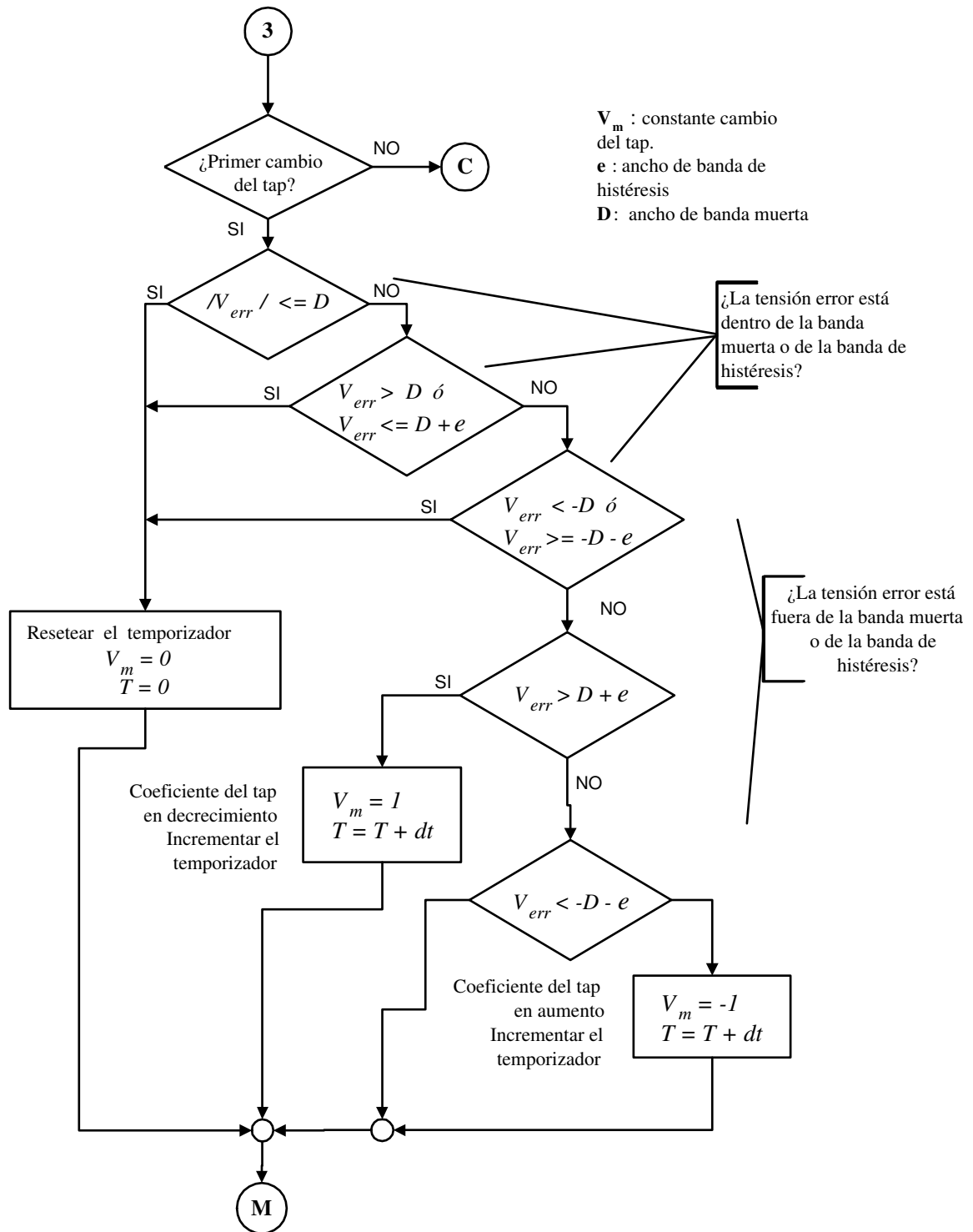


Figura B.6: Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap con efecto de histéresis.

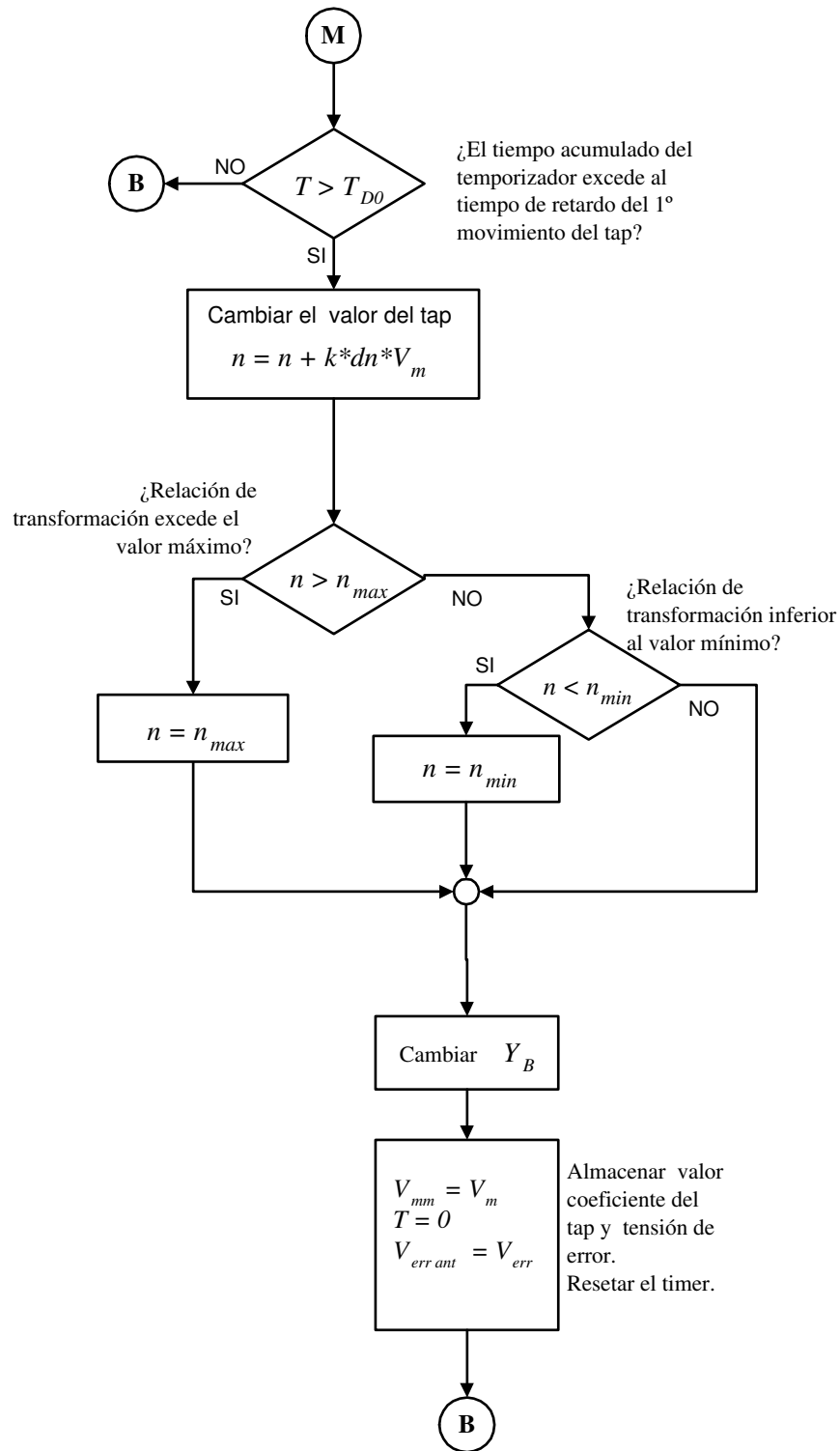


Figura B.7: Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap con efecto de histéresis. Continuación.

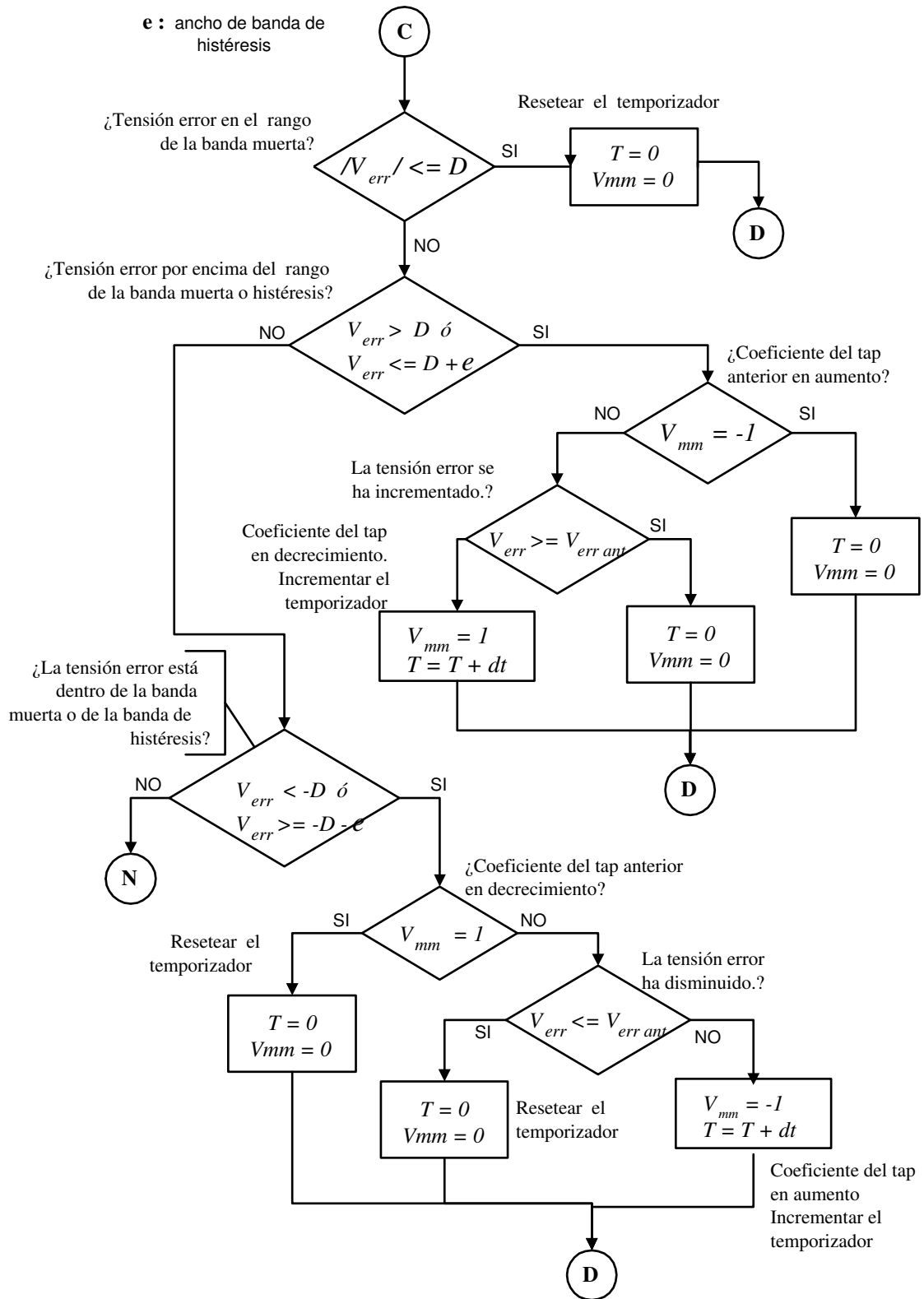


Figura B.8: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap con efecto de histéresis.

