

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

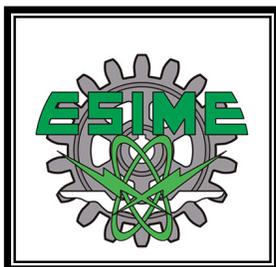
**MODELOS DE MOTORES DE INDUCCIÓN PARA
ESTUDIOS ESTÁTICOS DE SISTEMAS DE POTENCIA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA:

JESÚS CARMONA SÁNCHEZ



MÉXICO, D. F.

2010



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 13:00 horas del día 6 del mes de Septiembre del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

“MODELOS DE MOTORES DE INDUCCIÓN PARA ESTUDIOS ESTÁTICOS DE SISTEMAS DE POTENCIA”

Presentada por el alumno:

CARMONA
Apellido paterno

SÁNCHEZ
materno

JESÚS
nombre(s)

Con registro:

B	0	8	1	2	4	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

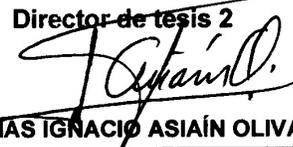
Directores de tesis 1


DR. DANIEL RUIZ VEGA

Presidente


DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

Director de tesis 2


M. EN C. TOMÁS IGNACIO ASIAÍN OLIVARES

Tercer Vocal


DR. RICARDO OCTAVIO ARTURO MOTA PALOMINO

Secretario


DR. DAVID ROMERO ROMERO

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


DR. JAIME ROBLES GARCÍA





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México D. F., el día 6 del mes de Septiembre del año 2010 el que suscribe Jesús Carmona Sánchez, alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con número de registro B081240, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-Zacatenco del IPN, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Daniel Ruiz Vega y el M. en C. Tomás Ignacio Asiaín Olivares y cede los derechos del trabajo intitulado Modelos de Motores de Inducción para Estudios Estáticos de Sistemas de Potencia, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **carmonaipn@live.com.mx**, y/o **drv_liege@yahoo.com**, y/o **yeriak1@yahoo.com.mx**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'J. Carmona', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

Jesús Carmona Sánchez

RESUMEN

Una parte importante de la carga del sistema eléctrico de potencia está conformada por motores de inducción, y el efecto de este tipo de cargas en la mayoría de los sistemas es significativo, ya que son cargas que tienden a restaurar su consumo después de un disturbio. Se ha demostrado que en algunos sistemas que operan cerca de sus límites de estabilidad es necesario modelar este tipo de carga detalladamente para poder reproducir el comportamiento dinámico del sistema de potencia registrado al ocurrir apagones. De esta manera, la representación de carga de motores de inducción se debe mejorar en todos los estudios de sistemas de potencia, incluyendo los estudios que utilizan modelos estáticos de los componentes del sistema de potencia, como son los estudios de flujos de potencia y de estabilidad de voltaje de largo plazo. En estos estudios comúnmente se representa la carga en el nivel de la red de transmisión con una característica estática de potencia constante, la cual es inadecuada para representar el comportamiento del motor de inducción ante variaciones lentas de su voltaje terminal.

Esta es la razón por la cual en este trabajo de tesis se desarrollan dos nuevos modelos estáticos del motor de inducción, siguiendo un procedimiento sistemático, con los siguientes resultados principales:

- a) Se presenta una revisión crítica de los modelos estáticos de motores de inducción que han sido propuestos en la literatura de sistemas de potencia, que se complementan con dos nuevos modelos propuestos en este trabajo.
- b) Se verifica el desempeño de los diferentes modelos del motor de inducción en estudios de flujos de potencia, y en la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción para estudios de estabilidad de voltaje de corto plazo.
- c) Se determinan, por medio de un estudio del comportamiento dinámico del motor ante variaciones lentas del voltaje en sus terminales, los modelos adecuados para representar al motor en sus diferentes regiones de funcionamiento y su desempeño se prueba en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo.

Los modelos propuestos en este trabajo, además de representar al motor de inducción de manera adecuada en todas sus regiones de funcionamiento, tienen la importante ventaja de que son lo suficientemente flexibles como para ser aplicados en cualquier programa de simulación. La herramienta computacional utilizada para el desarrollo y validación de los modelos es un programa propio desarrollado en lenguaje FORTRAN 77 llamado "FLUJOS", pero los nuevos modelos son finalmente validados en simulaciones estáticas con el programa PSS/E® versión 29 de SIEMENS, que proveen resultados idénticos a los del programa "FLUJOS".

ABSTRACT

An important part of the load of electric power systems is composed of induction motors, and the effect of this type of loads in most systems is significant, because these loads restore its power consumption after a disturbance happens. It has been demonstrated that, in some systems operating near its stability limits, it is necessary to model this type of load in detail, in order to be able to reproduce the dynamic system behavior registered during a blackout. In this way, induction motor load representation should be improved in all power system studies, including the ones that use static models of the power system components, like power flow and long term voltage stability studies. In these studies, load is usually represented at the transmission network level by a constant power load static characteristic, which is inadequate to represent induction motor behavior under slow terminal voltage variations.

This is the reason why this M.Sc. Thesis work developed two new static induction motor models, following a systematic procedure, with the following main results:

- a) It presents a critical review of the static induction motor models that have been published in the power systems literature, and complements them with two new models proposed in this work.
- b) The performance of the different induction motor models is verified in the power flow study and in the initialization of induction motor dynamic models for short term voltage stability studies.
- c) It is determined, by means of a study of the motor behavior under slow terminal voltage variations, the static models suitable to represent the motor in its different operating regions, and its performance is tested in long term voltage stability studies.

The models proposed in this work, besides representing induction motor in an adequate way in all its operating regions, have the important advantage of being flexible enough to be applied in any simulation program. The main computation tool for developing and validating the models was the program "FLUJOS", written in FORTRAN 77 language, but the models were finally validated in static simulations performed using the PSS/E[®] program, version 29, by SIEMENS, providing results identical to those of the "FLUJOS" program.

DEDICATORIA

Con mucho amor, cariño y respeto a mis padres:

Má. del Rosario Sánchez Domínguez

y

Porfirio Torres Valerio.

A mi abuela que me guió en
mis primeros años de vida:

Pelia Domínguez Márquez

AGRADECIMIENTOS

A todos mis profesores de la SEPI-ESIME-ZACATENCO por brindarme conocimientos de calidad, los cuales me han servido de mucho en este trayecto de tres años dentro del IPN.

A mis asesores: Dr. Daniel Ruiz Vega y al M. en C. Tomás Ignacio Asiaín Olivares. Por su ayuda incondicional en la realización de esta tesis. Al maestro Tomás por sus conocimientos aportados sobre el comportamiento del motor de inducción, los cuales son una base fundamental para la comprensión del efecto de estas cargas en los sistemas eléctricos de potencia. Al Dr. Daniel Ruiz, quien fue fundamental en el desarrollo de este trabajo, proporcionando material bibliográfico de gran ayuda y excelentes ideas para la culminación de esta tesis.

A los distinguidos profesores que conforman mi jurado de tesis: Dr. Daniel Olguín Salinas, Dr. David Romero Romero, Dr. Ricardo Octavio Mota Palomino, y al Dr. Fermín Pascual Espino Cortes. Quienes han aportado excelentes recomendaciones para la mejora de este trabajo.

A mi gran amigo y gran maestro Mario Alejandro Peña Galeana, quien me ha guiado e instruido en la grata experiencia de mejorar día a día, el cual además a influido grandemente en mi decisión de continuar con los estudios de maestría y doctorado, ya que como el dice: "Las cosas son por alguna razón". Cabe mencionar que ha sido patrocinador de mis estudios.

Al Dr. Jaime José Rodríguez Rivas, coordinador del programa de maestría de ingeniería eléctrica de la SEPI-ESIME-ZACATENCO, por su excelente desempeño en su cargo (proporcionándole a los alumnos de maestría información sobre otros programas de calidad a nivel mundial), lo cual me ha permitido tener la posibilidad de continuar con el doctorado.

Al M. en C. Arturo Galán Martínez por sus conocimientos, consejos y platicas que me han servido en lo académico como en lo personal.

Un especial agradecimiento a la secretaria del departamento de eléctrica, la Sra. Lilia Cruz Durán por su ayuda, gran eficiencia y amabilidad en los tramites que competen al departamento de eléctrica de la SEPI-ESIME-ZACATENCO.

A la Lic. en educación preescolar Karen Anali Estrada Nabor por su ayuda en la corroboración de los resultados del Apéndice B.

Al CONACyT y al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría en la SEPI-ESIME-ZACATENCO mediante el programa de becas de maestría y PIFI respectivamente.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
DEDICATORIA	XI
AGRADECIMIENTOS	XIII
CONTENIDO	XV
LISTA DE FIGURAS	XIX
LISTA DE TABLAS	XXV
NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS	XXVII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 ANTECEDENTES	5
1.4.1 Trabajos más importantes en el desarrollo de modelos estáticos del motor de inducción para estudios de flujos de potencia	5
1.4.3 Trabajos más importantes en la aplicación de modelos estáticos del motor de inducción a la inicialización de modelos dinámicos del motor	7
1.4.2 Trabajos más importantes en la aplicación de modelos estáticos del motor de inducción a estudios de flujos de potencia y de estabilidad de voltaje de largo plazo	7
1.5 LIMITACIONES Y ALCANCES	8
1.5.1 Limitaciones.....	8
1.5.2 Alcances.....	9
1.6 APORTACIONES.....	9
1.7 PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS	10
1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	10
CAPÍTULO 2: MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	13
2.1 INTRODUCCIÓN.....	13
2.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR EN ESTADO ESTACIONARIO	16
2.3 GRUPO 1: MODELOS CON CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA CONSTANTE.....	17
2.3.1 Modelo 1: Modelo que considera a la carga de motores de inducción con una característica de potencia constante (P y Q).....	17
2.4 GRUPO 2: MODELOS QUE MANTIENEN CONSTANTE LA POTENCIA ACTIVA	17
2.4.1 Modelo 2: Modelo estático que mantiene constante la potencia activa del motor.....	17
2.4.2 Modelo 3: Modelo estático delta-dos-nodos que mantiene constante la potencia activa del motor	18
2.5 GRUPO 3: MODELOS QUE MANTIENEN CONSTANTE AL DESLIZAMIENTO	20
2.5.1 Modelo 4: Modelo estático que mantiene constante al deslizamiento que incluye las ecuaciones del circuito de estado estacionario en la matriz Jacobiana del sistema	20

	Página
2.5.2 Modelo 5: Modelo estático de impedancia equivalente que considera al deslizamiento constante	21
2.5.3 Modelo 6: Modelo estático de dos nodos, obtenido a partir del circuito equivalente en estado estacionario del motor de inducción, que mantiene el deslizamiento constante	22
2.5.4 Modelo estático del motor de inducción derivado del modelo dinámico de tercer orden del motor de inducción	23
CAPÍTULO 3: REPRESENTACIÓN DE MOTORES DE INDUCCIÓN EN EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA	27
3.1 INTRODUCCIÓN	27
3.2 EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA	27
3.2.1. Condicionamiento de la matriz de admitancias de nodo del sistema	28
3.3 REPRESENTACIÓN DE LOS MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR EN EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA	29
3.3.1 Representación del Modelo 1	29
3.3.2 Representación del Modelo 2	30
3.3.3 Representación del Modelo 3	31
3.3.4 Representación del Modelo 4	33
3.3.5 Representación del Modelo 5	33
3.3.6 Representación del Modelo 6	34
3.3.7 Representación del Modelo 7	35
3.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
3.4.1 Sistema de Prueba Taylor 10-Nodos	37
3.4.2 Sistema de Prueba CIGRE 32-Nodos	40
3.4.3 Validación de las simulaciones de flujos de potencia del sistema Taylor 10-nodos con el programa PSS/E® versión 29	44
3.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	45
CAPÍTULO 4: INICIALIZACIÓN DE MODELOS DINÁMICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	47
4.1 INTRODUCCIÓN	47
4.2 INICIALIZACIÓN DE MODELOS DINÁMICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	48
4.3 MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN DE LOS MODELOS DINÁMICOS	49
4.3.1 Método de Inicialización 1	49
4.3.2 Método de Inicialización 2	51
4.3.3 Método de Inicialización 3	51
4.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
4.4.1 Sistema de Prueba Taylor 10-Nodos	52
4.4.2 Inicialización de los motores de inducción del sistema Taylor 10-Nodos por los tres métodos utilizando el programa FLUJOS	53
4.4.3 Validación de la inicialización de los motores del sistema Taylor 10-Nodos por los tres métodos, utilizando el programa PSS/E® versión 29	56
4.4.4 Estudios de estabilidad de corto plazo del sistema Taylor 10-Nodos	58
4.5 COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN ANTE VARIACIONES LENTAS DEL VOLTAJE EN TERMINALES	65
4.5.1 Regiones de funcionamiento del motor de inducción.	66
4.5.2 Proceso de detención de los motores de inducción.	67
4.5.3 Simulación del proceso de detención y de las regiones de funcionamiento del motor de inducción	67
4.6 CONCLUSIONES DE ESTE CAPÍTULO	72

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE LARGO PLAZO INCLUYENDO MOTORES DE INDUCCIÓN	75
5.1 INTRODUCCIÓN	75
5.1.1 <i>Comportamiento típico de la carga con respecto al tiempo en los SEP's</i>	77
5.2 ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	78
5.2.1 <i>La cargabilidad de sistemas eléctricos de potencia</i>	82
5.2.2 <i>El método de las curvas PV</i>	84
5.3 ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE LARGO PLAZO UTILIZANDO MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR	87
5.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	88
5.4.1 <i>Sistema de Prueba Taylor 10-Nodos (Tres-Motores)</i>	88
5.4.2 <i>Resultados del estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo del Sistema Taylor 10-Nodos con el programa FLUJOS</i>	89
5.4.3 <i>Sistema de Prueba CIGRE 32-Nodos (Siete-Motores)</i>	93
5.4.4 <i>Resultados del estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo del Sistema CIGRE 32-Nodos con el programa FLUJOS</i>	93
5.4.5 <i>Validación Resultados del Sistema de Prueba CIGRE 32-Nodos con el Programa PSS/E®</i>	98
5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	99
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	101
6.1 CONCLUSIONES	101
6.2 APORTACIONES	103
6.3 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS	103
REFERENCIAS	107
APÉNDICE A: DATOS Y ESTADO INICIAL DEL SISTEMA DE PRUEBA TAYLOR DE 10 NODOS	113
A. 1. DATOS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS	113
A.2 CONDICION INICIAL DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS EMPLEANDO LOS DIFERENTES MODELOS ESTATICOS DEL MOTOR DE INDUCCION EN EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA	114
A.2.1 <i>Resultados empleando el Modelo 1</i>	114
A.2.2 <i>Resultados empleando el Modelo 2</i>	115
A.2.3 <i>Resultados empleando el Modelo 3</i>	116
A.2.4 <i>Resultados empleando el Modelo 4</i>	116
A.2.5 <i>Resultados empleando el Modelo 5</i>	117
A.2.6 <i>Resultados empleando el Modelo 6</i>	118
A.2.7 <i>Resultados empleando el Modelo 7</i>	118
APÉNDICE B: DATOS Y ESTADO INICIAL DEL SISTEMA DE PRUEBA CIGRE DE 32 NODOS	121
B.1. DATOS DEL SISTEMA CIGRE 32-NODOS	121
B.2 CONDICION INICIAL DEL SISTEMA CIGRE 32-NODOS EMPLEANDO LOS DIFERENTES MODELOS ESTATICOS DEL MOTOR DE INDUCCION EN EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA	123
B.2.1 <i>Resultados empleando el Modelo Estático 1</i>	124
B.2.2 <i>Resultados empleando el Modelo Estático 2</i>	125
B.2.3 <i>Resultados empleando el Modelo Estático 3</i>	126
B.2.4 <i>Resultados empleando los Modelos Estáticos 4-7</i>	127
B.2.5 <i>Resultados de los Voltajes Nodales del sistema CIGRE 32-Nodos al emplear todos los modelos estáticos del motor de inducción</i>	128