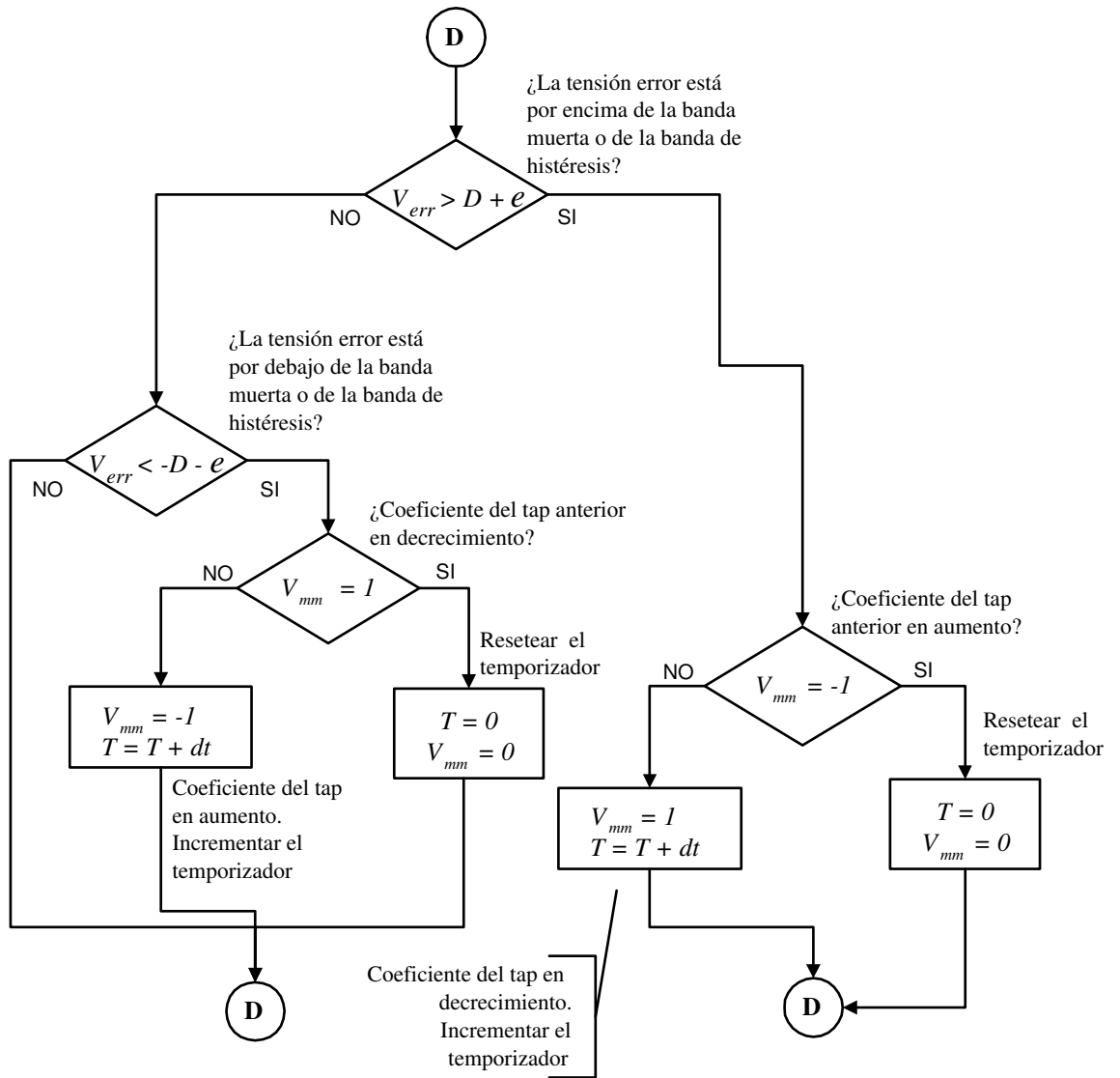


Figura B.9: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap con efecto de histéresis. Continuación.

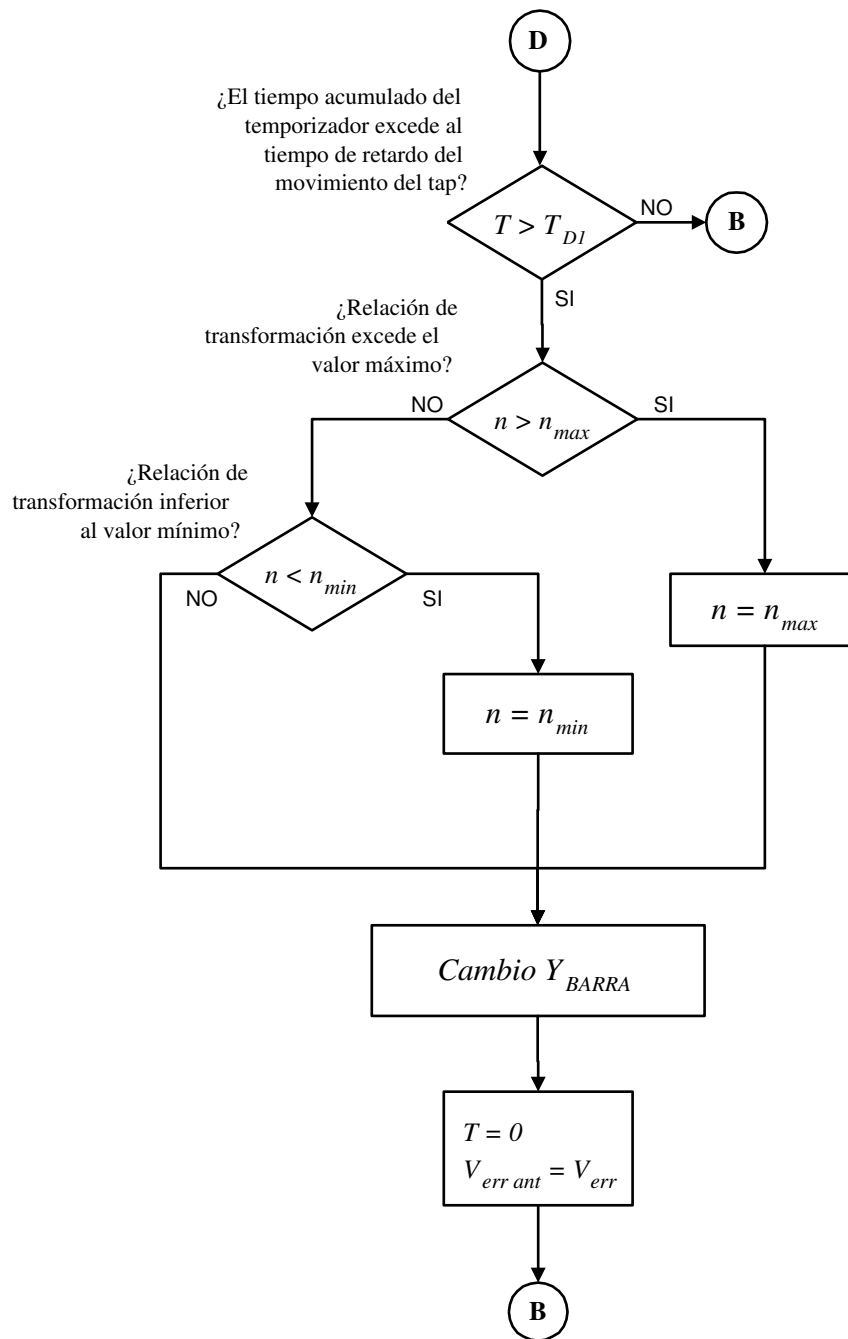


Figura B.10: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap con efecto de histéresis. Continuación.

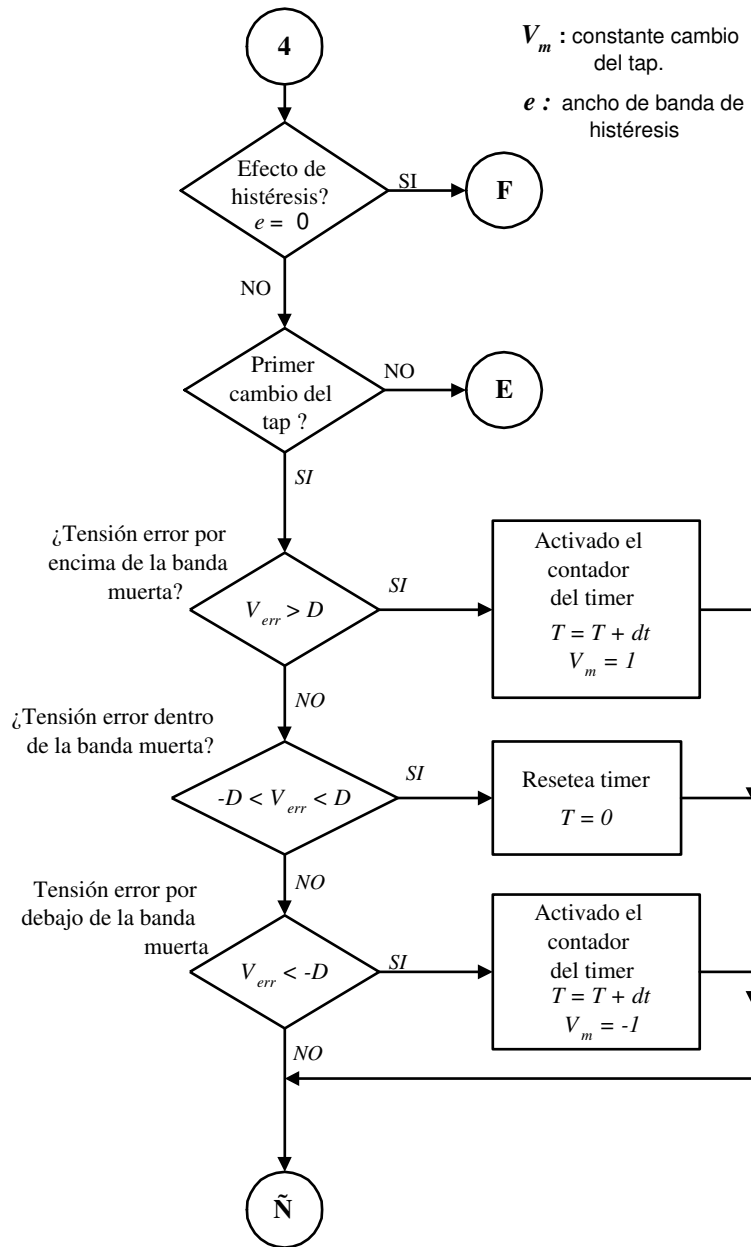


Figura B.11: Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico.

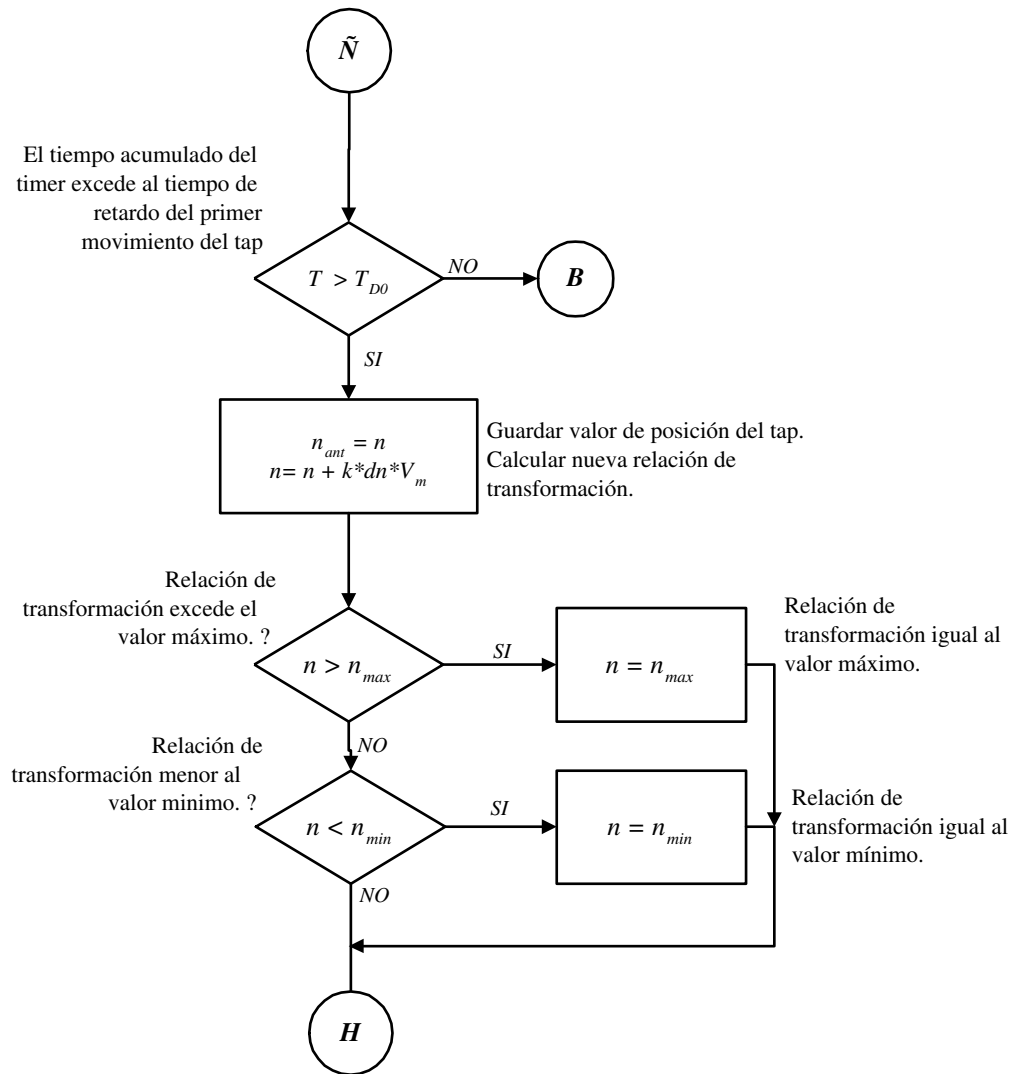


Figura B.12: Diagrama de flujo ULTC. Primer movimiento del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico. Continuación.

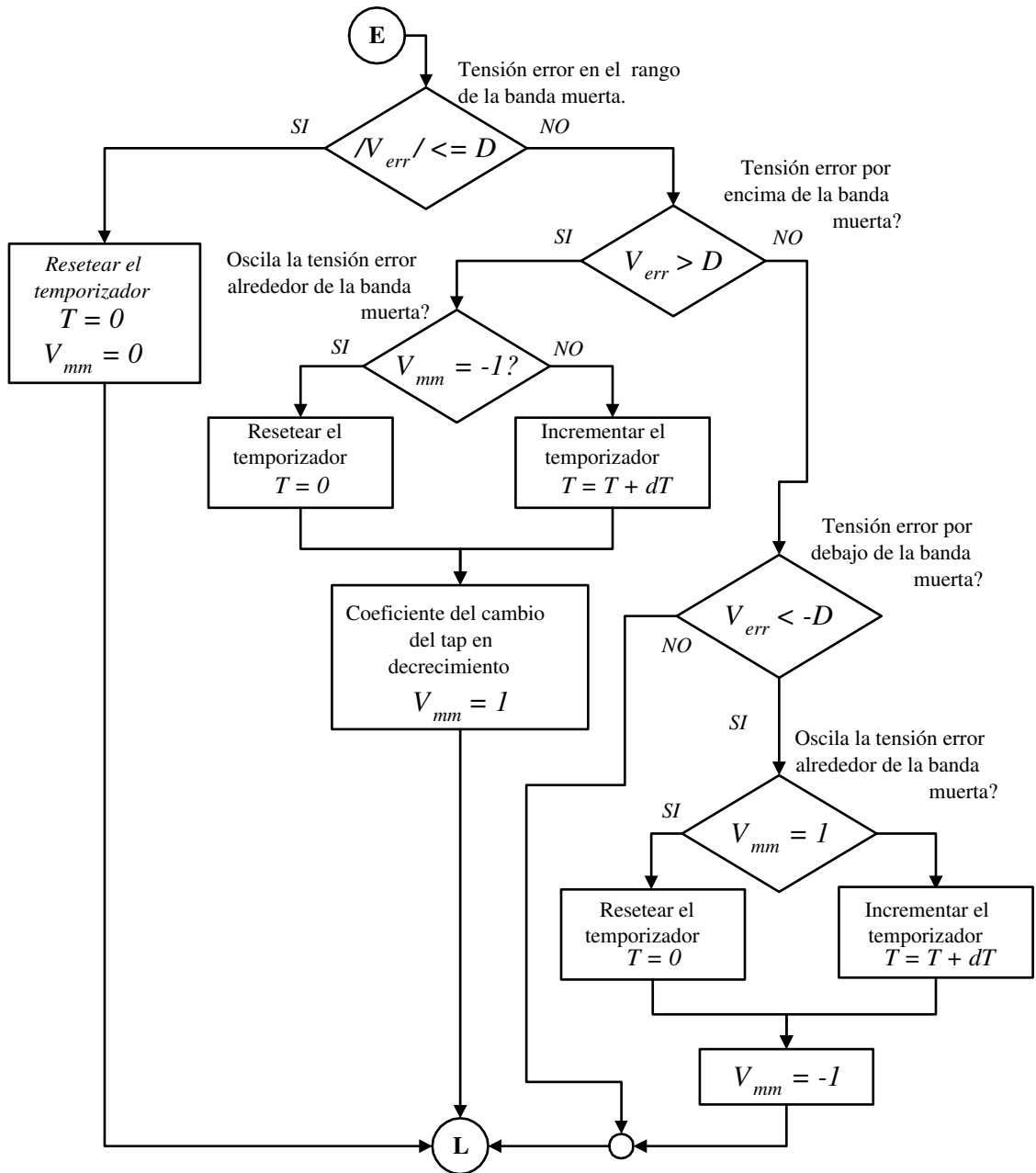


Figura B.13: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico.

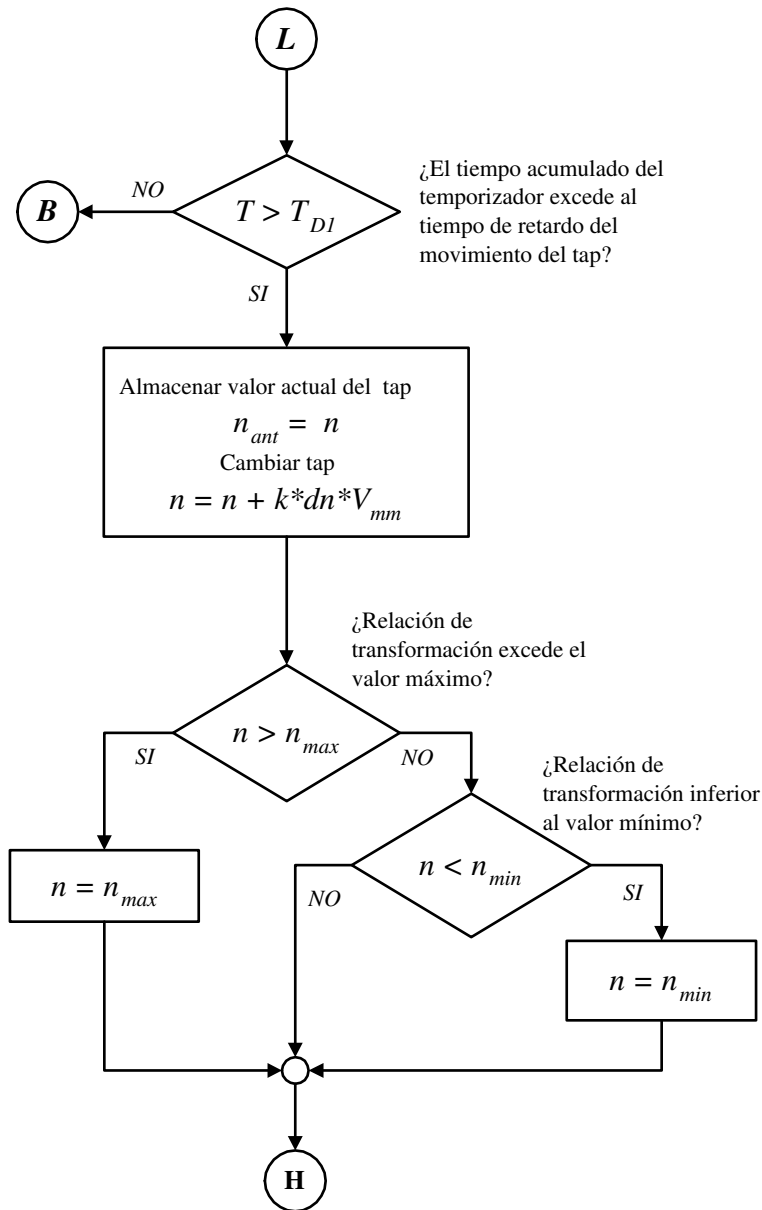


Figura B.14: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico. Continuación.