APÉNDICE C: DATOS DINÁMICOS DEL SISTEMA DE PRUEBA TAYLOR DE 10 NODOS.....	129
C. 1. DATOS DINÁMICOS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS	129
APÉNDICE D: ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS CON EL PROGRAMA PSS/E-29.5.0®	131
D. 1. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN EL PROGRAMA PSS/E®.....	131
D. 2. ARCHIVOS DE ENTRADA DE DATOS PARA EL PROGRAMA PSS/E® DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS, PARA LOS MODELOS ESTATICOS DEL MOTOR QUE SOLO MODIFICAN EL ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL SISTEMA	138
<i>D.2.1 Archivo de entrada de datos utilizando el modelo estático 1</i>	<i>138</i>
<i>D.2.2 Archivo de entrada de datos utilizando el modelo estático 3</i>	<i>139</i>
<i>D.2.3 Archivo de entrada de datos utilizando el modelo estático 5</i>	<i>140</i>
<i>D.2.4 Archivo de entrada de datos utilizando el modelo estático 6</i>	<i>141</i>
<i>D.2.5 Archivo de entrada de datos utilizando el modelo estático 7</i>	<i>142</i>

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIG. 1.1. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	5
FIG. 2.1. CIRCUITO EQUIVALENTE DE ESTADO ESTACIONARIO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN (ADAPTADO DE [KUNDUR, 1994, RUIZ, 1996, LIU ET AL., 1997]).....	16
FIG. 2.2. TRANSFORMACIÓN INICIAL DEL MODELO ESTÁTICO 3 DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DE UN CIRCUITO ELÉCTRICO TIPO ESTRELLA A UNO DELTA.	18
FIG. 2.3. MODELO ESTÁTICO 3 DEL MOTOR DE INDUCCIÓN, CONSIDERANDO CONSTANTE LA POTENCIA ACTIVA DEL ESTATOR Y ROTOR.....	19
FIG. 2.4. MODELO ESTÁTICO 5 DE IMPEDANCIA EQUIVALENTE QUE CONSIDERA AL DESLIZAMIENTO S CONSTANTE.	21
FIG.2.5. MODELO ESTÁTICO 6 DEL MOTOR DE INDUCCIÓN QUE MANTIENE EL DESLIZAMIENTO CONSTANTE.	22
FIG. 2.6. CIRCUITO EQUIVALENTE DE THÉVENIN DEL MODELO DINÁMICO DE TERCER ORDEN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN (ADAPTADO DE [HENRIQUES ET AL., 2002, MARTINS ET AL., 2003]).....	23
FIG. 2.7. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DERIVADO DEL MODELO DINÁMICO DE TERCER ORDEN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN (ADAPTADO DE [HENRIQUES ET AL., 2002, MARTINS ET AL., 2003]).	25
FIG. 2.3. MODELO ESTÁTICO 3 DEL MOTOR DE INDUCCIÓN, CONSIDERANDO CONSTANTE LA POTENCIA ACTIVA DEL ESTATOR Y ROTOR.....	31
FIG.2.5. MODELO ESTÁTICO 6 DEL MOTOR DE INDUCCIÓN QUE MANTIENE EL DESLIZAMIENTO CONSTANTE.	34
FIG. 2.7. MODELO 7 DE ESTADO ESTACIONARIO DE DOS NODOS PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN (ADAPTADO DE [HENRIQUES ET AL., 2002, MARTINS ET AL., 2003]).	36
FIG. 3.1. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE PRUEBA TAYLOR 10-NODOS (ADAPTADO DE [TAYLOR, 1994]).....	37
FIG. 3.2. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE PRUEBA CIGRE 32-NODOS (ADAPTADO DE [CIGRE, 1995]).....	41
FIG. 3.1. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE PRUEBA TAYLOR 10-NODOS (ADAPTADO DE [TAYLOR, 1994]).....	53
FIG. 4.1. LAS FIGURAS A Y B MUESTRAN EL RESULTADO DEL COMPORTAMIENTO SIN FALLA DEL ÁNGULO DE CARGA DE LOS GENERADORES G2 Y G3 AL EMPLEAR LOS TRES MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN DE MODELOS DINÁMICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN AL SISTEMA DE LA FIG. 3.1 (EL GENERADOR G1 TIENE RESULTADOS SIMILARES).....	60
FIG. 4.2. LAS FIGURAS A Y B MUESTRAN EL RESULTADO DEL COMPORTAMIENTO SIN FALLA DE LA VELOCIDAD DE LOS MOTORES M1 Y M2 AL EMPLEAR LOS TRES MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN DE MODELOS DINÁMICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN AL SISTEMA DE LA FIG. 3.1 (EL MOTOR M3 TIENE RESULTADOS SIMILARES).....	60
FIG. 4.3. EFECTO DE LOS MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN EN EL ÁNGULO DE CARGA DEL GENERADOR G2 (CASO ESTABLE PARA TODOS LOS MÉTODOS). LA FALLA FUE LIBERADA EN 0.099 s	61

	Página
FIG. 4.4. EFECTO DE LOS MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN EN LA VELOCIDAD DEL MOTOR M3 (CASO ESTABLE PARA TODOS LOS MÉTODOS). LA FALLA FUE LIBERADA EN 0.099 S.....	61
FIG. 4.5. EFECTO DE LOS MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN EN LA VELOCIDAD DEL MOTOR M3 (CASO INESTABLE PARA EL MÉTODO 1). LA FALLA FUE LIBERADA EN 0.100 S.....	62
FIG. 4.6. ACERCAMIENTO DE LA FIG. 4.5 QUE MUESTRA EL EFECTO DE LOS MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN EN LA VELOCIDAD DEL MOTOR M3 (CASO INESTABLE PARA EL MÉTODO 1). LA FALLA FUE LIBERADA EN 0.100 S	63
FIG. 4.7. EFECTO DE LOS MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN EN EL ÁNGULO DE CARGA DEL GENERADOR G2 (CASO INESTABLE). LOS GENERADORES G1 Y G3 TIENEN UN COMPORTAMIENTO SIMILAR (TL= TIEMPO DE LIBERACIÓN).....	64
FIG. 4.8. EFECTO DE LOS MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN EN LA VELOCIDAD DEL MOTOR M3 (CASO INESTABLE), LOS MOTORES M1 Y M2 TIENEN UN COMPORTAMIENTO SIMILAR.....	64
FIG. 4.9. COMPORTAMIENTO TÍPICO DE LA POTENCIA ACTIVA (LÍNEA CONTINUA) Y REACTIVA (LÍNEA PUNTEADA) DEL MOTOR DE INDUCCIÓN ANTE VARIACIONES LENTAS DEL VOLTAJE TERMINAL CON CARGA MECÁNICA CONSTANTE (ADAPTADO DE [TAYLOR, 1994, RUIZ, 1996]).....	66
FIG. 4.10. DEPENDENCIA DE LAS VARIABLES (P, Q Y S) DEL MOTOR DE INDUCCIÓN CON RESPECTO A SU VOLTAJE EN TERMINALES (ADAPTADO DE [VÉNIKOV, 1988]).	66
FIG. 4.11. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE PRUEBA MOTOR – BUS INFINITO.	68
FIG. 4.12. CURVA VQ DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DONDE SE MUESTRA LA REGIÓN ESTABLE E INESTABLE Y LA REGIÓN DE PARO DEL MOTOR OBTENIDA CON LOS MODELOS ESTÁTICOS 2 Y 4 QUE MODIFICAN EL JACOBIANO DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA DE NEWTON – RAPHSON.	70
FIG. 4.13. CURVA VQ DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DONDE SE MUESTRA LA REGIÓN ESTABLE E INESTABLE Y LA REGIÓN DE PARO DEL MOTOR OBTENIDA CON LOS MODELOS ESTÁTICOS 3 Y 5 QUE MODIFICAN EL ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA DE NEWTON – RAPHSON.	71
FIG. 4.14. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS VQ DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DONDE SE MUESTRA LA REGIÓN ESTABLE E INESTABLE OBTENIDAS POR LOS DOS TIPOS DE MODELO (LOS QUE MODIFICAN EL JACOBIANO Y LOS QUE SOLO MODIFICAN EL ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA DE NEWTON – RAPHSON).....	71
FIG. 5.1. CURVAS DE DEMANDA HORARIA DEL ÁREA DE CONTROL CENTRAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO MEXICANO PARA DOS DÍAS DIFERENTES DE 1995 (ADAPTADO DE [RUIZ-VEGA, 2002, LÓPEZ, 2006]).	77
FIG. 5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE INESTABILIDAD EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA (ADAPTADO DE [RUIZ-VEGA, 2002, IEEE, 2004]).	79
FIG. 5.3. PERÍODO DE TIEMPO EN EL QUE SE DESARROLLAN LOS PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA CON RESPECTO A LAS BANDAS DE TIEMPO DE LOS DIFERENTES FENÓMENOS DINÁMICOS DE LOS SEP'S (ADAPTADO DE [ANDERSON ET AL., 1990, LÓPEZ, 2006]).	80
FIG. 5.4. SE MUESTRA UNA CURVA PV TÍPICA, SIEMPRE SE COMIENZA DESDE UN CASO BASE HASTA EL PUNTO DE BIFURCACIÓN NODO SILLA DE MONTAR (ADAPTADA DE [LÓPEZ, 2006]).	85

	Página
FIG. 5.5. SE MUESTRA UNA CURVA PV TÍPICA SIN CONTINGENCIA (LÍNEA SÓLIDA) Y CON CONTINGENCIA (LÍNEA PUNTEADA). EL PUNTO A REPRESENTA EL LÍMITE FÍSICO DE ESTABILIDAD SIN CONTINGENCIA, EL PUNTO B EL LÍMITE DE ESTABILIDAD CON CONTINGENCIA Y EL PUNTO C EL LÍMITE SEGURO DE OPERACIÓN (ADAPTADA DE [DOMÍNGUEZ, 2008]).	86
FIG. 3.1. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE PRUEBA TAYLOR 10-NODOS (ADAPTADO DE [TAYLOR, 1994]).	89
FIG. 5.6. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE DEL NODO CRÍTICO N9 Y MÁXIMO FACTOR DE CARGABILIDAD OBTENIDO POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN CUANDO SOLO ES AUMENTADA LA CARGA ESTÁTICA DEL NODO 10 DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1.	90
FIG. 5.7. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE DEL NODO CRÍTICO N9 Y MÁXIMO FACTOR DE CARGABILIDAD OBTENIDO POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN AL AUMENTAR SOLAMENTE LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1.	91
FIG. 5.8. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE DEL NODO CRÍTICO N9 Y MÁXIMO FACTOR DE CARGABILIDAD OBTENIDO POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN AL AUMENTAR SOLAMENTE LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1, CONSIDERANDO QUE SE ENCUENTRA DESCONECTAD UNA LÍNEA ENTRE LOS NODOS 5 Y 6.	93
FIG. 3.2. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE PRUEBA CIGRE 32-NODOS (ADAPTADO DE [CIGRE, 1995]).	94
FIG. 5.9. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE DEL NODO CRÍTICO N207 Y MÁXIMO FACTOR DE CARGABILIDAD OBTENIDO POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN AL AUMENTAR SOLAMENTE LA CARGA ESTÁTICA DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.2.	95
FIG. 5.10. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE DEL NODO CRÍTICO N207 Y MÁXIMO FACTOR DE CARGABILIDAD OBTENIDO POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN AL AUMENTAR SOLAMENTE LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.2.	97
FIG. 5.11. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE DEL NODO CRÍTICO N207 Y MÁXIMO FACTOR DE CARGABILIDAD OBTENIDO POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.	98
FIG. 5.12. COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EL VOLTAJE DEL NODO CRÍTICO N207 OBTENIDO POR EL PROGRAMA FLUJOS Y EL PROGRAMA PSS/E® PARA LOS MODELOS ESTÁTICOS 1 Y 3 DEL MOTOR DE INDUCCIÓN AL AUMENTAR SOLAMENTE LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.2.	99
FIG. 3.1. SISTEMA DE PRUEBA TAYLOR 10-NODOS (ADAPTADO DE [TAYLOR, 1994]).	113
FIG. A.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U. A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 1 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE LOS NODOS 7 Y 10 DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1.	115
FIG. A.2. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 2 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE LOS NODOS 7 Y 10 DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1.	115
FIG. A.3. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 3 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE LOS NODOS 7 Y 10 DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1.	116
FIG. A.4. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U. A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 4 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE LOS NODOS 7 Y 10 DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1.	117

FIG. A.5. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U. A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 5 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE LOS NODOS 7 Y 10 DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1.	117
FIG. A.6. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U. A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 6 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE LOS NODOS 7 Y 10 DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1.	118
FIG. A.7. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U. A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 7 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DE LOS NODOS 7 Y 10 DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.1.	119
FIG. 3.2. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE PRUEBA CIGRE 32-NODOS (ADAPTADO DE [CIGRE, 1995]).	123
FIG. B.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U. A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 1 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.2, EL RESTO DE LA CARGA DEL SISTEMA SE HA REPRESENTADO CON UNA CARACTERÍSTICA DE POTENCIA CONSTANTE.	124
FIG. B.2. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U. A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 2 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.2, EL RESTO DE LA CARGA DEL SISTEMA SE HA REPRESENTADO CON UNA CARACTERÍSTICA DE POTENCIA CONSTANTE.	125
FIG. B.3. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U. A 100 MVA EMPLEANDO EL MODELO 3 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.2, EL RESTO DE LA CARGA DEL SISTEMA SE HA REPRESENTADO CON UNA CARACTERÍSTICA DE POTENCIA CONSTANTE.	126
FIG. B.4. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN P.U. A 100 MVA EMPLEANDO LOS MODELOS 4-7 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA DE LA FIG. 3.2, EL RESTO DE LA CARGA DEL SISTEMA SE HA REPRESENTADO CON UNA CARACTERÍSTICA DE POTENCIA CONSTANTE.	127
FIG. C.1. SISTEMA DE EXCITACIÓN DE LOS GENERADORES DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS (ADAPTADO DE [KUNDUR, 1994, RUIZ, 1996]).....	130
FIG. D.1. VENTANA PRINCIPAL DEL PROGRAMA PSS/E.....	131
FIG. D.2. PROCEDIMIENTO INICIAL PARA ABRIR EL ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL SISTEMA.	132
FIG. D.3. BUSCANDO EL ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL SISTEMA.....	132
FIG. D.4. SELECCIONANDO EL ARCHIVO “MOD1PSSE”.....	132
FIG. D.5. SELECCIONANDO EL ARCHIVO “MOD1PSSE”.....	133
FIG. D.6. PRIMER PASO PARA CREAR EL ARCHIVO DE SALIDA PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA.	133
FIG. D.7. SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN PARA EL ARCHIVO DE SALIDA DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA.	133
FIG. D.8. CREANDO EL ARCHIVO DE SALIDA DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA.	134
FIG. D.9. CONFIRMANDO LA CREACIÓN DEL ARCHIVO DE SALIDA DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA.....	134