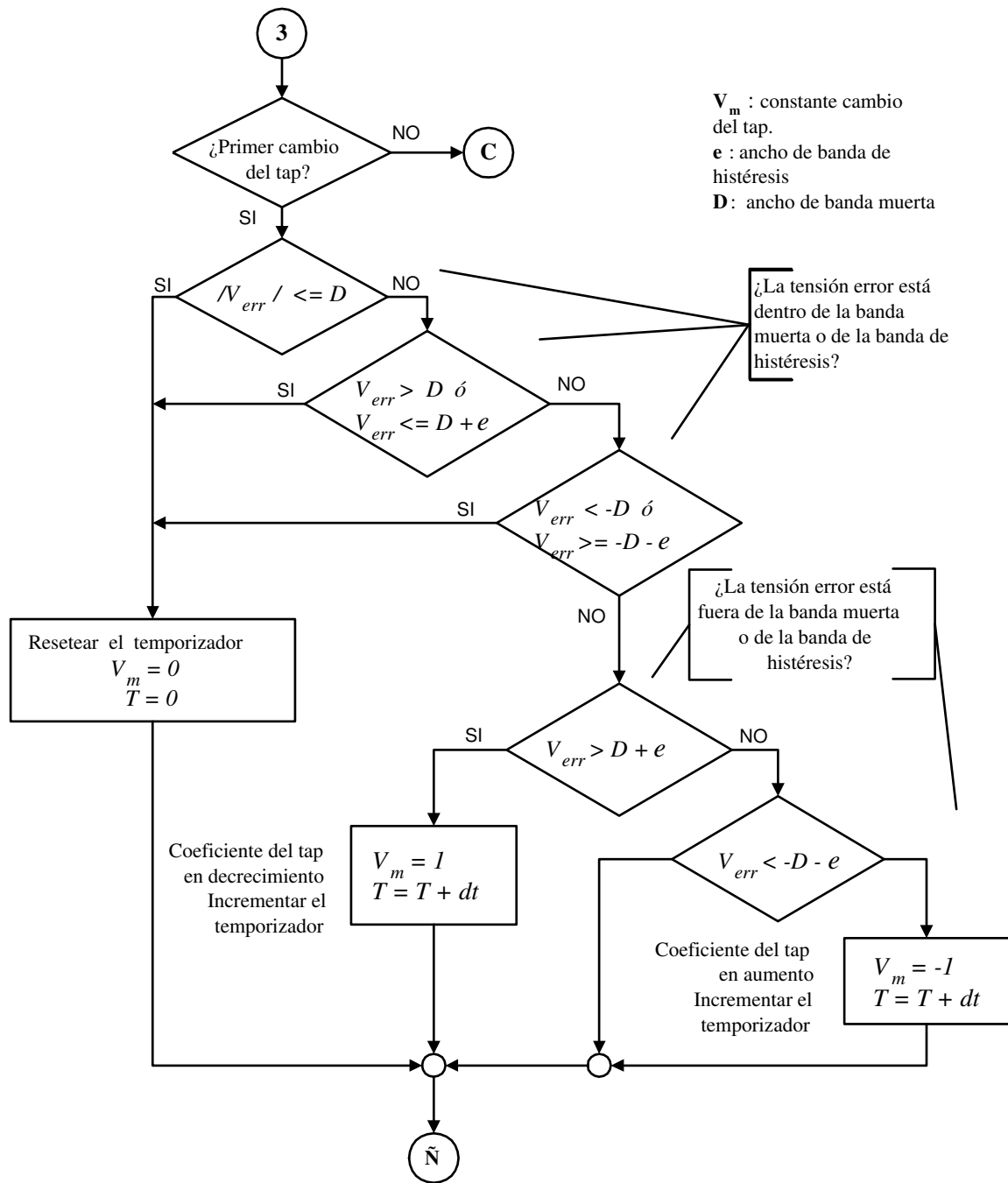


Figura B.15: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el retardo mecánico. Diagrama de flujo ULTC.

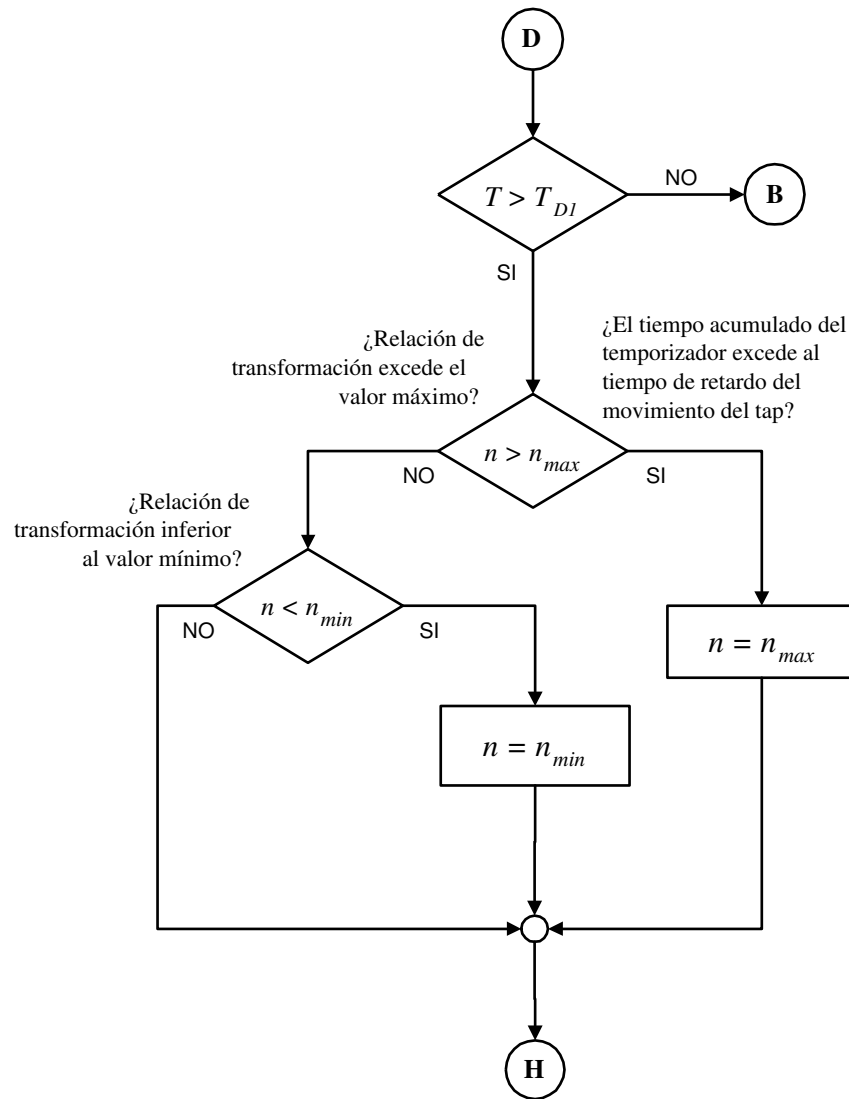


Figura B.16: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el efecto de histéresis y el retardo mecánico.

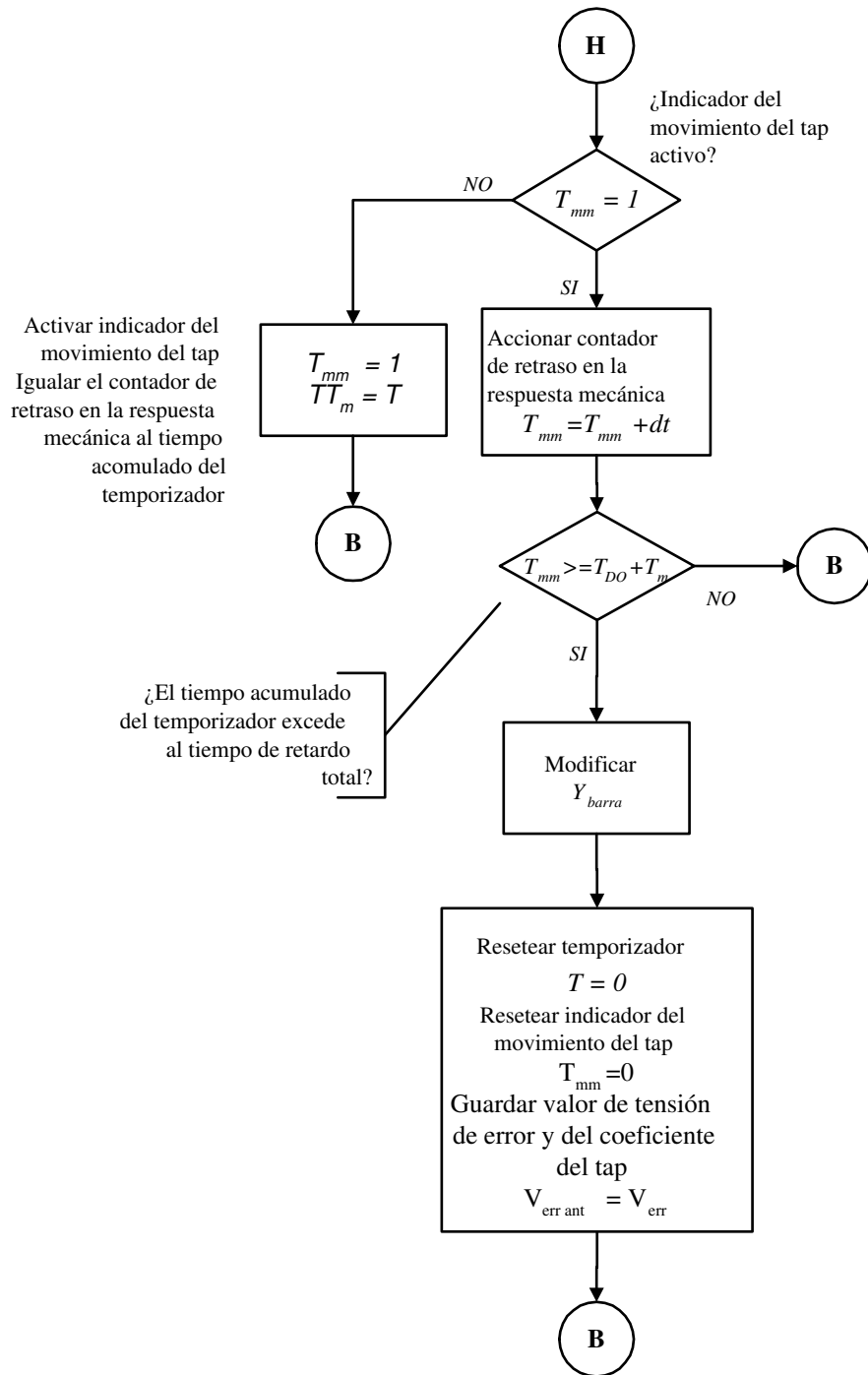


Figura B.17: Diagrama de flujo ULTC. Posteriores movimientos del tap teniendo en cuenta el efecto de histéresis y el retardo mecánico.

Apéndice C

Modelos dinámicos en SIMULINK

Los modelos en SIMULINK empleados para verificar la validez de los resultados del trabajo implementado en la herramienta HAGP fueron elaborados por un equipo de trabajo de la Universidad Politécnica de Madrid. A continuación se exponen y se da una breve descripción de los diagramas. Para mayor información consultar [de Castro Fernández y Diaz, 2001].

C.1. Ejemplo caso 1

Las figura C.2 muestra el diagrama en SIMULINK correspondiente al sistema de los ejemplos caso 2 y 3 del capítulo 5 (figura C.1). Antes de iniciar la simulación es necesario correr el archivo *constantes.m* (ver figura C.6). Los principales bloques son:

BLOQUE SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Tienen la función de representar la red eléctrica vista desde el motor antes y después de la perturbación. Su estructura interna se muestra en la figura C.3.

BLOQUE ROTOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Este bloque simula la característica dinámica del rotor del motor de inducción, cuyas ecuaciones diferenciales se implementaron en una S-function (función de SIMULINK que permite la comunicación con el lenguaje MATLAB) llamada *rotorind.m* (ver figuras C.7 y C.8) y para los valores iniciales *cinic.m* (ver figura C.9).

BLOQUE ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Este bloque tiene la función de representar el estator del motor de inducción. Su estructura interna se muestra en la figura C.5.