	Página
FIG. D.10. PROCEDIMIENTO INICIAL PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA.	135
FIG. D.11. SELECCIÓN DEL MÉTODO A UTILIZAR PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA.....	135
FIG. D.12. SOLUCIÓN DEL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA DEL SISTEMA	136
FIG. D.13. PRIMER PASO EN LA IMPRESIÓN DE LOS RESULTADOS.	136
FIG. D.14. SEGUNDO PASO EN LA IMPRESIÓN DE LOS RESULTADOS.	137
FIG. D.15. ABANDONANDO LA SESIÓN EN EL PSS/E®.	137
FIG. D.16. CONFIRMANDO EL ABANDONO DE LA SESIÓN EN EL PSS/E®.	137
FIG. D.17. ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS PARA EL PROGRAMA PSS/E® UTILIZANDO EL MODELO ESTÁTICO 1 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA.	138
FIG. D.18. ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS PARA EL PROGRAMA PSS/E® UTILIZANDO EL MODELO ESTÁTICO 3 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA.	139
FIG. D.19. ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS PARA EL PROGRAMA PSS/E® UTILIZANDO EL MODELO ESTÁTICO 5 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA.	140
FIG. D.20. ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS PARA EL PROGRAMA PSS/E® UTILIZANDO EL MODELO ESTÁTICO 6 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA.	141
FIG. D.21. ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS PARA EL PROGRAMA PSS/E® UTILIZANDO EL MODELO ESTÁTICO 7 PARA REPRESENTAR LA CARGA DE MOTORES DE INDUCCIÓN DEL SISTEMA.	142

LISTA DE TABLAS

	Página
TABLA 3.1. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M1 CONECTADO AL NODO 7 (EN P.U A 100 MVA).	39
TABLA 3.2. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M2 CONECTADO AL NODO 7 (EN P.U A 100 MVA).	39
TABLA 3.3. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M3 CONECTADO AL NODO 10 (EN P.U A 100 MVA).	39
TABLA 3.4. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M1 CONECTADO AL NODO N201 (EN P.U A 100 MVA).....	42
TABLA 3.5. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M2 CONECTADO AL NODO N202 (EN P.U A 100 MVA).....	42
TABLA 3.6. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M3 CONECTADO AL NODO N203 (EN P.U A 100 MVA).....	42
TABLA 3.7. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M4 CONECTADO AL NODO N204 (EN P.U A 100 MVA).....	43
TABLA 3.8. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M5 CONECTADO AL NODO N205 (EN P.U A 100 MVA).....	43
TABLA 3.9. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M6 CONECTADO AL NODO N206 (EN P.U A 100 MVA).....	43
TABLA 3.10. RESULTADOS OBTENIDOS POR CADA MODELO ESTÁTICO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LAS VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR M7 CONECTADO AL NODO N207 (EN P.U A 100 MVA).....	43
TABLA 3.11. RESULTADOS DEL MOTOR M1 OBTENIDOS CON EL PSS/E® PARA LOS MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR QUE NO MODIFICAN EL JACOBIANO DE FLUJOS DE POTENCIA (EN P.U A 100 MVA).....	44
TABLA 3.12 RESULTADOS DEL MOTOR M2 OBTENIDOS CON EL PSS/E® PARA LOS MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR QUE NO MODIFICAN EL JACOBIANO DE FLUJOS DE POTENCIA (EN P.U A 100 MVA).....	44
TABLA 3.13. RESULTADOS DEL MOTOR M3 OBTENIDOS CON EL PSS/E® PARA LOS MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR QUE NO MODIFICAN EL JACOBIANO DE FLUJOS DE POTENCIA (EN P.U A 100 MVA).....	45
TABLA 4.1. CONDICIONES INICIALES DEL MOTOR M1 CON EL PROGRAMA FLUJOS (EN P.U A 100 MVA).	54
TABLA 4.2. CONDICIONES INICIALES DEL MOTOR M2 CON EL PROGRAMA FLUJOS (EN P.U A 100 MVA).	54
TABLA 4.3. CONDICIONES INICIALES DEL MOTOR M3 CON EL PROGRAMA FLUJOS (EN P.U A 100 MVA).	54
TABLA 4.4. ADMITANCIAS DE AJUSTE DEL MOTOR M1 Y SU ERROR CON EL PROGRAMA FLUJOS.	55
TABLA 4.5. ADMITANCIAS DE AJUSTE DEL MOTOR M2 Y SU ERROR CON EL PROGRAMA FLUJOS.	55
TABLA 4.6. ADMITANCIAS DE AJUSTE DEL MOTOR M3 Y SU ERROR CON EL PROGRAMA FLUJOS.	56
TABLA 4.7. CONDICIONES INICIALES DEL MOTOR M1 CON EL PROGRAMA PSS/E® (EN P.U A 100 MVA).	56
TABLA 4.8. CONDICIONES INICIALES DEL MOTOR M2 CON EL PROGRAMA PSS/E® (EN P.U A 100 MVA).	57

	Página
TABLA 4.9. CONDICIONES INICIALES DEL MOTOR M3 CON EL PROGRAMA PSS/E® (EN P.U A 100 MVA).	57
TABLA 4.10. ADMITANCIAS DE AJUSTE DEL MOTOR M1 Y SU ERROR PARA EL PROGRAMA PSS/E®.	57
TABLA 4.11. ADMITANCIAS DE AJUSTE DEL MOTOR M2 Y SU ERROR PARA EL PROGRAMA PSS/E®.	57
TABLA 4.12. ADMITANCIAS DE AJUSTE DEL MOTOR M3 Y SU ERROR PARA EL PROGRAMA PSS/E®.	57
TABLA 4.13. TIEMPOS CRÍTICOS DE LIBERACIÓN CORRESPONDIENTES A CADA MÉTODO DE INICIALIZACIÓN.....	64
TABLA 4.14. PARÁMETROS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN EN P.U.* [RUIZ-VEGA ET AL., 2002].....	68
TABLA 4.15. VARIABLES PRINCIPALES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN EN EL PARO, OBTENIDAS POR SUS DIFERENTES MODELOS ESTÁTICOS (A 100 MVA BASE).	72
TABLA A.1. DATOS DE NODOS DE GENERACIÓN DEL SEP TAYLOR 10-NODOS EN P.U. A 100 MVA	114
TABLA A.2. DATOS DE LÍNEAS DEL SEP TAYLOR 10-NODOS EN P.U. A 100 MVA	114
TABLA A.3. DATOS DE TRANSFORMADORES DEL SEP TAYLOR 10-NODOS EN P.U. A 100 MVA.....	114
TABLA A.4. PARÁMETROS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN EN PU A 100 MVA BASE.....	114
TABLA B.1. DATOS DE LÍNEAS DEL SEP EN P.U. A 100 MVA BASE (ADAPTADO DE [CIGRE, 1995]).....	121
TABLA B.2. DATOS NODALES DEL SEP EN P.U. A 100 MVA BASE (ADAPTADO DE [CIGRE, 1995])	122
TABLA B.3. DATOS DE TRANSFORMADORES DEL SEP EN P.U. A 100 MVA BASE [CIGRE, 1995].....	122
TABLA B.4. MAGNITUD DE VOLTAJE EN P.U DE LOS NODOS DE GENERACIÓN Y SLACK.....	123
TABLA B.5. PARÁMETROS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN (ADAPTADO DE [TAYLOR, 1994]).....	123
TABLA B.6. RESULTADOS DE VOLTAJES NODALES PARA LAS FIGS. B.1-B.4	128
TABLA C.1. PARÁMETROS DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS.....	129
TABLA C.2. PARÁMETROS DEL CONTROL DE VOLTAJE DE LOS GENERADORES DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS (ADAPTADO DE [RUIZ, 1996]).....	130

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

WECC: “*Western Electricity Coordinating Council*” (Consejo Coordinador Eléctrico del Oeste de Estados Unidos).

IEEE: “*Institute of Electric and Electronics Engineers*” (Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica)

EPRI: “*Electric Power Research Institute*” (Instituto de Investigación de la Potencia Eléctrica).

FLUJOS: Programa para realizar el estudio de flujos de potencia desarrollado en lenguaje FORTRAN 77.

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia.

PSS/E®: “*Power System Simulator*” Programa comercial de simulación de sistemas eléctricos potencia desarrollado por SIEMENS.

CIGRE: “*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*” (Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas).

R_s, X_s : Resistencia y reactancia de dispersión del estator del motor de inducción.

R_r, X_r : Resistencia y reactancia de dispersión del rotor del motor de inducción.

P, Q : Consumo de potencia activa y reactiva del motor de inducción.

X_m : Reactancia de magnetización del motor de inducción.

V : Voltaje en terminales del motor de inducción.

s : Deslizamiento del rotor del motor de inducción.

K_1, K_2, K_3 y K_4 : Constantes del modelo estático 2.

A, B y C : Coeficientes para la ecuación del deslizamiento del modelo estático 2.

X_A, X_B y X_C : Reactancias equivalentes del modelo estático 3.

V_{i_0} : Voltaje del nodo interno del motor en el modelo estático 3.

a, b y c : Constantes para la ecuación del voltaje interno del modelo estático 3.

P_{rotor} : Potencia activa de consumo del rotor para el modelo estático 3.

- $P_{estator}$: Potencia activa de consumo del estator para el modelo estático 3.
- P_{motor} : Potencia activa de consumo total del motor de inducción para el modelo estático 3.
- Q_m : Potencia reactiva de consumo total del motor de inducción para los modelos estático 3, 5, 6 y 7.
- P_m : Potencia activa de consumo total del motor de inducción para los modelos estáticos 5, 6 y 7.
- P_r, Q_r : Potencias activa y reactiva de consumo correspondientes al rotor en el modelo estático 6.
- Q_{xm} : Potencia reactiva de consumo de la reactancia de magnetización para el modelo estático 6.
- Y_{bus} : Matriz de admitancias de nodo del sistema eléctrico de potencia.
- P_0, Q_0 : Potencias activa y reactiva iniciales para el modelo estático 4.
- Z_{eq} : Impedancia equivalente que representa al motor de inducción al utilizar el modelo estático 5.
- $\alpha_1, \alpha_2, \text{ y } \alpha_3$: Constantes para el cálculo de la impedancia equivalente Z_{eq} (Modelo estático 5).
- X_0 : Reactancia de circuito abierto del motor de inducción en el modelo estático 7
- X' : Reactancia transitoria del motor de inducción en el modelo estático 7
- T'_0 : Constante de tiempo de circuito abierto del motor de inducción en el modelo estático 7.
- I_t : Corriente del estator del motor de inducción en el modelo estático 7.
- ω : Velocidad del rotor del motor de inducción en el modelo estático 7.
- ω_0 : Velocidad síncrona del motor de inducción en el modelo estático 7.
- T_m : Par mecánico del motor de inducción en el modelo estático 7.
- T_e : Par eléctrico del motor de inducción en el modelo estático 7.
- E' : Voltaje transitorio del motor inducción en el modelo estático 7, proporcional a los enlaces de flujos del rotor.
- I : Vector de inyecciones de corriente hacia la red debidas a generadores y cargas.

V_n : Vector de voltajes nodales

$\partial Q(V)/\partial V$: Derivada parcial de la potencia reactiva del motor de inducción respecto al voltaje terminal para los modelos estáticos 2 y 4.

$\partial P(V)/\partial V$: Derivada parcial de la potencia activa del motor de inducción respecto al voltaje terminal para el modelo estático 4.

P_{mc} , Q_{mc} : Potencias activa y reactiva del motor de inducción calculadas por los métodos de inicialización 1 y 2 después del estudio de flujos de potencia (el método de inicialización 2 solo calcula Q_{mc}).

P_{mi} , Q_{mi} : Valores de consumo de potencias del motor de inducción utilizados como datos para representar al motor en el estudio de flujos de potencia para los métodos de inicialización 1 y 2.

Y_{ajust} : Admitancia de ajuste para los métodos de inicialización 1 y 2.

S_{mi} : Potencia aparente del motor de inducción utilizada como dato para representar al motor en el estudio de flujos de potencia en el método de inicialización 1.

S_{mc} : Potencia aparente calculada del motor después del estudio de flujos de potencia, correspondiente al nuevo valor del voltaje terminal para el método de inicialización 1.

S_{my} : Potencia aparente correspondiente a la admitancia de ajuste en el método de inicialización 1.

V_{tm} : Valor del voltaje terminal del motor de inducción obtenido del estudio de flujos de potencia para los métodos de inicialización 1 y 2.

Q_{my} : Potencia reactiva correspondiente a la admitancia de ajuste para el método de inicialización 2.

s_{mc} : Nuevo valor del deslizamiento después del estudio de flujos de potencia calculado con el método de inicialización 2.

s_{cr} : Deslizamiento crítico del motor de inducción.

λ : Factor de cargabilidad.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Los motores de inducción son una parte muy importante de la carga en todos los sistemas de potencia. En sistemas industriales, las máquinas que realizan diferentes procesos están basadas principalmente en motores de inducción. En cargas residenciales y comerciales, el uso de sistemas de aire acondicionado ha incrementado adicionalmente el porcentaje de cargas de motores de inducción que deben ser consideradas en los estudios de sistemas de potencia. Esta es la razón de que el modelado de motores de inducción sea un tema muy importante en el análisis de sistemas de potencia [IEEE, 1993, Kosterev and Melkin, 2006].

Sin embargo, como una parte del muy complejo problema abierto de investigación del modelado de la carga, el modelado de los motores de inducción puede ser dividido en dos importantes partes complementarias:

- Desarrollo del modelo.
- Determinación de parámetros.

El desarrollo del modelo se refiere al problema de obtener un modelo de carga que represente correctamente las características más importantes y el comportamiento (estático o dinámico) a ser considerado en el estudio de sistema de potencia de interés. Esta parte incluye la determinación de la manera más conveniente de incluir el modelo de carga en el modelo del sistema completo y en su proceso de solución.

La determinación de parámetros se refiere al problema de encontrar, considerando la composición de la carga, pruebas experimentales o, más recientemente, mediciones fasoriales sincronizadas, el conjunto de parámetros del modelo de carga de interés, el cual representa el comportamiento real de la carga de la manera más exacta. Este problema es especialmente difícil y no ha sido hasta la fecha resuelto, debido a que el modelo de la carga a nivel del sistema de transmisión

utilizado en los estudios de sistemas de potencia representa siempre el efecto agregado de muchos tipos diferentes de carga, incluyendo las redes de subtransmisión y distribución, y tanto la composición como la magnitud de la carga del sistema varían constantemente [Kosterev and Melkin, 2006, Lesieutre et al., 2010, Pourbeik, 2010].

Este trabajo se dedica al problema del desarrollo del modelo, y más específicamente, a la manera más correcta de incluir el modelo estático del motor de inducción en el modelo del sistema y sus procesos de solución en estudios estáticos de sistemas de potencia. Como ha sido reconocido desde la primera parte del siglo pasado, el modelo estático del motor de inducción es su muy conocido circuito equivalente en estado estacionario. Sin embargo, no fue propuesto, sino hasta los últimos años de la década de 1990, incluir este modelo en estudios de sistemas de potencia que emplean modelos estáticos del sistema, en particular en estudios de flujos de potencia y de estabilidad de voltaje de largo plazo [Ruiz, 1996, Liu et al., 1997, Da Costa and Da Silva, 1998, Van Cutsem and Vournas, 1998, Ruiz-Vega et al., 1999, Mota et al., 2002, Ruiz-Vega et al., 2002, Martins et al., 2003, Mahyavanshi and Radman, 2006, Li et al, 2006, Powell and Radman, 2007, Nath, 2008].

Han sido propuestos varios modelos estáticos del motor de inducción considerando principalmente, diferentes formas de incluir y resolver el circuito equivalente de estado estacionario en estudios estáticos de sistemas de potencia, produciendo usualmente resultados de simulación diferentes (ver § 1.4 de Antecedentes). Algunos de los aspectos importantes que se deben considerar en el desarrollo del modelo estático del motor son:

- Determinar el modelo básico que representa correctamente al comportamiento estático del motor.
- Que represente correctamente el comportamiento estático del motor en la región de funcionamiento de interés.
- La flexibilidad de implementación en diferentes programas de simulación.

El primer aspecto se menciona porque aunque la mayoría de los modelos estáticos del motor propuestos están basados en su circuito equivalente de estado estacionario, ha habido propuestas para desarrollar el modelo estático del motor a partir de su modelo dinámico de tercer orden [Da Costa and Da Silva, 1998]. Es, por lo tanto interesante determinar cual de las dos (o ambas) es la opción correcta.

El motor tiene diferentes regiones de operación. El segundo aspecto es importante porque se han propuesto modelos con consideraciones y respuestas muy diferentes (unos manteniendo constante la potencia y otros con el deslizamiento constante) que han sido propuestos para modelar el comportamiento estático del motor en la misma región de funcionamiento estable. Sin embargo, de acuerdo al comportamiento real

del motor reportado en [Vénikov, 1988, Taylor 1994] solamente una de estas consideraciones es adecuada. Identificar la manera correcta de modelar al motor en las diferentes regiones de funcionamiento es importante por esta razón.

La flexibilidad de implementación es un aspecto muy importante debido a que algunos de los modelos propuestos requieren que se modifique el código de los programas de simulación estática de sistemas de potencia para poder ser incluidos en el modelo total del sistema. Esta tarea es imposible de realizar por los usuarios de la mayoría de los programas comerciales de simulación por lo que esta característica, aunque se considere que el modelo estático funciona adecuadamente, limita de manera importante su aplicación en estudios de sistemas de potencia de gran escala.

La importancia del modelado de los motores de inducción y la necesidad de clarificar cada uno de los aspectos importantes del modelado estático del motor mencionadas anteriormente, son las razones principales por las que en esta tesis se describen todos los modelos de motores de inducción que han sido propuestos, y se presenta una comparación objetiva de sus resultados de simulación con los resultados del modelo convencional de carga que emplea una característica de potencia constante disponible en todos los modelos de flujos de potencia, en términos de su exactitud, número de simulaciones requeridas para encontrar la solución, y la factibilidad de implementación y uso en programas de simulación comercial.

Además finalmente se proponen dos modelos estáticos nuevos para representar al motor de inducción de manera adecuada en todas sus regiones de operación y con importantes ventajas de flexibilidad de modelado con respecto a la mayoría de los modelos presentados anteriormente.

1.2 OBJETIVO

Estudiar y desarrollar modelos de motores de inducción que permitan representar de manera detallada el efecto de estas cargas al nivel de la red de transmisión, en todas sus regiones de operación, en estudios estáticos de sistemas de potencia.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La importancia del modelado correcto de las cargas de motores de inducción ha sido tradicionalmente reconocida y ha sido reportada recientemente, como resultado de estudios sistemáticos y periódicos llevados a cabo en un período de más de 10 años en el Consejo Coordinador Eléctrico del Oeste de Estados Unidos (WECC en Inglés por “Western Electricity Coordinating Council”). Después del apagón ocurrido el 10 de agosto de 1996, se detectó que había una gran diferencia entre el comportamiento real del sistema, y los resultados de las simulaciones hechas en la

planeación y operación del mismo. En 1999, se reportó en [Kosterev et al., 1999] que era necesario mejorar de manera importante el modelado de las cargas dinámicas, de los controles de generadores y la línea principal de corriente directa en alta tensión del sistema. En 2002 se reportaron en [Pereira et al., 2002] resultados parciales en los que se había iniciado el desarrollo de un modelo de carga que contenía una parte importante de motores de inducción, el cual fue mejorado en [Chin, 2006, Kosterev and Melkin, 2006] y finalmente terminado en 2010 [Lesieutre et al., 2010].

El nuevo modelo de carga del WECC, además de considerar un modelo de cargas estáticas y otro para cargas electrónicas, contiene cuatro tipos diferentes de motores de inducción, tres de ellos trifásicos, con diferentes tipos de cargas mecánicas, y uno monofásico para representar cargas de aire acondicionado [Lesieutre et al., 2010]. La idea de incluir cuatro modelos diferentes de motores fue para darle flexibilidad al modelo de carga, siguiendo el enfoque propuesto para modelos de carga estáticas en [IEEE, 1995]. De acuerdo a la composición de cada nodo de carga importante, dependiendo de si se trata de una carga industrial, residencial o comercial, se utilizarán solamente los motores y los componentes pertinentes.

Como se ha reconocido tradicionalmente, y al menos estudiado de manera seria y validado en el caso del sistema del WECC, se deben modelar de manera detallada las cargas de motores de inducción para poder reproducir el comportamiento real del sistema, por lo que es necesario que todos los programas empleados en la planeación y la operación de los sistemas de potencia modelen de manera similar estos importantes componentes de la carga. De esta manera, se puede justificar objetivamente la necesidad de incluir modelos de motores de inducción en programas que emplean modelos estáticos del sistema de potencia, como son los simuladores de flujos de potencia y de estabilidad de voltaje de largo plazo.

El estudio de flujos de potencia provee el caso base del sistema para realizar estudios de estabilidad de voltaje de corto plazo y con modelos estáticos adecuados del sistema es utilizado para realizar estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo. Sin embargo, en la práctica común al realizar estudios de flujos de potencia la carga se modela con una característica de potencia constante, y utilizar este tipo de representación para el motor de inducción puede conducir a resultados inadecuados. Diversos estudios muestran que el límite máximo de cargabilidad y el límite de estabilidad de voltaje son estimados mejor cuando se incorpora el modelo de carga del motor de inducción [Liu et al., 1997]. Sin embargo, los trabajos destinados a la solución de este problema, aún carecen de modelos estáticos que representen adecuadamente el paro del motor de inducción y todas sus regiones de funcionamiento y que sean adecuados para su uso en programas comerciales. Por lo tanto, los modelos de este tipo motores en estudios de flujos de potencia y de estabilidad de voltaje de largo plazo deben representar adecuadamente su dinámica asociada. Mientras se utiliza el modelo de carga más apropiado, se obtienen resultados más precisos del análisis de la estabilidad de voltaje.

1.4 ANTECEDENTES

Dentro de los modelos estáticos existentes del motor de inducción se tienen dos grupos principales: los que mantiene el deslizamiento del rotor constante y los que mantienen la potencia activa constante; estos grupos se pueden dividir a su vez en dos subgrupos; los que modifican el jacobiano del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson y los que modifican solo el archivo de entrada de datos del estudio. En la Fig. 1.1 se presenta esta clasificación general de los modelos estáticos del motor.

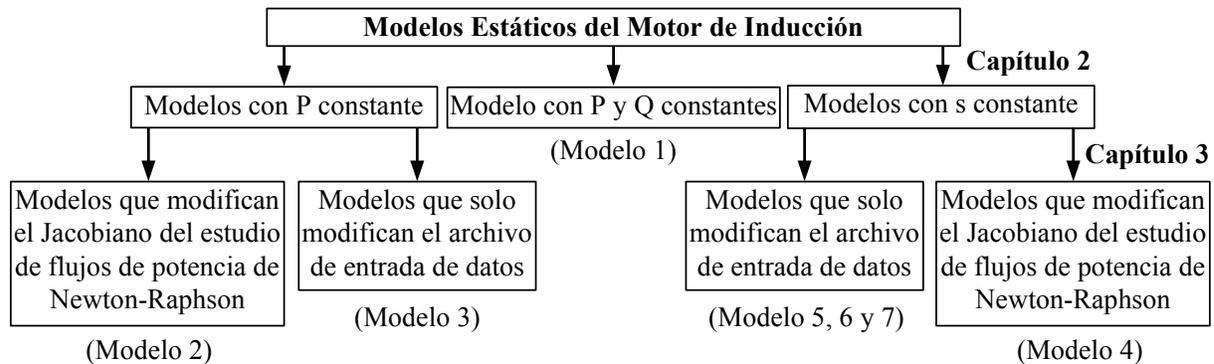


Fig. 1.1. Clasificación general de los modelos estáticos del motor de inducción.

A continuación se presentan y describen los trabajos más relevantes en cuanto al intento de modelar adecuadamente el motor de inducción en estudios de flujos de potencia, en la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción para estudios de estabilidad de voltaje de corto plazo (que analizan el comportamiento del sistema en un período de 0 a 20 s) y en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo (que analizan varios minutos) que utilizan modelos estáticos del sistema.

1.4.1 Trabajos más importantes en el desarrollo de modelos estáticos del motor de inducción para estudios de flujos de potencia

En [Ruiz, 1996] se propuso modelar directamente el circuito de estado estacionario del motor de inducción en el estudio de flujos de potencia de acuerdo a su comportamiento real, como una solución al problema de inicializar correctamente modelos dinámicos del motor de inducción. El modelo estático que se propuso en este trabajo considera constante la potencia activa total del motor de acuerdo al comportamiento descrito en [Vénikov, 1988, Taylor, 1994]. La estructura del modelo desarrollado en [Ruiz, 1996] consta principalmente de dos ecuaciones, una que describe el comportamiento del deslizamiento del rotor y otra que representa el comportamiento de la potencia reactiva. Debido a que la ecuación que representa el comportamiento de la potencia reactiva del motor depende del voltaje terminal, este modelo modifica la matriz Jacobiana del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson al incluir la derivada parcial de la potencia reactiva respecto al voltaje terminal en el elemento diagonal correspondiente en dicha matriz. Este modelo fue publicado posteriormente en [Ruiz-Vega et al., 1999, Ruiz-Vega et al., 2002].

En [Liu et al., 1997] se propuso modelar el motor de inducción en el estudio de flujos de potencia para realizar estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo. El modelo desarrollado en este trabajo parte del circuito de estado estacionario del motor y describe que las potencias activa y reactiva del motor pueden ser calculadas en términos del voltaje terminal, el deslizamiento y los parámetros del motor. Para representar al motor en estudios estáticos se propone mantener constante el deslizamiento. El modelo propuesto consta de dos ecuaciones, una que representa el comportamiento de la potencia activa del motor y otra el de la potencia reactiva. Debido a que ambas ecuaciones dependen del voltaje terminal, las derivadas parciales de estas dos ecuaciones respecto al voltaje terminal son incluidas en el elemento diagonal correspondiente en la matriz jacobiana del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson.

En [Da Costa and Da Silva, 1998] se propuso un circuito de estado estacionario derivado del modelo dinámico de tercer orden del motor de inducción en el marco d-q que gira a la velocidad síncrona. Este circuito de estado estacionario es también utilizado en [Mota et al., 2002, Martins et al., 2003, Li et al., 2006]. De este circuito se pueden obtener modelos con potencia constante y deslizamiento constante muy similares en cuanto a estructura e iguales numéricamente a los derivados del circuito de estado estacionario convencional.

En [Powell and Radman, 2007] se utilizó nuevamente el modelo presentado en [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002], que considera constante la potencia activa total del motor, al cual no se le hizo ninguna modificación relevante, simplemente se presentó el mismo modelo con ecuaciones reestructuradas considerando los mismos parámetros y variables.

En [Carmona y Ruiz, 2009] se hace una primera revisión de los modelos estáticos del motor de inducción existentes hasta el año 2009, además se presenta un modelo de dos nodos que parte del circuito de estado estacionario del motor y que mantiene el deslizamiento constante.

En [Carmona y Ruiz, 2010] se publican dos modelos propuestos en esta tesis que parten del circuito de estado estacionario del motor de inducción. El primer modelo mantiene constante la potencia activa total del motor, pero no necesita modificar el Jacobiano del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson. Tiene una estructura de dos nodos y básicamente se desarrolló con la intención de sustituir al modelo presentado en [Ruiz, 1996] para simular el comportamiento del motor en su región estable. El segundo modelo mantiene constante el deslizamiento del rotor, pero tiene la ventaja de que no necesita modificar el Jacobiano del estudio de flujos de potencia de Newton Raphson, ya que su estructura es la de una impedancia equivalente, por lo que su implementación es más sencilla y además es numéricamente igual al presentado en [Liu et al., 1997], para representar al motor de inducción en su región de paro.

En [Carmona-Sánchez and Ruiz-Vega, 2010] se hace una segunda revisión de modelos estáticos del motor de inducción y se demuestra que el circuito de estado estacionario propuesto en [Da Costa and Da Silva, 1998] ofrece los mismos resultados que el circuito de estado estacionario del motor de inducción.

1.4.3 Trabajos más importantes en la aplicación de modelos estáticos del motor de inducción a la inicialización de modelos dinámicos del motor

En [Ruiz-Vega et al., 2002] se describen tres métodos de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción. En los dos primeros métodos de inicialización (llamados 1 y 2) se propone modelar la carga de motores de inducción con una característica de potencia constante en el estudio de flujos de potencia como se describe en [EPRI, 1987, EPRI, 1994, IEEE, 1995], y una vez obtenido el nuevo voltaje terminal calcular las condiciones iniciales del motor de inducción utilizando su circuito de estado estacionario y el deslizamiento inicial (método 1) o la potencia activa inicial (método 2) y modelar las diferencias de potencias (las usadas en el estudio de flujos de potencia y las calculadas con el circuito de estado estacionario para el nuevo valor de voltaje) como una admitancia de ajuste. En el tercer método (llamado 3) inicialmente descrito en [Ruiz, 1996] se propone incluir el modelo de estado estacionario en el estudio de flujos de potencia, por lo que al inicializar modelos dinámicos del motor no se necesita admitancia de ajuste alguna, ya que los valores de las variables principales del motor ya se encuentran ajustados para el nuevo valor del voltaje terminal.

En [Mahyavanshi and Radman, 2006] se utiliza el método 2 descrito en [Ruiz-Vega et al., 2002] para la inicialización de un modelo dinámico de tercer orden del motor de inducción, la elección de este método es debido a la no disponibilidad de modelos estáticos del motor de inducción adecuados para su implementación en programas comerciales.

Los artículos [Powell and Radman, 2007, Nath, 2008] utilizan el modelo estático del motor descrito en [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002] como una solución a la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción, en [Powell and Radman, 2007] se presenta un método iterativo exclusivo para el PSS/E® que ofrece los mismos resultados para las condiciones iniciales de los modelos dinámicos del motor que los obtenidos con el modelo estático presentado en [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002].

1.4.2 Trabajos más importantes en la aplicación de modelos estáticos del motor de inducción a estudios de flujos de potencia y de estabilidad de voltaje de largo plazo

En [Da Costa and Da Silva, 1998, Mota et al., 2002, Martins et al., 2003, Li et al., 2006] se utiliza el circuito de estado estacionario derivado del modelo dinámico de

tercer orden, considerando constante la potencia activa del rotor, y se evalúa el efecto de modelar el motor de inducción en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo variando el porcentaje de la carga que es modelada como motor, encontrando que los límites de transferencia de potencia son estimados mejor cuando se considera el modelo del motor de inducción en el estudio.

En el artículo [Carmona y Ruiz, 2010] se simula el proceso de detención del motor de inducción utilizando modelos estáticos, se describe el comportamiento del motor a pequeñas variaciones del voltaje terminal y se definen las regiones de funcionamiento del motor de inducción. Se demuestra que los modelos que mantienen constante la potencia activa del motor son adecuados para representar el comportamiento del motor en su región estable, mientras que, los modelos que mantiene constante el deslizamiento son adecuados para simular la región de paro del motor (con $s = 100\%$). De los resultados presentados en este artículo se recomienda el uso (según sea el caso) de los modelos descritos y propuestos para la solución de los problemas siguientes: representación adecuada del motor de inducción en estudios de flujos de potencia, inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción y representación adecuada del motor de inducción en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo.

1.5 LIMITACIONES Y ALCANCES

1.5.1 Limitaciones

- En estudios de análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia generalmente el subsistema de cargas se modela por medio de cargas equivalentes, que en realidad representan un equivalente compuesto del efecto de las redes de subtransmisión y distribución y el efecto agregado de un gran número de cargas individuales de diferentes tipos (Domesticas, Industriales, Comerciales), vistas desde la red troncal de transmisión, en los niveles de tensión de 400 kV a 115 kV. Por lo que los modelos estáticos desarrollados en esta tesis son exclusivamente para representar equivalentes de cargas agregadas de motores de inducción trifásicos de jaula de ardilla.
- Para el caso del modelo estático que considera la potencia activa constante y que solo modifica el archivo de entrada de datos (modelo 3), su uso en el estudio de flujos de potencia, en sistemas con un gran número de motores de inducción y de diferentes capacidades resulta un tanto laborioso debido al gran número de nodos nuevos que se tienen que declarar a la hora de ingresar los datos del sistema, ya que por cada motor diferente se tiene que considerar un nuevo nodo interno además del nodo terminal del motor, esto debido a la estructura del modelo. Además, en el estudio de estabilidad de voltaje por medio de curvas *PV* requiere modificar los parámetros de la línea equivalente y del nuevo nodo en cada punto de operación considerado.