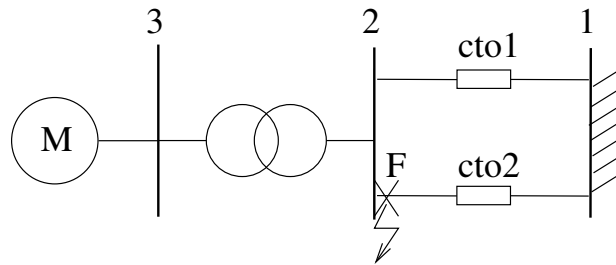


Figura C.1: Sistema caso 1

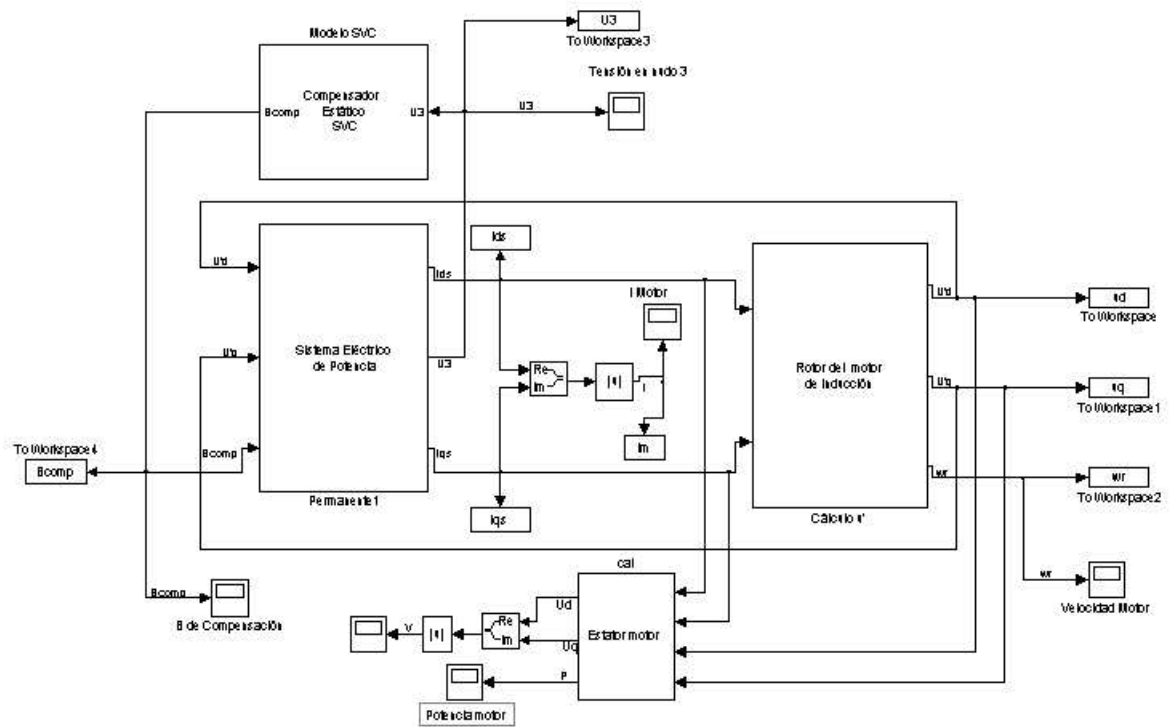


Figura C.2: Diagrama en SIMULINK del sistema caso 1

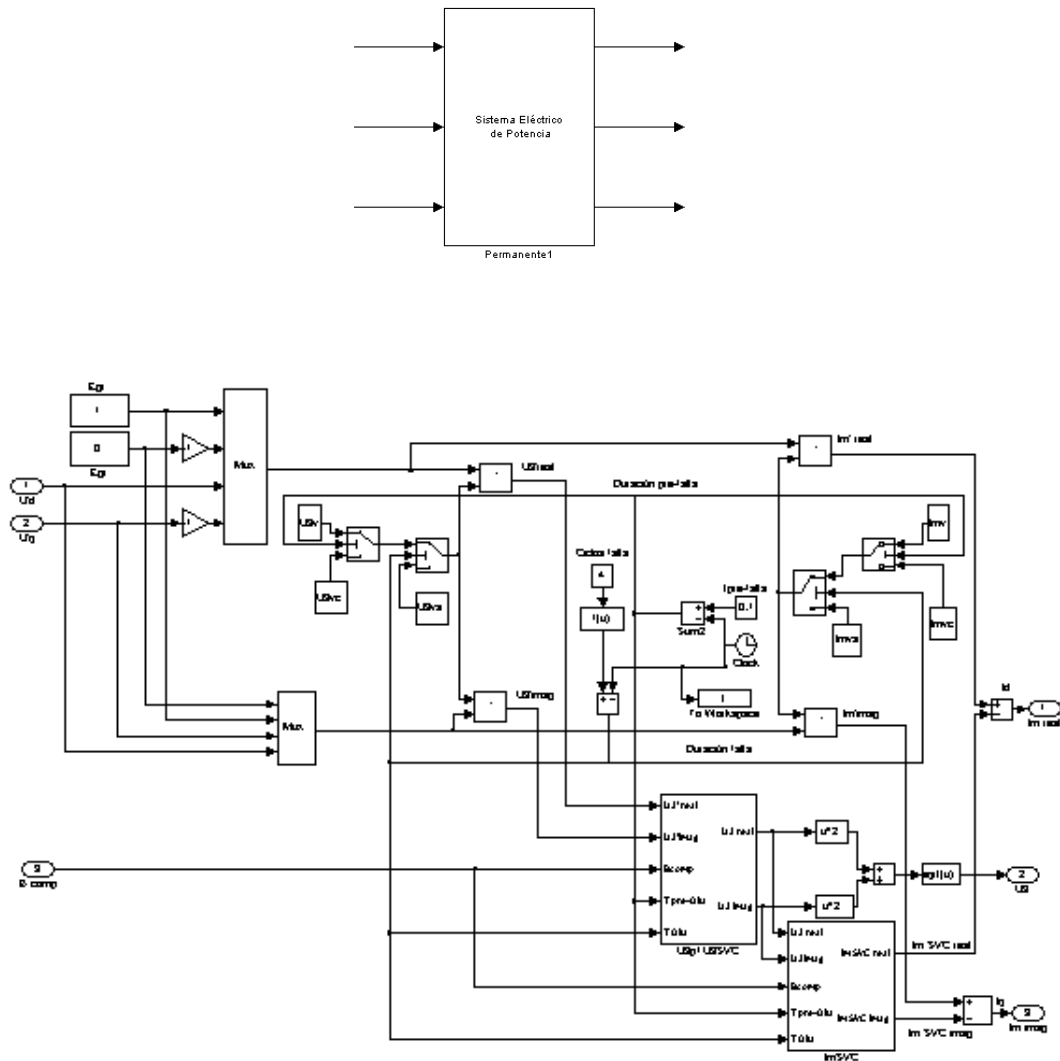


Figura C.3: Diagrama interno en SIMULINK del sistema equivalente del caso 1

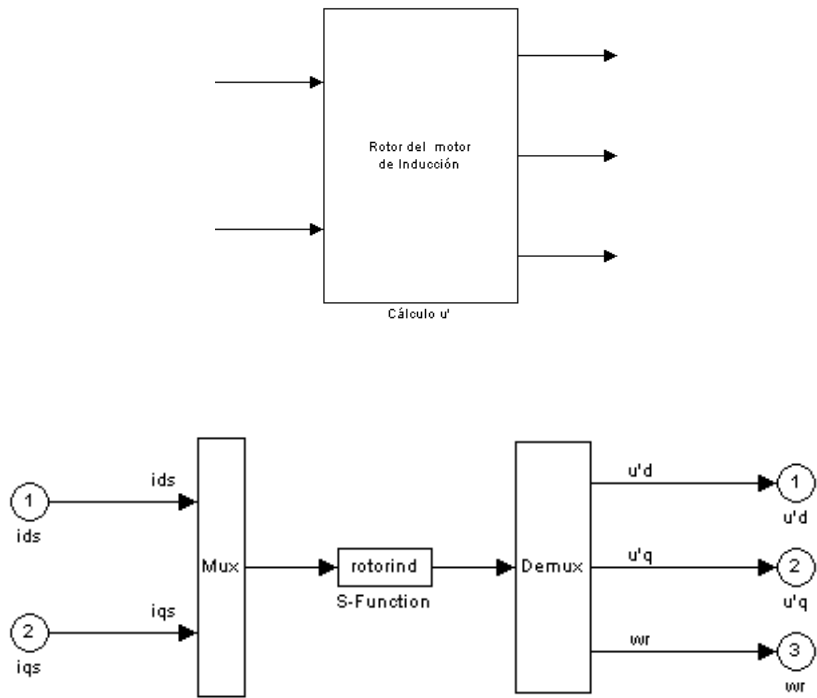


Figura C.4: Diagrama interno del rotor del motor de inducción

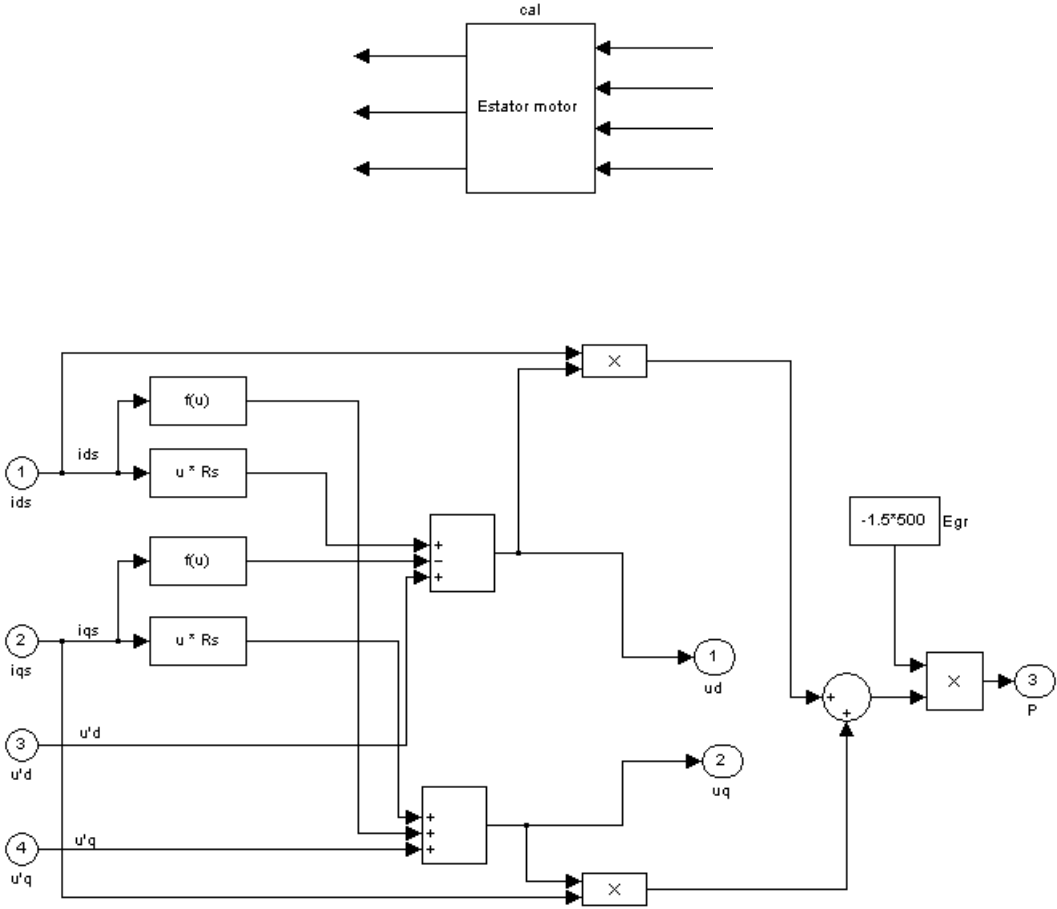


Figura C.5: Diagrama interno del estator de inducción

```

%Archivo auxiliar para definir las constantes en el "workspace" que utiliza
%el programa en simulink.
%
clear all
close all
%Pre-falla :permanente
U3v=[0.6354 -0.0622 0.4667 -0.0233]
Imv=[-0.0879 -1.7628 -0.2794 1.4912]
A=0; B=0; C=0; D=0;
%Falla: Coci en linea
U3vc=[0.2415 -0.0179 0.3544 -0.0093]
Imvc=[-0.0175 -0.6693 -0.2556 1.8032]
Ac=0.0095 ; Bc=0.1279; Cc=-0.3544 ;Dc=0.0093;
%Post-falla : Linea Abierta
U3vs=[0.4605 -0.0661 0.6780 -0.0644]
Imvs=[-0.1217 -1.2805 -0.3651 0.9022]
As=0.0350; Bs=0.2438; Cs=-0.6780 ; Ds=0.0644;

```

Figura C.6: constantes.m

C.2. Ejemplo caso 2 y 3

Las figura C.10 muestra el diagrama en SIMULINK correspondiente al sistema de los ejemplos caso 2 y 3 del capítulo 5 (figura C.10). Comprende cuatro bloques:

LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE PREFALLA Y POSTFALLA

Tienen la función de representar la red eléctrica vista desde el transformador T2 antes y después de la perturbación. Actúa como una subrutina ejecutable en MATLAB a través del archivo *sistrafo.m* (ver figuras C.14 y C.15).