1.5.2 Alcances

- Los modelos estáticos del motor de inducción que solo modifican el archivo de entrada de datos del sistema (modelos 3, 5, 6 y 7) pueden ser utilizados en cualquier programa comercial de simulación de sistemas eléctricos de potencia.
- Los modelos estáticos desarrollados pueden ser utilizados para simular de manera adecuada el comportamiento del motor en todas sus regiones de funcionamiento. Esto permite que en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo se pueda considerar el comportamiento del motor en su voltaje crítico y después de éste (en el paro y después del paro).
- El problema de incluir la carga de motores de inducción en simulaciones computacionales del sistema de potencia puede ser dividido en dos partes complementarias: la determinación adecuada de los parámetros de este tipo de cargas y la derivación del modelo correcto. En este trabajo de tesis se trata exclusivamente con la determinación adecuada del modelo del motor de inducción para estudios estáticos de sistemas eléctricos de potencia y el método de implementación del modelo en el modelo completo del sistema de potencia. La determinación de los parámetros del modelo agregado de la carga permanece como un problema abierto de investigación que está fuera del alcance del presente trabajo.

1.6 APORTACIONES

- Se desarrollaron principalmente dos modelos estáticos nuevos (modelos 3 y 5) que son adecuados para su uso en cualquier tipo de programas y en especial en programas comerciales en los cuales no se puede modificar la matriz Jacobiana del sistema. Con estos modelos se puede simular de manera sencilla el motor en todas sus regiones de operación.
- Se describió de manera detallada la forma de incluir todos los modelos estáticos del motor de inducción en estudios de flujos de potencia, en la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción para estudios de estabilidad de voltaje de corto plazo y en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo.
- Todos los modelos descritos se incluyeron en el programa "FLUJOS", del Grupo de Investigación de Fenómenos Dinámicos de la SEPI-ESIMEZ, IPN.
- Se describieron y simularon detalladamente todas las regiones de funcionamiento del motor de inducción. Se demostró que ambos tipos de

modelos principales son necesarios para representar al motor en todas sus regiones de operación. En particular, los modelos con potencia activa constante son adecuados para simular la operación del motor en la región estable, mientras que los modelos con deslizamiento constante son los indicados para la región de paro del motor.

- Haciendo referencia al circuito de estado estacionario del motor de inducción derivado del modelo dinámico de tercer orden, se demostró que tiene los mismos resultados numéricos que los modelos derivados del circuito equivalente en estado estacionario convencional.
- Todos los resultados de las simulaciones estáticas con los modelos que no modifican a la matriz Jacobiana del sistema se validaron con simulaciones en el programa PSS/E® de SIEMENS. Se validaron principalmente dos aspectos: la exactitud del modelo y su factibilidad de implementación en un programa comercial. Ambos aspectos fueron validados satisfactoriamente debido a que los resultados de ambos tipos de programas fueron idénticos en todos los casos.

1.7 PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

Artículos publicados

1. J. Carmona Sánchez y D. Ruiz Vega. "Revisión de Modelos Estáticos del Motor de Inducción". *Memorias del 11º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, Instituto Politécnico Nacional, México, D. F. Noviembre 9-13, 2009.
2. J. Carmona-Sánchez y D. Ruiz-Vega. "Simulación del proceso de detención de los motores de inducción utilizando modelos estáticos". *Memorias de la Reunión de Verano de Potencia del IEEE Sección México, RVP 2010*. 11 - 17 Julio 2010, Acapulco Guerrero, Mexico.

Artículos aceptados para su publicación

1. J. Carmona-Sánchez and D. Ruiz-Vega. "Review of Static Induction Motor Models". *Proceedings of the North American Power Symposium, NAPS 2010*. 25-29 September 2010, Arlington, Texas, USA.

1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En esta sección se presenta de manera general el contenido de cada uno de los capítulos que conforman esta tesis:

- **Capítulo 1:** Se da una introducción sobre la importancia que tienen las cargas de motores de inducción en el sistema eléctrico de potencia, se presenta el objetivo y se justifica el desarrollo del presente trabajo. Se exponen los antecedentes y trabajos más importantes referentes al desarrollo de modelos estáticos del motor de inducción y además, se describen las limitaciones y alcances, las aportaciones y artículos derivados de esta tesis.
- **Capítulo 2:** En este capítulo se desarrollan, describen y clasifican todos los modelos estáticos del motor de inducción, tanto los derivados de su circuito de estado estacionario como el obtenido a partir del modelo dinámico de tercer orden del motor de inducción. Se presentan los nuevos modelos propuestos (el 3 y el 5) en este trabajo.
- **Capítulo 3:** En este capítulo se describe detalladamente la manera en la que cada uno de los modelos presentados en el capítulo 2 se incluyen en el estudio de flujos de potencia. Además, se aplica el estudio de flujos de potencia a dos sistemas de prueba que modelan una parte importante de su carga como motores de inducción y se comparan sus resultados.
- **Capítulo 4:** Se explica el problema de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción requerido en estudios de estabilidad de voltaje de corto plazo y se describen los métodos de inicialización existentes. La metodología es aplicada a un sistema de prueba y se compara el estado inicial de los motores de inducción utilizando sus tres modelos estáticos principales (modelos 1, 2, 3 y 5). Se describe el comportamiento real del motor ante variaciones lentas del voltaje terminal y sus regiones de funcionamiento, además se simula el proceso de detención de los motores utilizando modelos estáticos. Se eligen los modelos más adecuados y que representan el comportamiento real del motor, para su uso en el estudio de estabilidad de voltaje.
- **Capítulo 5:** En este capítulo se explica el concepto de estabilidad de voltaje, el método de las curvas *PV* y como se modela el sistema para estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo. Se demuestra además, la importancia de modelar adecuadamente la carga de motores de inducción en este tipo de estudios. Por último se aplican los modelos estáticos 1, 2 y 3 en un estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo a dos sistemas de prueba y se comparan sus resultados.
- **Capítulo 6:** En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo y sugerencias para trabajos futuros.

CAPÍTULO 2:

MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

En estudios de análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia generalmente el subsistema de cargas se representa por medio de cargas equivalentes, vistas desde la red troncal de transmisión (Nivel 400 kV - 115 kV). En estos estudios el efecto de las cargas se representan como inyecciones de potencia enviadas a los consumidores que en realidad representan un equivalente compuesto del efecto de las redes de subtransmisión y distribución y el efecto agregado de un gran número de cargas individuales de diferentes tipos (Domesticas, Industriales, Comerciales). Los modelos de carga propuestos hasta ahora (tanto para componentes individuales como para cargas equivalentes) se pueden clasificar en dos categorías principales: Modelos Estáticos de Carga y Modelos Dinámicos de Carga. Un modelo estático expresa las potencias activa y reactiva de consumo de la carga en cualquier instante de tiempo como funciones algebraicas de la magnitud del voltaje del nodo y de la frecuencia en ese mismo instante [Ruiz, 1996]; estos modelos son adecuados al representar componentes estáticos de la carga y como una aproximación de componentes dinámicos (como motores de inducción y compensadores estáticos de vars) en estudios estáticos como el de flujos de potencia.

Sin embargo los modelos estáticos de carga presentados hasta ahora no pueden representar el comportamiento real del motor de inducción ya que estos modelos comúnmente se basan en representar las potencias activa y reactiva consumidas por las cargas por medio de una ecuación algebraica exponencial (en función del voltaje en terminales o la frecuencia) cuyos exponentes son obtenidos al ajustar el modelo a datos experimentales determinados por medio de pruebas a componentes individuales ó en áreas de distribución. Otra forma de modelo estático de carga es el que parte de las características básicas de la carga llamado modelo ZIP, en el cual se representan los porcentajes de la carga con característica de impedancia constante, corriente constante y potencia constante [Ruiz, 1996]. Por lo anterior es de primordial importancia desarrollar modelos estáticos del motor de inducción que si tomen en cuenta su comportamiento real en el sistema eléctrico de potencia en estado estacionario.

Otro inconveniente es que en el cálculo convencional de flujos de potencia, la carga se considera como carga de potencia constante sin importar la variación de voltaje [Liu et al., 1997]. Esta representación adicionalmente produce problemas en la inicialización de modelos de las cargas dinámicas, como es el caso del motor de inducción [Ruiz, 1996]. Después del estudio de flujos de potencia, el voltaje en las terminales de los motores de inducción generalmente es diferente al voltaje inicial considerado para el estudio dinámico en el tiempo, por lo que los valores reales de potencia activa y reactiva que consumen y el deslizamiento para este voltaje no coinciden con los datos iniciales del estudio de flujos de potencia. Este fenómeno se ha resuelto de diferentes maneras:

- Lo usual en la mayoría de los programas comerciales de simulación es calcular las variables del motor empleando su circuito equivalente en estado estacionario mostrado en la Fig. 2.1 y el voltaje real y modelar la diferencia entre las potencias calculadas y las potencias que se emplearon en el estudio de flujos de carga como una admitancia de ajuste [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002].
- Se ha propuesto también hacer iteraciones entre las soluciones del estudio de flujos de potencia y el modelo del motor, de esta manera, después de realizar el estudio de potencia, se verifican con el modelo del motor las variables de potencia que debe consumir, las cuales son modificadas en los datos de un nuevo estudio de flujos de potencia a realizar. Esta iteración se realiza hasta que el estudio de flujos de potencia y los resultados del circuito en estado estacionario del motor convergen a los mismos valores de las variables [Dizdarevic, 2001, Powell and Radman, 2007].
- Otra solución que ha sido propuesta a este problema consiste en representar el modelo de estado estacionario del motor de inducción en el estudio inicial de flujos de potencia, para encontrar la correcta potencia reactiva inicial del nodo terminal, al tener en cuenta el comportamiento real de los motores de inducción sujetos a pequeñas variaciones del voltaje terminal alrededor de su valor nominal de voltaje [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002].

Además, los modelos utilizados en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo con modelos estáticos del sistema de potencia como los métodos de las curvas PV ó VQ emplean modelos tan similares a los del estudio de flujos de potencia que muchas veces son incorrectamente conducidos utilizando el modelo convencional más básico de este estudio. Se ha demostrado en muchos estudios, como en [López-Luis et al., 2007], que utilizar el modelo convencional de flujos de potencia en el estudio de estabilidad de voltaje provee resultados que no son nada exactos ni confiables. Esto se debe a que en el estudio de flujos de potencia, los modelos de los límites de los componentes del sistema son inadecuados y es común representar las cargas del sistema generalmente con característica de potencia constante.

En este capítulo se presentan siete modelos diferentes de estado estacionario del motor de inducción que han sido propuestos para representar de manera más detallada al motor en estudios estáticos, como en el estudio de flujos de potencia. Estos modelos se han desarrollado como una solución a los dos problemas descritos anteriormente:

- La inicialización de los modelos dinámicos de motores de inducción para estudios de simulación en el tiempo.
- La representación más exacta de los motores de inducción en estudios de estabilidad de voltaje utilizando modelos estáticos del sistema.

Un aspecto importante a considerar en la elección del modelo estático del motor de inducción es la manera en la que se incluye en el modelo completo del sistema. Mientras que algunos modelos que han sido propuestos representan correctamente el comportamiento del motor en diferentes condiciones de operación, la principal desventaja que presentan es que requieren modificar la matriz Jacobiana del sistema, lo que reduce importantemente su campo de aplicación al no poder ser aplicados en ningún programa comercial de simulación, debido a que éstos no permiten modificar esta parte del modelo del sistema. Por esta razón, en este trabajo se proponen nuevos modelos (los modelos 3 y 5) los cuales, al mismo tiempo que mantienen la misma exactitud en la representación del comportamiento real del motor de inducción, son mucho más flexibles y pueden ser utilizados en cualquier programa.

Para una mejor comprensión de los distintos modelos estáticos del motor de inducción en este capítulo, éstos han sido organizados en tres grupos de acuerdo a sus características principales:

- **Grupo 1:** Donde la carga de motores de inducción solo es representada con una carga estática con característica de potencia constante; en este grupo solo existe un modelo. Se podría decir que esta es la representación de la carga de motores de inducción en estudios de flujos de potencia convencionales, y se le ha dado el nombre de "Modelo 1".
- **Grupo 2:** Modelos basados en el circuito equivalente de estado estacionario del motor, en los cuales la potencia activa (P) del motor se mantiene constante (No. de modelos: 2).
- **Grupo 3:** Modelos basados en el circuito equivalente de estado estacionario del motor, en los cuales el deslizamiento s se mantiene constante (No. de modelos: 4).

Debido a que la mayoría de los modelos estáticos del motor de inducción (5 modelos de 7) parten del problema de solucionar su circuito equivalente de estado estacionario, se hará una breve descripción de este circuito.

2.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR EN ESTADO ESTACIONARIO

En la Fig. 2.1 se muestra el circuito equivalente de estado estacionario del motor de inducción. Este circuito equivalente se puede obtener directamente a partir de las ecuaciones de los modelos dinámicos completo y de orden reducido en coordenadas dq en el marco de referencia síncrono, haciendo todas las derivadas del modelo iguales a cero.

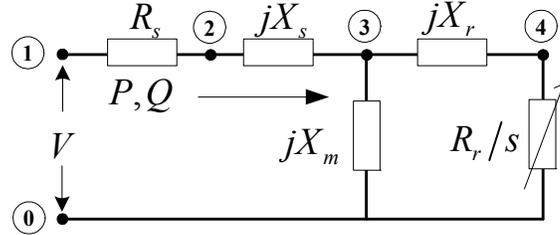


Fig. 2.1. Circuito equivalente de estado estacionario del motor de inducción
(Adaptado de [Kundur, 1994, Ruiz, 1996, Liu et al., 1997]).

Donde:

R_s, X_s : Resistencia y reactancia de dispersión del estator.

R_r, X_r : Resistencia y reactancia de dispersión del rotor.

P, Q : Consumo de potencia activa y reactiva.

X_m : Reactancia de magnetización.

V : Voltaje en terminales del motor.

s : Deslizamiento.

El problema principal de solucionar este circuito de estado estacionario consiste en que cuenta con dos ecuaciones y tiene cuatro incógnitas principales: V , P , Q y s . Para tener solución única, normalmente se debe de fijar el valor de dos de las variables anteriores. Como se verá en las secciones siguientes, es en este aspecto que los modelos propuestos varían.

A partir del circuito equivalente de estado estacionario del motor mostrado en la Fig. 2.1 se pueden establecer las siguientes ecuaciones para sus inyecciones de potencia activa y reactiva respectivamente [Ruiz, 1996], [Ruiz-Vega et al., 2002]:

$$P = \frac{|V|^2 \left\{ \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] + K_1 \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{-|V|^2 \left\{ (K_1) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] - \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (2.2)$$

Donde las reactancias están en p.u. a la frecuencia síncrona y

$$K_1 = X_r + X_m \quad (2.3)$$

2.3 GRUPO 1: MODELOS CON CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA CONSTANTE

2.3.1 Modelo 1: Modelo que considera a la carga de motores de inducción con una característica de potencia constante (P y Q)

Los datos iniciales para modelos del motor de inducción están compuestos por el consumo de potencia activa y reactiva del motor y su deslizamiento para un voltaje terminal dado (usualmente igual a 1.0 p.u.) [Ruiz, 1996]. Una forma de incluir el modelo de carga de motores de inducción en estudios estáticos (como el estudio de flujos de potencia) es considerar esta carga con una característica de potencia constante, para lo cual, se toman las potencias iniciales P y Q de consumo del motor y se fijan como potencias de carga con características de potencia constante durante todo el estudio.

Ésta es la representación de las cargas de motores de inducción que se incluye en la mayoría de los programas comerciales de flujos de potencia.

2.4 GRUPO 2: MODELOS QUE MANTIENEN CONSTANTE LA POTENCIA ACTIVA

2.4.1 Modelo 2: Modelo estático que mantiene constante la potencia activa del motor

El modelo descrito por las ecuaciones (2.1) y (2.2) no puede ser resuelto arbitrariamente, ya que tiene dos ecuaciones y cuatro incógnitas: el voltaje terminal V , las potencias activa P y reactiva Q , y el deslizamiento s del rotor. Como ya antes ha sido mencionado, esta característica del modelo da la posibilidad de solucionarla de muchas formas diferentes. En las referencias [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002] se plantea que, de acuerdo al comportamiento del motor ante pequeñas variaciones del voltaje terminal con respecto a su valor nominal, la forma correcta para solucionar el modelo de estado estacionario del motor de inducción es considerar que su potencia activa es constante (independiente de las variaciones del voltaje).

Ya que la potencia activa es considerada independiente de las variaciones del voltaje, (2.1) puede ser expresada en términos del deslizamiento del rotor [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002]:

$$\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 A + \left(\frac{R_r}{s}\right) B + C = 0 \quad (2.4)$$

Donde:

$$A = P(R_s^2 + K_3^2) - |V|^2 R_s \quad (2.5)$$

$$B = 2P(R_s K_2 + K_3 K_4) - |V|^2 (K_2 + K_1 K_3) \quad (2.6)$$

$$C = P(K_2^2 + K_4^2) - |V|^2 K_1 K_4 \quad (2.7)$$

$$K_2 = -X_s K_1 - X_r X_m \quad (2.8)$$

$$K_3 = X_m + X_s \quad (2.9)$$

$$K_4 = R_s K_1 \quad (2.10)$$

Por lo que para variaciones lentas del voltaje terminal con respecto al voltaje nominal, la potencia activa P del motor será constante y el deslizamiento y potencia reactiva del motor estarán en función de la variación de su voltaje en terminales y serán calculadas al resolver el modelo formado por las ecuaciones (2.2)-(2.10).

2.4.2 Modelo 3: Modelo estático delta-dos-nodos que mantiene constante la potencia activa del motor

Este modelo propuesto parte del circuito de estado estacionario del motor de inducción de la Fig. 2.1, considerando constante la potencia activa de consumo total del motor (P de estator y P de rotor). Para incluir este modelo en estudios estáticos como en el estudio de flujos de potencia, es necesario modificar el circuito equivalente de la Fig. 2.1. Esto se logra modificando la impedancia en estrella (formada por jX_s , jX_r y jX_m) entre los nodos 0, 2 y 4 del circuito de la Fig. 2.1 a una impedancia en delta o circuito π , como se muestra en la Fig. 2.2b.

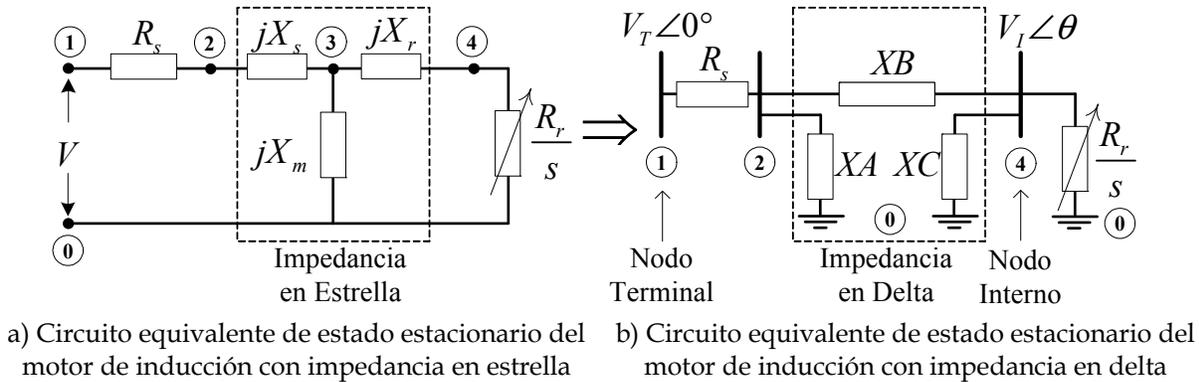


Fig. 2.2. Transformación inicial del modelo estático 3 del motor de inducción de un circuito eléctrico tipo estrella a uno delta.

Donde las nuevas reactancias son calculadas como sigue:

$$XA = j \left(X_s + X_m + \frac{X_s X_m}{X_r} \right) \quad (2.11)$$

$$XB = j \left(X_s + X_r + \frac{X_s X_r}{X_m} \right) \quad (2.12)$$

$$XC = j \left(X_m + X_r + \frac{X_r X_m}{X_s} \right) \quad (2.13)$$

El modelo estático 3 del motor de inducción es completado al sustituir la resistencia del estator y rotor de la Fig. 2.2b por inyecciones de potencia activa constante respectivamente, como se muestra en la Fig. 2.3.

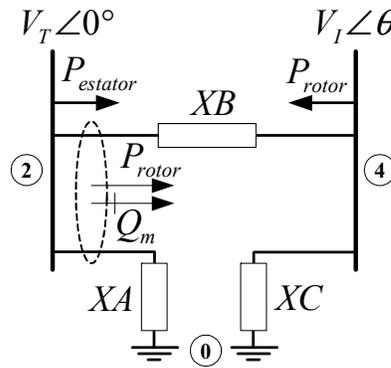


Fig. 2.3. Modelo estático 3 del motor de inducción, considerando constante la potencia activa del estator y rotor.

Por lo que al modelar cada motor se necesitan dos nodos, uno en terminales del motor y otro interno.

Como se muestra en la Fig. 2.3, la resistencia del estator y rotor son eliminadas y remplazadas por cargas con potencia activa constante, cuyos valores son calculados usando los parámetros del motor y los valores iniciales del voltaje terminal (V_{T0}) y el deslizamiento (s_0). La potencia activa inicial del estator y rotor son calculadas de acuerdo al siguiente procedimiento:

- a) Con los valores iniciales del voltaje en terminales del motor de inducción y su deslizamiento, el voltaje en el nodo interno del motor está dado por la ecuación:

$$V_{I_0} = \frac{(V_{T0})(R_r)}{(s_0)(a) + (R_r)(b) + \frac{R_s}{(XA)(XC)}(c)} \quad (2.14)$$

Donde:

$$a = XB + R_s (1 + XB/XA) \quad (2.15)$$

$$b = 1 + (XB + R_s)/XC \quad (2.16)$$

$$c = R_r (XC + XB) \quad (2.17)$$

- b) La potencia activa del rotor en función del voltaje interno dado por la ecuación (2.14) y su deslizamiento inicial está dada por:

$$P_{rotor} = |V_{I_0}|^2 \left(\frac{s_0}{R_r} \right) \quad (2.18)$$

- c) La potencia activa del estator finalmente está dada por:

$$P_{motor} = P_{estator} + P_{rotor} \quad (2.19)$$

$$P_{estator} = P_{motor} - P_{rotor} \quad (2.20)$$

Como la potencia activa del rotor es calculada con los datos iniciales del voltaje en terminales y su deslizamiento inicial, podría creerse erróneamente que en este modelo también se fija el deslizamiento, ya que al fijar la potencia activa del rotor ésta es calculada con un valor inicial de deslizamiento. Sin embargo, al cambiar el valor del voltaje interno V_I como consecuencia de la variación del voltaje en terminales, mantener constante la potencia activa del rotor requiere ajustar el valor del deslizamiento para el nuevo valor de voltaje, como se puede ver en la ecuación (2.18).

La razón de representar la carga de motores de inducción por medio del Modelo Estático 3 que emplea un circuito delta, es que a diferencia del modelo con el circuito en estrella, la representación del primero es mucho más fácil, pues este modelo puede representarse como un simple nodo PQ adicional con una carga con factor de potencia unitario (la potencia activa del rotor) conectado al nodo terminal del motor (el cual también cuenta con una carga con factor de potencia unitario, la potencia activa del estator) por medio de una línea equivalente (representada por la reactancia XB), y reactancias en paralelo (XA y XC), como se muestra en la Fig. 2.3.

Utilizando esta representación, el Modelo 3 puede ser incluido sin problemas en cualquier programa de flujos de potencia convencional de manera sencilla y adecuada. Cabe mencionar que las reactancias XA y XC conectadas en paralelo mejoran el condicionamiento de la matriz Y_{bus} del estudio de flujos de potencia, al ser sumadas como admitancias al elemento diagonal correspondiente a los nodos terminal e interno en esta matriz.

2.5 GRUPO 3: MODELOS QUE MANTIENEN CONSTANTE AL DESLIZAMIENTO

2.5.1 Modelo 4: Modelo estático que mantiene constante al deslizamiento que incluye las ecuaciones del circuito de estado estacionario en la matriz Jacobiana del sistema

Como ya se ha mencionado, el modelo descrito por las ecuaciones (2.1) y (2.2) da la posibilidad de ser solucionado de muchas formas diferentes. En [Liu et al., 1997] se

propone solucionar el modelo de estado estacionario de la Fig. 2.1 haciendo el deslizamiento s constante e igual a su valor inicial. Con esta consideración las potencias activa y reactiva de consumo del motor quedarían en función de su voltaje en terminales, con una característica de impedancia constante, de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$P = P_0 |V|^2 \quad \text{con} \quad P_0 = \frac{\left(\frac{R_r}{s_0}\right) \left[\left(\frac{R_r}{s_0}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] + K_1 \left[\left(\frac{R_r}{s_0}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]}{\left[\left(\frac{R_r}{s_0}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s_0}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (2.21)$$

$$Q = Q_0 |V|^2 \quad \text{con} \quad Q_0 = \frac{- \left\{ (K_1) \left[\left(\frac{R_r}{s_0}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] - \left(\frac{R_r}{s_0}\right) \left[\left(\frac{R_r}{s_0}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s_0}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s_0}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (2.22)$$

Este modelo queda descrito por las ecuaciones (2.21), (2.22), (2.3), las cuales se incluyen en las ecuaciones de desbalance del modelo de flujos de potencia y sus derivadas en los elementos diagonales de las submatrices Jacobianas correspondientes al nodo terminal del motor.

2.5.2 Modelo 5: Modelo estático de impedancia equivalente que considera al deslizamiento s constante

En este modelo se reduce al circuito equivalente de estado estacionario del motor de inducción mostrado en la Fig. 2.1 a una impedancia equivalente. Para calcular dicha impedancia se toma el valor inicial del deslizamiento del motor (por lo que este queda fijo durante todo el estudio de flujos de potencia). Dicha impedancia es conectada al nodo terminal del motor como una carga con característica de impedancia constante, como muestra la Fig. 2.4.

Con esta representación, el consumo de potencia activa y reactiva del motor está modelado por el consumo de potencia activa y reactiva de la impedancia constante equivalente en función de las variaciones del voltaje terminal.

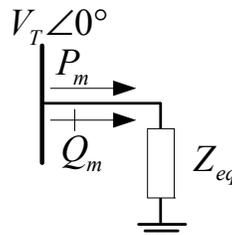


Fig. 2.4. Modelo estático 5 de impedancia equivalente que considera al deslizamiento s constante.

Donde:

$$Z_{eq} = \left[R_s + \frac{X_m^2}{\alpha_1} \right] + j \left[X_s + \frac{X_m \alpha_2}{\alpha_3} \right] \quad (2.23)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_r}{s} + \left(\frac{s}{R_r} \right) (X_r + X_m)^2 \quad (2.24)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + X_r^2 + X_m X_r \quad (2.25)$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_r + X_m)^2 \quad (2.26)$$

2.5.3 Modelo 6: Modelo estático de dos nodos, obtenido a partir del circuito equivalente en estado estacionario del motor de inducción, que mantiene el deslizamiento constante

Este modelo parte del circuito de estado estacionario del motor de inducción de la Fig. 2.1, en el que se considera al deslizamiento constante e igual a su valor inicial (por lo que la resistencia del estator R_r/s también es constante). La diferencia con los modelos anteriores que mantienen al deslizamiento constante es que para este modelo se agrega un nodo en el punto de unión de la impedancia del rotor ($R_r/s + jX_r$) y la reactancia de magnetización (jX_m) del modelo de estado estacionario del motor de inducción mostrado en la Fig. 2.1, por lo que se tienen dos nodos, uno en las terminales del motor delante de la impedancia del estator ($R_s + jX_s$) y otro interno detrás de dicha impedancia, por lo tanto, el circuito de estado estacionario de la Fig. 2.1 puede ser transformado a un modelo de dos nodos como muestra la Fig. 2.5.

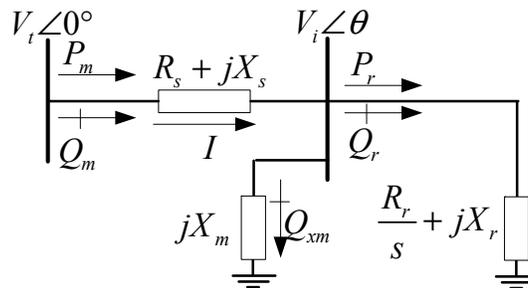


Fig.2.5. Modelo estático 6 del motor de inducción que mantiene el deslizamiento constante.

En este modelo por cada motor, además del nodo terminal del motor se modela explícitamente el nodo interno detrás de la impedancia del estator. Además, se mantiene el deslizamiento constante, por lo que la impedancia del rotor es también fija. Las potencias activa y reactiva de consumo del motor P_m y Q_m serán las potencias de transmisión entre el nodo terminal y el interno y estarán en función de la variación del valor del voltaje terminal e interno.

2.5.4 Modelo estático del motor de inducción derivado del modelo dinámico de tercer orden del motor de inducción

En [Da Costa and Da Silva, 1998, Henriques et al., 2002, Martins et al., 2003], se ha propuesto un modelo estático del motor deducido a partir del modelo dinámico de tercer orden, dado por las siguientes ecuaciones:

Ecuación del estator (equivalente de Norton)

$$I_t = \frac{V - E'}{R_s + jX'} \quad (2.27)$$

Ecuaciones dinámicas del rotor

$$\frac{dE'}{dt} = -\frac{1}{T'_0} [E' - j(X_0 - X')I_t] - j\omega_0 s E' \quad (2.28)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - T_m) \quad (2.29)$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (2.30)$$

Donde: ω es la velocidad del rotor.
 ω_0 es la velocidad síncrona.
 T_m es el par mecánico.
 T_e es el par eléctrico.
 E' es el voltaje transitorio del motor.

Además se definen los siguientes parámetros:

Reactancia de circuito abierto

$$X_0 = X_s + X_m \quad (2.31)$$

Reactancia transitoria

$$X' = X_s + \frac{X_r X_m}{X_r + X_m} \quad (2.32)$$

Constante de tiempo de circuito abierto:

$$T'_0 = \frac{X_r + X_m}{\omega_0 R_r} \quad (2.33)$$

En la Fig. 2.6 se muestra el circuito equivalente dinámico de Thévenin para el modelo de tercer orden del motor de inducción:

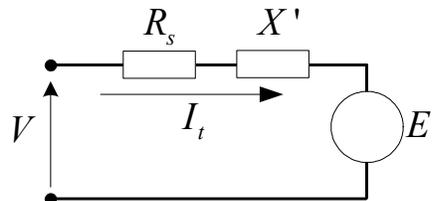


Fig. 2.6. Circuito equivalente de Thévenin del modelo dinámico de tercer orden del motor de inducción (adaptado de [Henriques et al., 2002, Martins et al., 2003]).

El modelo propuesto es un modelo estático, que al mantener el valor del deslizamiento constante elimina a las ecuaciones (2.29) y (2.30) y también la derivada en la ecuación (2.28).