LA CARGA TERMOSTÁTICA

Este bloque representa la carga controlada por termostato, cuya estructura interna se muestra en la figura C.12.

EL BLOQUE ULTC:

Tiene como función simular el cambio automático de tomas del transformador T2 se muestra en la figura C.13. Los bloques de este modelo son:

- *Bloque elemento de medida:* Este bloque tiene la función de detectar la diferencia

```

%Descripción: rotorind.m
%
% Programa que resuelve el conjunto de ecuaciones diferenciales que
% describen el comportamiento dinámico del Rotor del Motor de Inducción:
% - Ecuaciones para establecer la interfase del rotor con la red estática
% - Ecuación de oscilación del rotor
% Se evalúa la salida como:
%  $y = f(u)$ 
% u : entradas
% y : Salidas son devueltas en sys
%
% Parámetros de entrada:
% - Variables de estado x
% - Variables de entrada u
% - Parámetros del motor: Rs, Xs, Xm, Xr, Rr, H
% - Constantes del par mecánico:  $A*w^2+B*w+C$ 
% - Potencia activa y tensión del motor: Pm, Um
%
% Variables de salida:
% - sys: Tensión aplicada al rotor  $u'd+ju'q$  y velocidad  $wr$ 
%
%ECUACIONES DIFERENCIALES DEL ROTOR DE INDUCCIÓN
function [sys, x0]=rotorind(t,x,u,flag,Rs,Xs,Rr,Xr,Xm,H,A,B,C,D,Pm,Um)
%Parametros
Wb=2*pi*60;
X = (Xs + Xm);
Xp = ( Xs + Xm*Xr/(Xm+Xr) );
%Cálculo de la condiciones iniciales del motor conocida la potencia activa y tensión
[Te,dato]=Cinic(Pm,Um,Rs,Xs,Xm,Xr,Rr);
wo=dato(3); % Velocidad inicial del rotor en p.u.

```

Figura C.7: rotorind.m

```

To = Te/(A*wo^2+B*wo+C); % Constante del par mecánico inicial en p.u.
Top = ((Xr+Xm)/Rr)/Wb; % Constante de tiempo del rotor en seg.
%Nomenclatura utilizada:
%Variables de estado
%x(1) = u'd Parte real de la tensión aplicada al rotor en p.u.
%x(2) = u'q Parte imaginaria de la tensión aplicada al rotor en p.u.
%x(3) = wr Velocidad del rotor en p.u.
%Variables de entrada:
%u(1) = ids Parte real de la intensidad absorbida por el motor
%u(2) = iqs Parte imaginaria de la intensidad absorbida por el motor
%Modelo
if abs(flag)==1
    %Variables de estado del sistema
    sys(1) = -1/Top*(x(1)+(X-Xp)*u(2)) + (1-x(3))*Wb*x(2);
    sys(2) = -1/Top*(x(2)-(X-Xp)*u(1)) - (1-x(3))*Wb*x(1);
    sys(3) = 1/(2*H)*(x(1)*u(1) + x(2)*u(2) - To*(A*x(3)^2 + B*x(3) + C) - D*x(3));
elseif flag==3
    %Salida del sistema
    sys=[x(1); x(2);x(3)];
elseif flag==0
    %Parámetros y condiciones iniciales
    %1ro: Número de estados continuos
    %2do: Número estados discretos
    %3ro: Número de salidas x
    %4to: Número de entradas u
    sys=[3;0;3;2;0;0];
    x0=dato;
else
    sys=[];
end

```

Figura C.8: rotorind.m continuación

```

%Descripción: cinic.m
%
% Función que emplea el circuito equivalente para régimen estacionario
% del motor de inducción para calcular las condiciones en régimen permanente
% de las variables:
% - Deslizamiento
% - Velocidad del rotor
% - Intensidad absorbida por motor
% - Tensión aplicada al rotor
% - Potencia reactiva
% - Par eléctrico
% Datos de entrada:
% - Tensión del motor Um
% - Potencia activa absorbida Pm
% - Parámetros del motor: Rs,Xs,Xm,Xr,Rr
% Variables de salida:
% - Par eléctrico Te
% - Vector x0=[Parte real tensión aplicada al rotor u'd
% Parte imaginaria tensión aplicada al rotor u'q
% Velocidad del rotor wr]
function [Te,x0]=cinic(Pm,Um,Rs,Xs,Xm,Xr,Rr)
% Resolución de la ecuación de segundo grado para el cálculo del deslizamiento
Xp=Xs+Xm*Xr/(Xm+Xr);
A=-Xs*(Xm+Xr)-Xr*Xm;
B=Rs*(Xm+Xr);
C=Pm*A^2+Pm*B^2-Rs*(Xm+Xr)^2;
D=2*Pm*Rs*Rr*A+2*Pm*(Xs*Rr+Rr*Xm)*B-Rr*Xm^2;
E=Pm*(Rs*Rr)^2+Pm*(Xs*Rr+Rr*Xm)^2-Rs*Rr^2;
sol=roots([C D E]);
s=min(sol); % Deslizamiento
x0(3)=1-s; % Wr inicial en p.u.
% Fasor intensidad absorbida en p.u.
Im=Um/(Rs+j*Xs+(Rr/s+j*Xr)*j*Xm/(Rr/s+j*(Xm+Xr)));
Up=Um-(Rs + j*Xp)*Im;
x0(1)=real(Up); % U'd inicial en pu.
x0(2)=imag(Up); % U'q inicial en pu.
Qm=imag(Um*conj(Im)); % Potencia reactiva
Te=x0(1)*real(Im)+x0(2)*imag(Im); % Par eléctrico

```

Figura C.9: cinic.m

entre la tensión de referencia y la tensión a controlar. Básicamente esta función es un relé con zona muerta ajustable. Es decir, cuando detecta una variación de tensión superior al valor de la zona muerta definida origina un pulso de actuación. Este bloque implementó en SIMULINK haciendo uso de una S-function llamada *mederror.m* (ver figura C.16).

- *Bloque retrasador*: Este bloque tiene la función de introducir un retardo en la orden de actuación del motor que controla el mecanismo de movimiento de tomas para evitar cambios innecesarios de las tomas debido a variaciones momentáneas de la tensión. Este bloque implementó en SIMULINK haciendo uso de una S-function llamada *retrasador.m* (ver figuras C.17 y C.18).
- *Bloque ajuste de tomas*: Este bloque representa al motor y los mecanismos que introducen el cambio de la toma desde una posición a la otra. Este bloque implementó en SIMULINK haciendo uso de una S-function llamada *tomas.m* (ver figuras C.19 y C.20).

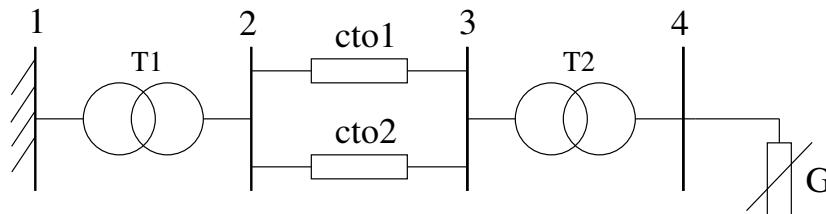


Figura C.10: Sistema caso 2 y 3

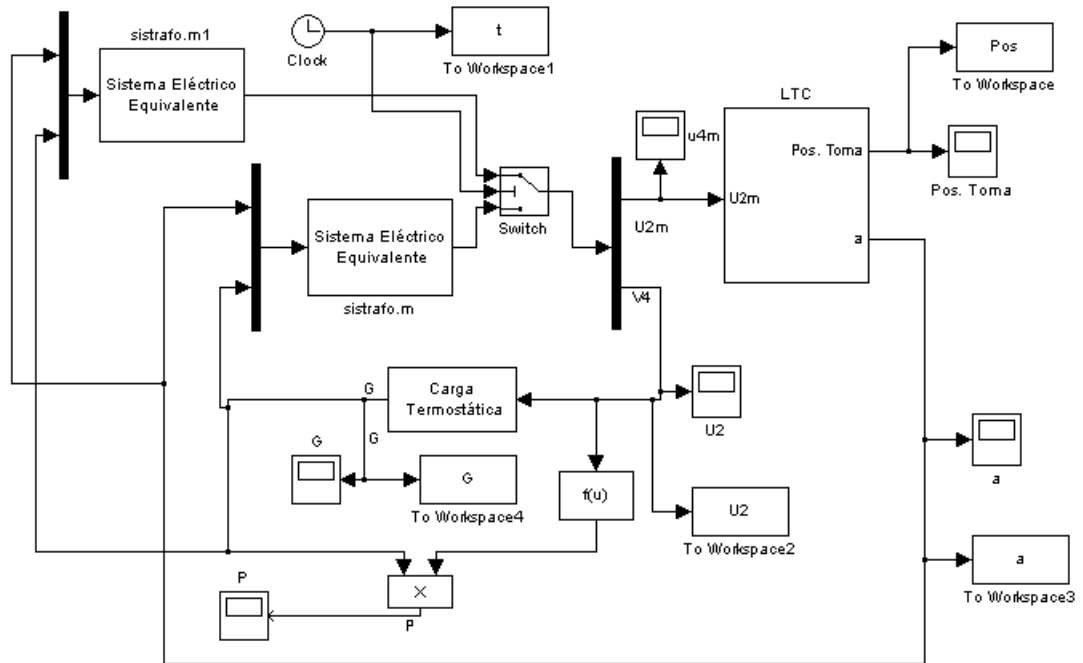


Figura C.11: Diagrama en SIMULINK del sistema caso 2 y 3

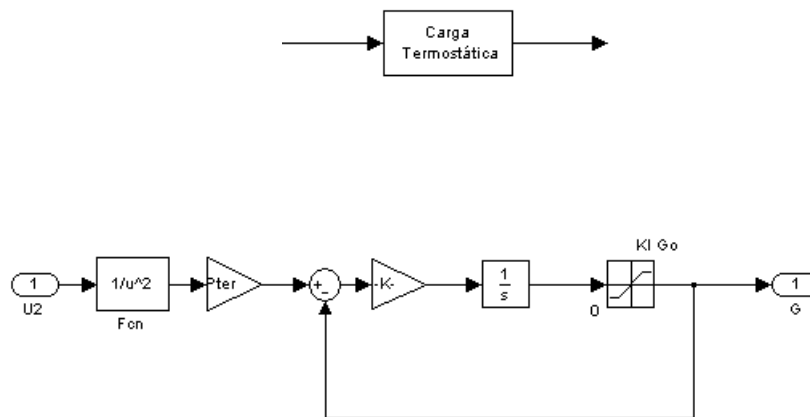


Figura C.12: Diagrama de bloques en SIMULINK de la carga controlada por termostato