- La primera parte del modelo está constituida por la impedancia equivalente de Thévenin (Fig. 2.6), utilizando un nuevo nodo 2, conectado al nodo terminal 1 del motor por medio de la impedancia equivalente de Thévenin $R_s + jX'$ del modelo dinámico, como muestra la Fig. 2.7.
- La segunda parte del modelo sustituye la fuente equivalente de voltaje E' del circuito equivalente de la Fig. 2.6 por dos ramas de impedancia constante, obtenidas a partir de la ecuación (2.28) modificada como se muestra a continuación:

$$j(X_0 - X')I_t - E' - j\omega_0 s E' T'_0 = 0 \quad (2.34)$$

Despejando I, se tiene:

$$I_t = E' \frac{\omega_0 s T'_0}{(X_0 - X')} + \frac{E'}{j(X_0 - X')} \quad (2.35)$$

La ecuación (2.35) se puede redefinir como:

$$I_t = \frac{E'}{\text{Re}} + \frac{E'}{j(X_0 - X')} \quad (2.36)$$

Donde

$$\text{Re} = \frac{(X_0 - X')}{s\omega_0 T'_0} \quad (2.37)$$

Sustituyendo la ecuación (2.33) en la ecuación (2.37), tenemos:

$$\text{Re} = \frac{R_r (X_0 - X')}{s(X_r + X_m)} \quad (2.38)$$

A partir de la ecuación (2.36) se puede obtener la expresión de dos ramas de impedancia constante (resistiva y reactiva) al conjugarla y multiplicarla por E' :

$$P_r = \frac{E'^2}{\text{Re}} \quad (2.39)$$

$$Q_{N2} = j \frac{E'^2}{(X_0 - X')} \quad (2.40)$$

La estructura del final del modelo se presenta en la Fig. 2.7.

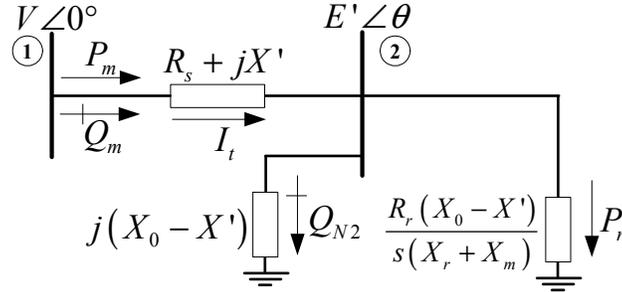


Fig. 2.7. Circuito equivalente del modelo estático del motor de inducción derivado del modelo dinámico de tercer orden del motor de inducción (Adaptado de [Henriques et al., 2002, Martins et al., 2003]).

El modelo mostrado en la Fig. 2.7 provee resultados numéricos equivalentes a los obtenidos del circuito de estado estacionario del motor de inducción mostrado en la Fig. 2.1. Por lo tanto, de este circuito equivalente del motor de inducción, pueden ser derivados modelos con potencia activa constante o deslizamiento constante. En esta tesis se presenta un modelo con deslizamiento constante (Modelo 7) derivado de este circuito equivalente.

2.5.4.1. Modelo 7: Modelo estático de dos nodos que mantiene el deslizamiento constante

Considerando el deslizamiento constante e igual a su valor inicial las ramas conectadas al nodo 2 en la Fig. 2.7 se pueden modelar como cargas de impedancia constante, por lo que el modelo 7 del motor quedaría formado por el nodo terminal 1 y el nodo interno 2. En el caso del estudio de flujos de potencia estas ramas ayudan a mejorar el condicionamiento de Y_{bus} , las cuales se pueden combinar e incluir como equipos en paralelo cuyas admitancias se añaden al elemento diagonal correspondiente al nuevo nodo del motor en Y_{bus} .

El consumo de potencias activa y reactiva P_m y Q_m del motor de inducción para este modelo serán las potencias de transmisión entre los nodos terminal e interno del motor (mostradas en la Fig. 2.7), dichas potencias estarán en función de la variación de los voltajes terminal e interno del motor.

CAPÍTULO 3:

REPRESENTACIÓN DE MOTORES DE INDUCCIÓN EN EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA

3.1 INTRODUCCIÓN

Los ingenieros encargados de la planeación y la operación del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) basan muchas de sus decisiones para reforzar el SEP y/o para mejorar el desempeño del mismo, en los resultados de estudios de simulación como los Estudios de Flujos de Potencia y de Estabilidad. Cuando se realiza alguna simulación del SEP el modelo debe incluir una representación más detallada de los elementos principales que tienen una influencia importante en el comportamiento del SEP en estado estacionario y dinámico. La forma en que se representan los componentes más importantes del SEP depende del objetivo y tipo del estudio, así como del marco de tiempo en el que se desarrolla el fenómeno de interés [García, 2007].

Representar modelos más detallados de componentes de carga en el estudio de flujos de potencia no es muy difícil cuando se comprende bien la estructura del modelo del sistema y el método de solución en particular. En el cálculo convencional de flujos de potencia, la carga se considera como carga de potencia constante sin importar la variación de voltaje [Liu et al., 1997], los modelos detallados (mejorados) de estos elementos como los motores de inducción se pueden incluir fácilmente en el estudio de flujos de potencia siempre y cuando se representen en términos de inyecciones de potencia (activa y reactiva) variantes con la magnitud del voltaje terminal.

3.2 EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA

El estudio de flujos de potencia (o flujos de carga) es la solución para la condición de operación de estado estacionario del sistema eléctrico de potencia y es utilizado para la planeación, operación y control/operación del sistema de potencia [Stott, 1974].

Con una mejor representación de cargas, generadores y equipos de compensación de potencia reactiva, el estudio de flujos de potencia es utilizado en algunos estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo que analizan de manera aproximada el comportamiento dinámico del sistema como son los métodos de las curvas $P-V$ y $Q-V$ [Ruiz y Olguín, 1997].

En [Elgerd, 1982] se establece que el problema de calcular flujos de potencia puede ser dividido en los siguientes subproblemas:

- a) La formulación de un modelo matemático de la red. El modelo debe describir adecuadamente las relaciones entre los voltajes y las potencias en el sistema interconectado.
- b) La especificación de las restricciones de potencia y voltaje que se deben aplicar a los diferentes nodos de la red.
- c) La solución numérica de las ecuaciones de flujos de potencia sujetas a las restricciones mencionadas anteriormente. Estos cálculos deben proporcionar, con una exactitud adecuada, los valores de todos los voltajes nodales.
- d) Cuando se han determinado todos los voltajes de nodo, se deben calcular finalmente los flujos de potencia reales en los elementos de la red de transmisión.

Una descripción general del estudio de flujos de potencia por el método completo de Newton-Raphson y del programa de simulación "FLUJOS" empleados en este trabajo, se presentan en [Ruiz y Olguín, 1997].

3.2.1. Condicionamiento de la matriz de admitancias de nodo del sistema

La mayoría de los programas actuales de flujos de carga para estudios en sistemas de potencia grandes, utilizan la matriz de admitancias de nodo [Stagg and El-Abiad, 1968, Ruiz y Olguín, 1997]. En términos de la matriz de admitancias de nodo Y , el comportamiento de la red esta representado por el siguiente sistema de ecuaciones algebraicas no lineales:

$$\tilde{I} = Y_{bus} \tilde{V}_n \quad (3.1)$$

Donde I es el vector de inyecciones de corriente hacia la red debidas a generadores y cargas, V_n es el vector de voltajes nodales y Y_{bus} es la matriz de admitancias de nodo. Es un sistema de ecuaciones no lineal, porque los elementos del vector de inyecciones de corriente I dependen de los elementos del vector de voltajes de nodo V_n . La matriz de admitancias de nodo tiene una estructura bien definida, que hace que sea fácil construirla.

En general es adecuada una representación monofásica del sistema eléctrico de potencia, dado que los sistemas de potencia en estado estacionario operan en forma balanceada. En el caso de que se quieran analizar problemas especiales como la operación de una red desbalanceada o un análisis armónico, puede utilizarse un modelo trifásico [Elgerd, 1982, Ruiz y Olguín, 1997].

Del sistema de ecuaciones algebraicas no lineales dado por la expresión (3.1) es fácil observar que si una red no tiene admitancias en paralelo no puede ser resuelta aún cuando se trabaje con una exactitud computacional absoluta. De esta manera una red que tiene admitancias en paralelo muy pequeñas puede presentar dificultades cuando se trabaja con una exactitud computacional limitada [Arrillaga and Arnold, 1990]. Este razonamiento provee una clave para los problemas prácticos de la red, es decir, el condicionamiento de la matriz de admitancias de nodo Y . Una matriz de un sistema con admitancias en paralelo pequeñas con respecto a las admitancias de rama puede estar mal condicionada, y el condicionamiento de la matriz tiende a mejorar con la magnitud de las admitancias en paralelo, es decir, con la conexión eléctrica entre los nodos de la red y el nodo de referencia [Arrillaga and Arnold, 1990]. Los modelos estáticos 3, 5, 6, y 7 del motor de inducción presentados en el Capítulo 2 pueden ayudar a este condicionamiento, ya que consideran admitancias en paralelo para representar cargas de motores de inducción.

A continuación se describe la implementación de los siete modelos estáticos del motor de inducción, descritos en el Capítulo 2, adecuados para su implementación en el estudio de flujos de potencia.

3.3 REPRESENTACIÓN DE LOS MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR EN EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA

Normalmente, el voltaje en las terminales del motor V se toma como un dato que es proporcionado en cada una de las iteraciones del estudio de flujos de potencia, mientras que las variables restantes P , Q y s son calculadas [Ruiz, 1996].

3.3.1 Representación del Modelo 1

Como ya se explicó en el capítulo 2, la representación de este modelo en el estudio de flujos de potencia es considerar las potencias P y Q de consumo del motor como constantes. Consideraciones para la representación del Modelo 1 en el estudio de flujos de potencia:

- a) Con el valor inicial del voltaje en terminales (que usualmente es igual a 1 p.u.) y de la potencia activa de consumo del motor, se calcula el deslizamiento y la potencia reactiva iniciales del motor por medio de las ecuaciones (2.1) y (2.2).

- b) Los valores de las potencias P y Q del inciso a) se fijan como las potencias de carga en el nodo correspondiente a las terminales del motor durante todo el estudio de flujos de potencia.

Con esta representación los valores de P , Q y s del motor quedan fijos durante todo el estudio de flujos de potencia y la única variable que es modificada es el voltaje terminal del motor, ya que éste es ajustado durante el estudio de flujos de potencia para dar solución al sistema. Como ya se ha mencionado, esta representación produce problemas en la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción, debido a que los valores de P , Q y s no coinciden para el nuevo valor del voltaje terminal después del estudio de flujos de potencia. Este problema es analizado en detalle en el Capítulo 4 de esta tesis.

3.3.2 Representación del Modelo 2

En el Capítulo 2 se explicó que este modelo de estado estacionario del motor de inducción considera que su potencia activa es constante. Con esta consideración el modelo descrito por (2.1) y (2.2) con cuatro incógnitas pasa a ser un sistema de dos ecuaciones con tres incógnitas (V , Q y s), descrito principalmente por las ecuaciones (2.4) y (2.2), y las ecuaciones auxiliares (2.5) a (2.10):

$$\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 A + \left(\frac{R_r}{s}\right) B + C = 0 \quad (2.4)$$

$$Q = \frac{-|V|^2 \left\{ (K_1) \left[\left(\frac{R_r}{s}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] - \left(\frac{R_r}{s}\right) \left[\left(\frac{R_r}{s}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (2.2)$$

Como en el estudio de flujos de potencia se obtiene el valor del voltaje terminal de los motores de inducción, este sistema de dos ecuaciones con tres incógnitas pasa a ser uno con dos incógnitas, por lo que de esta forma es posible dar solución a las variables principales del motor (V , P , Q y s). La potencia activa inicial y el voltaje terminal obtenido en cada iteración del estudio de flujos de potencia son usados para calcular el deslizamiento real y la potencia reactiva del motor. El proceso de solución en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson descrito en [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002] es el siguiente:

- a) K_1 a K_4 son calculadas usando (2.3) y (2.8)-(2.10). Sus valores y la potencia activa del motor son mantenidas constantes durante todo el estudio de flujos de potencia.
- b) En cada iteración, los coeficientes A , B y C son calculados usando el valor de V y las formulas (2.5)-(2.7). Dichos coeficientes varían en función del valor de V .

- c) Se soluciona la ecuación (2.4) y se obtienen dos valores de R_r/s , se despeja s y se selecciona el valor menor ya que es el que está en la región estable de la curva par-deslizamiento del motor.
- d) Una vez seleccionado el valor del deslizamiento del rotor, se calcula la potencia reactiva que consume el motor utilizando la ecuación (2.2).
- e) Después de que la matriz Jacobiana ha sido construida en la forma convencional, la primera derivada parcial de la potencia reactiva del motor con respecto al voltaje es añadida al término diagonal en la correspondiente submatriz. Esta derivada parcial, en términos de (2.2), esta dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{-2|V| \left\{ (K_1) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] - \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (3.2)$$

- f) Los pasos b)-e) son repetidos hasta que el estudio converge.

Al realizar el estudio de flujos de potencia incluyendo este modelo estático del motor de inducción, los valores obtenidos para las variables principales del motor de inducción (V , P , Q y s) serán sus valores reales, ya que estos han sido ajustados durante todo el estudio al considerar el comportamiento real del motor de inducción a través de su modelo estático.

3.3.3 Representación del Modelo 3

La representación de este modelo en el estudio de flujos de potencia es muy sencilla, ya que no se debe modificar el programa de flujos de potencia, sino solamente el archivo de datos del sistema al adicionar un nodo ficticio adicional conectado por una línea equivalente por cada motor, como se muestra en la Fig. 2.3:

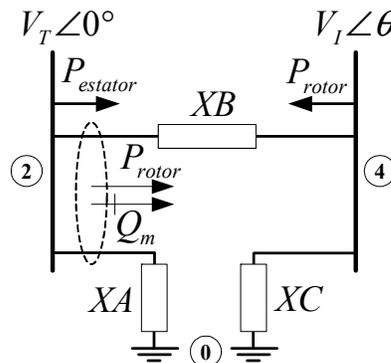


Fig. 2.3. Modelo estático 3 del motor de inducción, considerando constante la potencia activa del estator y rotor.

De esta manera, por cada motor, además del nodo terminal se modela explícitamente el nodo interno detrás de la reactancia X_B . La representación de este modelo en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson es como sigue:

- a) Se calculan X_A , X_B y X_C con los parámetros del motor y las ecuaciones (2.11)-(2.13).
- b) La reactancia X_B es representada como una línea de transmisión equivalente entre el nodo terminal y el nuevo nodo interno del motor.
- c) Las reactancias X_A y X_C son representadas como admitancias conectadas en paralelo a los nodos terminal e interno respectivamente, por lo que al formar la matriz Y_{bus} estas admitancias son sumadas al elemento diagonal correspondiente a los nodos terminal e interno en dicha matriz (esto ayuda a mejorar el condicionamiento de Y_{bus}).
- d) Se calculan las potencia activas del rotor (P_{rotor}) y estator ($P_{estator}$) con los valores iniciales del voltaje en terminales y del deslizamiento utilizando las ecuaciones (2.14) y (2.20), la potencia activa del rotor se fija al nuevo nodo interno del motor y la del estator al nodo terminal del motor y son consideradas como cargas con característica de potencia activa constante durante todo el estudio de flujos de potencia.
- e) Al final del estudio de flujos de potencia el voltaje en terminales del motor de inducción será el correspondiente a su nodo terminal.
- f) La potencia reactiva de consumo del motor Q_m será la obtenida de la suma de la potencia consumida por la reactancia X_A y la potencia reactiva de transmisión entre el nodo terminal y el nodo interno del motor al final del estudio de flujos de potencia.

De esta manera, el nodo interno del motor es un nuevo nodo tipo PQ **con potencias activa y reactiva de generación y potencia reactiva de carga iguales a cero (y con potencia activa de carga $P=P_{rotor}$)**. Durante el estudio de flujos de potencia, la potencia reactiva de consumo del motor Q_m se ajustará automáticamente con las variaciones de voltaje de los nodos terminal e interno.