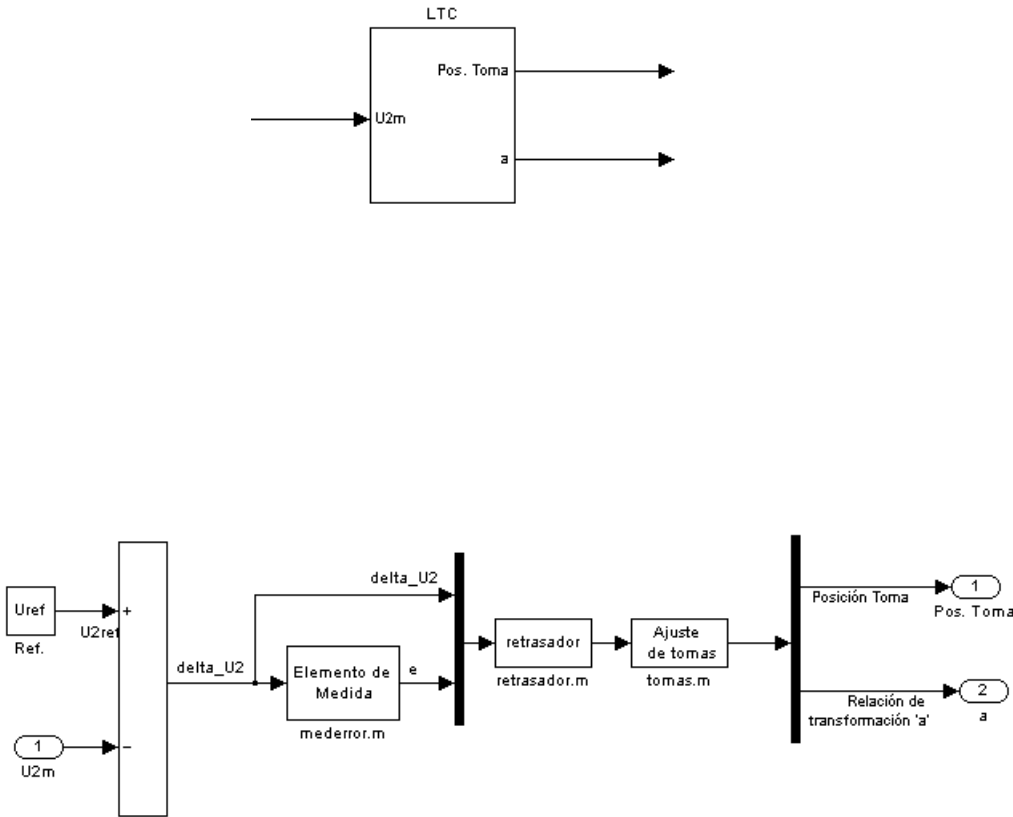


Figura C.13: Diagrama en SIMULINK del ULTC

```
% Descripción: sistrafo.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matlab.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas son devueltas en sys
%
% Objetivo :
% Representar sistema eléctrico equivalente conectado a la carga termostática y LTC
function [sys, x0 ]=sistrafo(t,x,u,flag,U1,gU1,Rtrafo,Xtrafo,Rc,Xc,Kld,P2t,Q2t,Kg,Rload,Rsis,Xsis)
% Parámetros :
% U1 : Módulo tensión del primario
% gU1: ángulo en grados de la tensión del primario
% Rtrafo,Xtrafo : Parámetros trafo
% Rc, Xc: Compensación line drop (va en serie con sec. trafo)
% Kld : Factor de compensación line drop
% P2t, Q2t : Carga en sec. trafo.
% Kg : Variable auxiliar que toma los siguientes valores:
% Kg = 1 Modelo con carga termostática
% Kg = 0 Modelo sin carga termostática
% Rload : Resistencia de carga independiente de la tensión
% Rsis : Resistencia del sistema equivalente conectado al trafo
% Xsis : Reactancia del sistema equivalente conectado al trafo
% Variables de Salida
% sys(1) = u2m : Tensión en punto de compensación line drop
% sys(2) = u2 : Tensión en la carga
% Variables de entrada:
% u(1) = Relación de transformación
% u(2) = G termostática (variable en el tiempo con el cuadrado de la tensión)
```

Figura C.14: sistrafo.m

```

if flag==3
    %salida del sistema
    U1=U1*exp(j*gU1*pi/180); %Tensión del equivalente del sistema
    Rtrafo=Rtrafo+Rsis/u(1)^2;
    Xt=Xtrafo+Xsis/u(1)^2;
    if Rload==0
        Gload=0;
    else
        Gload=1/Rload;
    end
    if Kg==0
        G=Gload;
    else
        G=u(2)+Gload;
    end
    A=1 + 2*Rtrafo*G + (Rtrafo^2 + Xt^2)*G^2;
    B=2*Rtrafo*P2t + 2*Xt*Q2t + (Rtrafo^2 + Xt^2)*2*P2t*G - (abs(U1)/u(1))^2;
    C=(P2t^2 + Q2t^2)*(Rtrafo^2 + Xt^2);
    u2=max(roots([A B C])); %Cuadrado de la tension en la carga u2
    Pt=P2t+G*u2; Qt=Q2t;
    St=Pt+j*Qt;
    teta2=gU1*pi/180 - asin( (Xt*Pt-Rtrafo*Qt) / ( abs(U1)/u(1)*sqrt(u2) ) );
    u2t=sqrt(u2)*exp(j*teta2);
    I2=conj(St/u2t);
    U2m=U1/u(1) - I2*(Rtrafo+Kld*Rc+j*(Xt+Kld*Xc));
    sys(1)=abs(U2m);
    sys(2)=sqrt(u2);
    %sys(2)=abs(U2m+Kld*(Rc+j*Xc)); sys(2)=7;
elseif flag==0
    %parametros y condiciones iniciales
    %1ro: Numero de estados continuos
    %2do: Numero estados discretos
    %3ro: Numero de salidas X
    %4to: Numero de entradas U
    % los otros cero
    sys=[0;0;2;2;0;1];
    x0=[ ];
else
    sys=[ ];
end
end

```

Figura C.15: sistrafo.m continuación

```

% Descripción : mederror.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matlab.
% y = f(u)  u : entradas  y : Salidas son devueltas en sys
% Objetivo : Determinar actuación de las tomas del LTC en función de la
% variación de la tensión de entrada.
function [sys, x0] =mederror(t,x,u,flag,DB)
global aux ;
% Parámetros :
% DB : Zona Muerta, variacion de tensión que detecta (pu.)
% Variables de Salida:
% sys(1) = 'e' +1: Incrementar toma
% -1: decrementar toma
% 0: Mantener toma
% Variables de entrada:
% u(1) = Error de variación de tensión = Uref - Umedido
if flag==3 %salida del sistema
    if t==0;
        aux=0;
    end
    if u(1) >= -DB & u(1)<=DB
        sys(1)=0;
    elseif u(1) >DB
        sys(1)=1;
    elseif u(1) <-DB
        sys(1)=-1;
    end
    aux=u(1);
elseif flag==0
    %parámetros y condiciones iniciales
    %1ro: Número de estados continuos
    %2do: Número estados discretos
    %3ro: Número de salidas X
    %4to: Número de entradas U
    % los otros cero
    sys=[0;0;1;1;0;1];
    x0=[ ];
else
    sys=[ ];
end

```

Figura C.16: mederror.m

```
% Descripción : retrasador.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matlab.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas son devueltas en sys
%
% Objetivo :
% Producir un retraso en la actuación del LTC
%
function [sys, x0 ]=retrasador(t,x,u,flag,DB,Tdo)
global tlast contador contadorb
%Parámetros
% DB : Zona Muerta, variacion de tensión que detecta
% Tdo : Retraso inicial
%Variables de Salida
% sys(1) = b 1: Ordena actuacion del motor que cambia tomas (sube)
% -1: Ordena actuacion del motor que cambia tomas (baja)
% 0: No actuacion del motor
%Variables de entrada:
% u(1) : Error de variación de tensión = Uref - Umedido
% u(2) : e +1: Incrementar toma
% -1: decrementar toma
% 0: Mantener toma
if flag==3 %salida del sistema
    if t==0
        tlast=0;
        contador=0;
        contadorb=0;
    end
    if u(1)== 0
        Td=Tdo;
    else
        Td=Tdo/abs(u(1)/DB);
    end
end
```

Figura C.17: retrasador.m

```
if u(2)==0
    sys(1)=0;
    contador=0;
    contadorb=0;
elseif u(2)==1
    contador=contador+(t-tlast);
    contadorb=0;
    if contador>Td
        sys(1)=1;
        contador=0;
        contadorb=0;
    else
        sys(1)=0;
    end
elseif u(2)==-1
    contadorb=contadorb+(t-tlast);
    contador=0;
    if contadorb>Td
        sys(1)=-1;
        contadorb=0;
        contador=0;
    else
        sys(1)=0;
    end
end
tlast=t;
elseif flag==0
    %parametros y condiciones iniciales
    %1ro: Número de estados continuos
    %2do: Número estados discretos
    %3ro: Número de salidas X
    %4to: Número de entradas U
    %Los otros cero
    sys=[0;0;1;2;0;1];
    x0=[ ];
else
    sys=[ ];
end
```

Figura C.18: retrasador.m continuación

```
% Descripción : tomas.m
%
% Este bloque S-function actua como una subrutina ejecutada en Matlab.
% no existen variables continuas (derivadas)
% se evalua la salida como:
% y = f(u)
% u : entradas
% y : Salidas son devueltas en sys
%
% Objetivo :
% Cambiar la toma del LTC de una posición a otra
function [sys, x0 ]=tomas(t,x,u,flag,incrtoma,tinic,tmin,tmax)
global toma
% Parámetros:
% incrtoma: incremento de tomas (delta_a)
% tinic : Posición inicial de la toma
% tmin : Posicion minima de la toma
% tmax : Posicion máxima de la toma
% Variables de Salida
% sys(1) : Posición de la toma entre [-10,10]
% sys(2) : Relación de transformación actualizada
% Variables de entrada:
% u(1) : Salida retrasador (b) -1: Incrementar toma
% +1: decrementar toma
% 0: Mantener toma (no actua motor)
```

Figura C.19: Tomas.m

```
if t==0
    toma=tinic; %Posición inicial de la toma entre [-10,10] de uno en uno
end
if flag==3 % salida del sistema
    if u(1)==-1 delta_n=1;end
    if u(1)==0 delta_n=0; end
    if u(1)==1 delta_n=-1; end
    toma=toma+delta_n;
    if toma >tmax
        toma=tmax;
    elseif toma<tmin
        toma=tmin;
    end
    sys(1)=toma;
    sys(2)=1+toma*incrtoma
elseif flag==0
    %parámetros y condiciones iniciales
    %1ro: Número de estados continuos
    %2do: Número estados discretos
    %3ro: Número de salidas X
    %4to: Número de entradas U
    % los otros cero
    sys=[0;0;2;1;0;1];
    x0=[ ]; toma=tinic;
else
    sys=[ ];
end
```

Figura C.20: Tomas.m continuación

Apéndice D

Manual del Usuario

D.1. Introducción

Este apéndice contiene el manual del usuario de los modelos de carga y dispositivos de control implementados en el paquete HAGP, cuyo trabajo fue desarrollado por Lizette Mejía bajo la dirección del Dr. Hermann Vargas durante la realización de un proyecto de grado en la Universidad Industrial de Santander. El propósito de tal proyecto era el de elaborar una herramienta software tipo prototipo con el fin de utilizarla en diferentes actividades académicas. No se cambió la filosofía del HAGP y por lo tanto puede ser modificado fácilmente para incluir diferentes algoritmos de solución y modelos de los elementos del sistema, que posibilite su aplicación a otros tipos de estudios (estabilidad de pequeña señal, estabilidad de tensión de pequeña perturbación, etc). Cabe notar que también posee las mismas restricciones y simplificaciones.

Este manual contiene exclusivamente los parámetros de los datos de entrada de motores de inducción, cargas con restauración termostática, compensadores estático de reactiva, sistema de control del ULTC y cargas de modelo genérico multiplicativo. Para obtener información de los generadores, sistemas de excitación y control, además de otras instrucciones de simulación y datos del sistema, consultar [Rodríguez, 2003].

D.2. Instalación y ejecución del HAGP modificado

HAGP puede ser instalado en PC con versiones de MATLAB 5.3 o superiores, el proceso de instalación comprende los siguientes pasos:

1. Descomprimir la carpeta de archivos HAGP 2.3 utilizando WinZip.
2. Copiar la carpeta con el conjunto de funciones HAGP en un directorio determinado.
3. Adicionar al *path* de MATLAB la carpeta y subcarpetas del HAGP.

Para ejecutar HAGP, se escribe (en la ventana de comandos de MATLAB) la siguiente instrucción:

```
>>hagp('nombre')
```

Donde *nombre* corresponde a un archivo de datos de MATLAB (sin la extensión .m) en el cual se especifican las características del sistema de potencia y de la simulación. Si simplemente se escribe >>hagp sin especificar el nombre del archivo, se ejecuta el caso por defecto, incluido en el archivo dc1asvc.m. La forma de construir los archivos de datos de entrada se detalla en la sección D.3. Luego de escribir la instrucción `hagp(nombre)` es posible observar la descripción del caso y dar inicio a la simulación o cancelarla (ver figura D.1).

```
=====
SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE SISTEMAS DE POTENCIA
ANTE GRANDES PERTURBACIONES
=====

DESCRIPCIÓN DEL CASO
-----
Ejemplo 14.6 Kundur con motor de induccion

ADVERTENCIA: El tiempo de simulación depende de las características del sistema de
potencia, de la velocidad de cómputo y de la simulación misma.

Iniciar simulación?(s/n) ---
```

Figura D.1: Pantalla de entrada

Si se da inicio a la simulación, se puede observar su evolución en cada paso de tiempo. Una vez culminada, aparece el tiempo de simulación, el factor de linealidad de la solución y el menú de resultados, a partir del cual se pueden generar gráficas de la respuesta en el tiempo de las diferentes magnitudes (ver figura D.2).

Para visualizar los resultados de la variación de conductancia de una carga controlada por termostato, se escoge la opción 10 (resultados por barra) del menú de resultados

y se digita la barra de dicha carga. Luego aparece un menú de resultados por barra, mostrado en la figura D.3, la opción 5 para la conductancia de carga.

Para visualizar los resultados de la variación de la velocidad del motor de inducción, se sigue el mismo procedimiento. El menú de resultados por barra para el motor se muestra en la figura D.4. Si se desea otro tipo de resultado se escoge una opción diferente de acuerdo al código correspondiente.

Cuando el sistema de potencia simulado posee al menos un ULTC, el menú de resultados que aparece es el mostrado en la figura D.5. Para ver los resultados por ULTC se digita la opción 12 y posteriormente se especifican las barras del primario y del secundario del transformador. Al instante aparece el menú ilustrado en la figura D.6, el cual permite visualizar los resultados de las tensiones y del tap del ULTC. Con la opción número cero se regresa al menú al menú principal. A su vez, en el menú principal, con la opción número cero se sale del programa.

```

=====
                                RESULTADOS
=====

Tiempo de simulación ... 7.12 s
Relación pasos de tiempo a iteraciones ... 1.0000

                                TIPO DE RESULTADO                CÓDIGO

ángulos de rotores ----- 1
desviación de velocidades rotóricas --- 2
tensiones de barra ----- 3
corrientes de barra ----- 4
potencias de rama ----- 5
corrientes de rama ----- 6
impedancia aparente medida por relé --- 7
resultados por generador ----- 8
resultados por área ----- 9
resultados por barra ----- 10
jacobiano del sistema ----- 11
salir del programa ----- 0

TIPO DE RESULTADO A VISUALIZAR --- 10

RESULTADOS POR BARRA
-----
Número de barra ---

```

Figura D.2: Pantalla de salida

```

                                RESULTADOS BARRA # 4
                                -----
                                TIPO DE RESULTADO          CÓDIGO

tensión en barra ----- 1
potencias de barra ----- 2
potencias inyectadas en barra ----- 3
corriente de barra ----- 4
conductancia de barra ----- 5
regresar ----- 0

TIPO DE RESULTADO A VISUALIZAR ---

```

Figura D.3: Resultados para la barra con carga controlada por termostato

```

                                RESULTADOS BARRA # 10
                                -----
                                TIPO DE RESULTADO          CÓDIGO

tensión en barra ----- 1
potencias de barra ----- 2
potencias inyectadas en barra ----- 3
corriente de barra ----- 4
velocidad del rotor ----- 5
regresar ----- 0

TIPO DE RESULTADO A VISUALIZAR ---

```

Figura D.4: Resultados de barra con motor de inducción

```

=====
                                RESULTADOS
=====

Tiempo de simulación ... 6.75 s
Relación pasos de tiempo a iteraciones ... 1.0000

                                TIPO DE RESULTADO                                CÓDIGO

ángulos de rotores ----- 1
desviación de velocidades rotóricas --- 2
tensiones de barra ----- 3
corrientes de barra ----- 4
potencias de rama ----- 5
corrientes de rama ----- 6
impedancia aparente medida por relé --- 7
resultados por generador ----- 8
resultados por área ----- 9
resultados por barra ----- 10
jacobiano del sistema ----- 11
resultados por ULTC ----- 12
salir del programa ----- 0

TIPO DE RESULTADO A VISUALIZAR --- 12

Número de barra del primario ---
Número de barra del secundario ---

```

Figura D.5: Pantalla de salida para el ULTC

```

                                RESULTADOS POR ULTC

                                Barra del primario: 3
                                Barra del secundario: 4

                                TIPO DE RESULTADO                                CÓDIGO

tensión en barra primaria ----- 1
tensión en barra secundaria ----- 2
posicion del tap ----- 3
regresar ----- 0

TIPO DE RESULTADO A VISUALIZAR ---

```

Figura D.6: Resultados por ULTC

D.3. Datos de entrada

La entrada de datos se realiza por medio de archivos de MATLAB que contienen datos de los elementos dinámicos como se muestra a continuación:

- **motorind** = matriz de datos de motores de inducción. Cada fila de la matriz corresponde a un conjunto de datos de un motor determinado, cuyos parámetros corresponden a cada columna.

1. Número de barra a la cual se conecta el motor.
2. Status inicial del motor. Motor en línea = 1, motor desconectado = 0.
3. R_s = resistencia del estator, pu.
4. X_s = reactancia del estator, pu.
5. R_r = resistencia del rotor, pu.
6. X_r = reactancia del rotor, pu.
7. X_m = reactancia de magnetización, pu.
8. H = constante de inercia, s.
9. T_0 = constante de torque de carga, pu.
10. P_m = demanda de potencia activa del motor, en MW.
11. Q_m = demanda de potencia reactiva del motor, en MVAR.

Notas: La demanda de potencia reactiva especificada cambia con el análisis de flujo de carga. La potencia activa permanece constante.

- **tercar** = matriz de datos de las cargas controladas por termostato. Cada renglón de la matriz corresponde a una carga determinada, cuyos datos se incluyen en las columnas de dicho renglón. Los datos correspondientes a cada columna son:

1. número de barra a la cual se conecta la carga.

2. T_1 = constante de tiempo de carga, s.
3. K_p = ganancia del controlador proporcional.
4. T_C = constante de tiempo del controlador integral, s.
5. K_I = ganancia del controlador integral.
6. K_1 = ganancia asociada con el modelo de carga.
7. FG_{\max} = factor del valor máximo de conductancia de carga G , $G_{\max} = FG_{\max} * G$.
8. τ_A = temperatura ambiente, °C.
9. P = demanda de potencia activa, MW.
10. Status inicial de la carga. Carga en línea = 1, carga desconectada = 0.

Notas: Todas las constantes de tiempo deben ser diferentes de cero.

- **ultc** = matriz de datos de los ULTCs del sistema. Cada fila de la matriz corresponde a un transformador determinado, cuyos datos se incluyen en las columnas de dicha fila. Los datos correspondientes a cada columna son:

1. f = número de barran no controlada.
2. t = número de barra controlada.
3. T_m = retardo de tiempo inherente al equipo, es decir al retardo en la respuesta mecánica del motor del cambia tap, s.
4. T_{DO} = tiempo de retraso introducido para el primer movimiento del tap, s.
5. T_{D1} = tiempo de retraso introducido para posteriores movimientos del tap, s.
6. D = ancho de banda muerta.
7. η_{\max} = límite máximo del tap, pu.
8. η_{\min} = límite mínimo del tap, pu.
9. Ancho del paso del tap.

10. ε = ancho de banda de histéresis.
11. R_C = resistencia del compensador, pu.
12. X_C = reactancia del compensador, pu.

Notas: Si no se utiliza compensador hacer $R_C = 0$ y $X_C = 0$. Si no se tiene en cuenta la histéresis se hace $\varepsilon = 0$. Si no se tiene en cuenta el retardo mecánico se hace $T_m = 0$.

- **svc** = matriz de datos de los SVCs del sistema. Cada fila de la matriz corresponde a un SVC determinado, cuyos datos se incluyen en las columnas de dicha fila. Los datos correspondientes a cada columna son:

1. Número de barra a la cual se conecta el SVC.
2. V_{ref} = tensión de referencia, en pu.
3. T_n = constante de tiempo de adelanto del regulador de tensión, segundos.
4. T_d = constante de tiempo de atraso del regulador de tensión, segundos.
5. T_r = constante de tiempo de atraso del TCR, segundos.
6. K = Ganancia del regulador.
7. B_{max} = valor de susceptancia máximo del SVC, MVAR.
8. B_{mn} = valor de susceptancia mínimo del SVC, MVAR.
9. Status inicial del SVC. SVC en línea = 1, SVC desconectado = 0.

Notas: Todas las constantes de tiempo deben ser diferentes de cero.

- **cargamul** = matriz de datos de las cargas genéricas del sistema. Cada fila de la matriz corresponde a una carga determinada, cuyos datos se incluyen en las columnas de dicha fila. Los datos correspondientes a cada columna son:

1. Número de barra a la cual se conecta la carga.
2. T_P = constante de tiempo, en segundos.

3. T_Q = constante de tiempo , en segundos.
4. α_s = exponente estacionario de carga.
5. β_s = exponente estacionario de carga.
6. α_t = exponente transitorio de carga.
7. β_t = exponente transitorio de carga.
8. Z_P^{mn} = valor máximo de la variable de estado Z_P .
9. Z_P^{max} = valor mínimo de la variable de estado Z_P .
10. Z_Q^{mn} = valor mínimo de la variable de estado Z_Q .
11. Z_Q^{max} = valor máximo de la variable de estado Z_Q .
12. P = demanda de potencia activa, MW.
13. Q = demanda de potencia reactiva, MVAR.
14. Status inicial de la carga. Carga en línea = 1, carga desconectada = 0.

Notas: Todas las constantes de tiempo deben ser diferentes de cero.

D.4. Recomendaciones y observaciones

- El tap del ULTC debe ser real.
- Los datos de entrada en pu de los modelos implementados deben estar en la base del sistema.
- Para estudios a mediano y largo plazo se recomienda utilizar un mayor paso de integración para evitar simulaciones muy demoradas.
- Todo sistema a simular debe tener al menos un elemento dinámico distinto al ULTC.

- Para ver el impacto del motor de inducción y el SVC en el sistema basta con tiempo de simulaciones pequeños. En cambio tiempos mayores son necesarios para ver la respuesta de dispositivos como el ULTC y las cargas de restauración propia.
- El valor de las constantes de tiempo de los modelos determinan la velocidad de respuesta de estos. Para constantes de tiempo de retardo altas, el fenómeno de cambio de las variables de estado se hace más lento.