El valor real del deslizamiento para el nuevo valor del voltaje del nodo interno del motor de inducción puede ser calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$s = P_{rotor} \frac{R_r}{|V_l|^2} \quad (3.3)$$

3.3.4 Representación del Modelo 4

En [Liu et al., 1997] se propone incluir el modelo de estado estacionario de la Fig. 2.1 en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson manteniendo el valor del deslizamiento constante e igual a su valor inicial. De esta manera, a partir de las dos ecuaciones (2.21) y (2.22) del modelo, se deben calcular las siguientes derivadas parciales:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P(\delta)/\partial \delta}{\partial Q(\delta)/\partial \delta} & \frac{\partial P(V)/\partial V}{\partial Q(V)/\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Sin embargo, como finalmente en este modelo del motor ni P ni Q dependen del ángulo δ , el efecto del motor en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson completo, se modela al incluir solamente los términos $\frac{\partial P(V)}{\partial V}$ y $\frac{\partial Q(V)}{\partial V}$ en la matriz Jacobiana del sistema. Estas derivadas parciales, en términos de (2.21) y (2.22), están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 2P_0 |V| \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = 2Q_0 |V| \quad (3.6)$$

El proceso de solución en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson es el siguiente:

- Al calcular los desbalances del nodo terminal del motor se utilizan las ecuaciones (2.21) y (2.22) para calcular P y Q del motor, respectivamente.
- Cuando se forma la matriz Jacobiana del sistema, se utilizan las ecuaciones (3.5) y (3.6) para calcular los elementos adicionales que se deben incluir en el elemento diagonal correspondiente al nodo terminal del motor en las submatrices respectivas de la matriz Jacobiana.

3.3.5 Representación del Modelo 5

Representar la carga de motores de inducción por medio de este modelo en el estudio de flujos de potencia se reduce a incluir solo una admitancia en derivación al nodo terminal de la carga de motores de inducción. La representación de este modelo en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson es como sigue:

- Con el deslizamiento inicial del motor y las ecuaciones (2.23)-(2.26) se calcula la impedancia equivalente Z_{eq} del motor de inducción.

- b) La impedancia Z_{eq} es representada como una admitancia conectada en paralelo al nodo terminal del motor de inducción, por lo que al formar la matriz Y_{bus} esta admitancia es sumada al elemento diagonal correspondiente al nodo terminal en dicha matriz (esto mejora el condicionamiento de Y_{bus}).
- c) Al final del estudio de flujos de potencia el voltaje en terminales del motor de inducción será el correspondiente al nodo terminal de la impedancia Z_{eq} .
- d) Las potencias activa y reactiva de consumo del motor P_m y Q_m serán las potencias de consumo de la impedancia Z_{eq} al final del estudio de flujos de potencia.

De esta manera, el nodo terminal del motor es considerado como un nodo tipo PQ **con potencias activa y reactiva de generación y de carga iguales a cero**. Durante el estudio de flujos de potencia, las potencias activas y reactivas de consumo del motor P_m y Q_m se ajustarán automáticamente con las variaciones del voltaje terminal.

El valor del deslizamiento para el nuevo valor del voltaje del nodo terminal del motor de inducción será el mismo que el inicial, ya que durante el estudio de flujos de potencia los valores del voltaje en terminales y potencias P_m y Q_m son ajustados en función del valor de la impedancia Z_{eq} (cuyo valor depende del deslizamiento inicial).

3.3.6 Representación del Modelo 6

De manera similar al Modelo 3 la representación del Modelo 6 en el estudio de flujos de potencia es muy sencilla, ya que no se debe modificar el programa de flujos de potencia, pues este modelo es tratado como un problema estándar de flujos de potencia de dos nodos. Como se expuso en el Capítulo 2 este modelo esta dado por la Fig. 2.5:

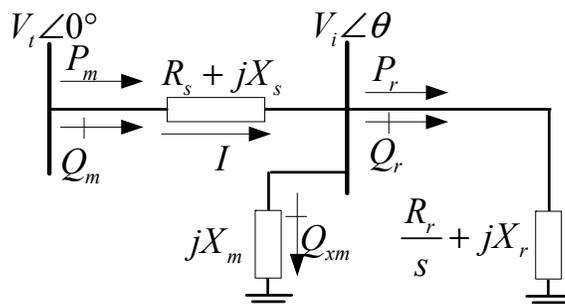


Fig.2.5. Modelo estático 6 del motor de inducción que mantiene el deslizamiento constante.

En este modelo por cada motor, además del nodo terminal del motor se modela explícitamente el nodo interno detrás de la impedancia del estator. Además, se mantiene el deslizamiento constante, por lo que la impedancia del rotor es también fija. La reactancia de magnetización y la impedancia del rotor se reducen en paralelo

y se incluyen en el elemento diagonal de Y_{bus} correspondiente al nuevo nodo interno del motor.

De esta manera, el nodo interno del motor es un nuevo nodo tipo PQ **con potencias activa y reactiva de carga y generación iguales a cero**. Durante el estudio de flujos de potencia, las potencias activas y reactivas de consumo del motor P_m y Q_m se ajustarán automáticamente con las variaciones de voltaje de los nodos terminal e interno. Al terminar el estudio de flujos de potencia, las potencias de consumo del motor son las potencias de transmisión entre el nodo terminal y el nodo interno.

La representación de este modelo en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson es como sigue:

- a) La impedancia del estator $R_s + jX_s$ es representada como una línea entre los nodos terminal y el nuevo nodo interno del motor.
- b) La reactancia de magnetización jX_m y la impedancia del rotor $R_r/s + jX_r$ son representadas como admitancias conectadas en paralelo al nodo interno, por lo que al formar la matriz Y_{bus} estas admitancias son sumadas al elemento diagonal correspondiente al nuevo nodo interno del motor en dicha matriz (lo cual ayuda a mejorar el condicionamiento de Y_{bus}).
- c) Al final del estudio de flujos de potencia el voltaje en terminales del motor de inducción será el correspondiente al nodo terminal del modelo.
- d) Las potencias activa y reactiva de consumo del motor P_m y Q_m serán las potencias de transmisión entre el nodo terminal y el nodo interno al final del estudio de flujos de potencia.

El valor del deslizamiento para el nuevo valor del voltaje del nodo terminal del motor de inducción será el mismo que el inicial, ya que durante el estudio de flujos de potencia los valores para el voltaje en terminales, voltaje interno y potencias P_m y Q_m son ajustados en función del valor de los parámetros del motor y resistencia del rotor (cuyo valor depende del deslizamiento inicial).

3.3.7 Representación del Modelo 7

La representación del Modelo 7 en el estudio de flujos de potencia es muy sencilla, ya que no se debe modificar el programa de flujos de potencia, sino adicionar una línea de transmisión equivalente con un nodo adicional por cada motor. Como se expuso en el Capítulo 2 este modelo está dado por la Fig. 2.7:

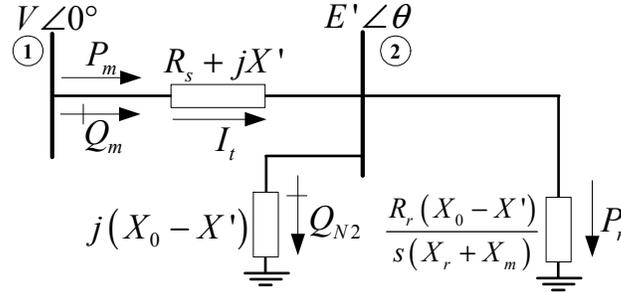


Fig. 2.7. Modelo 7 de estado estacionario de dos nodos para el motor de inducción (Adaptado de [Henriques et al., 2002, Martins et al., 2003]).

$$\text{Con:} \quad R_e = \frac{R_r (X_0 - X')}{s (X_r + X_m)} \quad (2.38)$$

En este modelo por cada motor, además del nodo terminal del motor se modela explícitamente el nodo interno detrás de la impedancia de Thévenin. Además, se mantiene el deslizamiento constante e igual a su valor inicial, por lo que la rama con impedancia puramente resistiva del nodo interno es también fija.

De esta manera, el nodo interno del motor es un nuevo nodo tipo PQ **con potencias activa y reactiva de carga y generación iguales a cero**. Durante el estudio de flujos de potencia, las potencias activas y reactivas de consumo del motor P_m y Q_m se ajustarán automáticamente con las variaciones de voltaje de los nodos terminal e interno. Al terminar el estudio de flujos de potencia, las potencias de consumo del motor son las potencias de transmisión entre el nodo terminal y el nodo interno.

La representación de este modelo en el estudio de flujos de potencia es como sigue:

- La impedancia de Thévenin $R_s + jX'$ es representada como una línea entre los nodos terminal y el nuevo nodo interno del motor.
- La rama con reactancia $j(X_0 - X')$ y la rama con resistencia R_e son representadas como admitancias conectadas en paralelo al nuevo nodo interno, por lo que al formar la matriz Y_{bus} estas admitancias son sumadas al elemento diagonal correspondiente al nuevo nodo interno en dicha matriz (esto ayuda a mejorar el condicionamiento de Y_{bus}).
- Al final del estudio de flujos de potencia el voltaje en terminales del motor de inducción será el correspondiente al nodo terminal del modelo.
- Las potencias activa y reactiva de consumo del motor P_m y Q_m serán las potencias de transmisión entre el nodo terminal y el nodo interno al final del estudio de flujos de potencia.

Los parámetros de los motores de inducción y del sistema se presentan en el Apéndice A del presente trabajo. Además en el Apéndice A se muestran los resultados del estudio de flujos de potencia para la totalidad del sistema utilizando todos los modelos estáticos del motor de inducción.

3.4.1.1 Resultados del estudio de flujos de potencia del Sistema Taylor 10-Nodos con el programa FLUJOS

Con el objetivo de simplificar el análisis de los resultados obtenidos al representar al motor de inducción por sus diferentes modelos estáticos en el estudio de flujos de potencia, a continuación solo se analizan los resultados obtenidos para cada motor del sistema Taylor 10-Nodos al representar este tipo de cargas por los diferentes modelos estáticos descritos hasta ahora. Los resultados para la totalidad del sistema se muestran a detalle en el Apéndice A. Las simulaciones de esta sección se realizaron con el programa FLUJOS [Ruiz, 1996], para poder simular todos los modelos estáticos descritos en este Capítulo y el Capítulo 2.

Para obtener los resultados de las Tablas 3.1-3.3 se realizaron estudios de flujos de potencia del sistema de la Fig. 3.1 modelando la totalidad de carga de motores de inducción por el mismo tipo de modelo estático, es decir que en cada estudio de flujos de potencia se utilizó el mismo modelo estático para representar a los motores M1, M2 y M3 del sistema de la Fig. 3.1, por lo que se realizaron siete estudios de flujos de potencia, uno por cada modelo estático del motor descrito en esta tesis. Sin embargo, para tener una mejor apreciación de las diferencias y similitudes entre resultados de cada modelo, los resultados se han organizado por motor, es decir que, para cada motor se presentan los resultados obtenidos por cada modelo estático.

En las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran los resultados para las variables principales de los motores M1, M2 y M3 respectivamente. En la primera columna de izquierda a derecha se muestra el número de modelo estático que fue utilizado en el estudio de flujos de potencia para representar al motor de inducción.

De cada modelo se han obtenido los resultados para el voltaje terminal (V), potencia activa (P), potencia reactiva (Q) y deslizamiento (s) del motor. La columna con el encabezado "No. de Iteraciones" muestra el número de iteraciones que fueron necesarias para la solución del sistema en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson al modelar la carga de motores de inducción por el modelo estático correspondiente a la columna con el encabezado "Modelo".

Como se observa en la Tabla 3.1, con todos modelos estáticos se obtiene solución numérica del sistema. Sin embargo, existen ciertas diferencias entre sus resultados. Como también se aprecia en las tablas siguientes, los modelos estáticos que mantienen el deslizamiento constante y que parten del circuito de estado estacionario de la Fig. 2.1 (modelos 4-6) ofrecen los mismos resultados en el mismo número de

iteraciones. El modelo estático 7 que parte del modelo dinámico de tercer orden del motor y que también mantiene el deslizamiento constante, ofrece los mismos resultados que los modelos estáticos 4-6, pero utilizando un número de iteraciones mayor, por lo que se puede afirmar que no se obtiene una mejora apreciable con este modelo.

TABLA 3.1. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M1 conectado al nodo 7 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	P	Q	s	No. Iteraciones.	Característica del Modelo
1	1.019010	27.000000	13.986188	0.008811000	5	<i>P, Q y s constantes</i>
2	1.016454	27.000000	14.086720	0.008502000	8	<i>P constante</i>
3	1.011722	27.000000	14.120441	0.008391915	4	
4	1.011174	27.607802	14.300928	0.008811000	4	<i>s constante</i>
5	1.011176	27.607887	14.300972	0.008811000	4	
6	1.011176	27.607887	14.300972	0.008811000	4	
7	1.011176	27.607887	14.300972	0.008811000	5	

TABLA 3.2. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M2 conectado al nodo 7 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.019010	3.000000	1.998538	0.011998000	5	<i>P, Q y s constantes</i>
2	1.016454	3.000000	2.030322	0.011580000	8	<i>P constante</i>
3	1.011722	3.000000	2.056067	0.011246222	4	
4	1.011174	3.067320	2.043417	0.011998000	4	<i>s constante</i>
5	1.011176	3.067329	2.043422	0.011998000	4	
6	1.011176	3.067329	2.043422	0.011998000	4	
7	1.011176	3.067329	2.043422	0.011998000	5	

TABLA 3.3. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M3 conectado al nodo 10 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.010603	15.000000	11.779348	0.040063000	5	<i>P, Q y s constantes</i>
2	1.006829	15.000000	11.906863	0.039482000	8	<i>P constante</i>
3	1.000001	15.000000	12.199875	0.037531459	4	
4	1.001970	15.059149	11.825807	0.040063000	4	<i>s constante</i>
5	1.001972	15.059202	11.825848	0.040063000	4	
6	1.001972	15.059202	11.825848	0.040063000	4	
7	1.001972	15.059202	11.825848	0.040063000	5	

De los resultados obtenidos se observa que el modelo estático 1 (el más utilizado en estudios estáticos) ofrece los resultados más diferentes a los resultados de los modelos restantes y en un número de iteraciones mayor al promedio.

Los modelos 2 y 3 con característica de potencia activa constante (P) ofrecen resultados muy similares, pero en número de iteraciones diferentes. Como se muestra en las tablas, se necesitan ocho iteraciones para dar solución al sistema al utilizar el modelo estático 2, sin embargo, al utilizar el modelo estático 3 el número de iteraciones necesarias es de cuatro. Esto es debido a que el modelo estático 3 cuenta en su estructura con impedancias en paralelo que pueden ayudar al condicionamiento de Y_{bus} al ser sumadas como admitancias al elemento diagonal correspondiente en dicha matriz.

De estos resultados podemos afirmar que la diferencia principal entre los modelos estáticos del motor está en la variable que se fija para dar solución a su circuito de estado estacionario, ya que es esto lo que realmente impacta los resultados. La manera en la que se incluye el modelo del motor en el estudio de flujos de potencia también influye en el número de iteraciones.

3.4.2 Sistema de Prueba CIGRE 32-Nodos

El segundo sistema que se ha elegido para la aplicación de la metodología es el sistema de prueba CIGRE de 32 nodos, reportado en [CIGRE, 1995]. Este sistema es de interés para el trabajo por el hecho de que, en la mayoría de los nodos PQ , la carga está compuesta por motores de inducción y por su topología se tienen diferentes valores del voltaje terminal para un mismo tipo de motor equivalente, por lo que se pueden observar diferentes estados iniciales de los motores de inducción correspondientes a estos valores de voltaje.

El sistema mostrado en la Fig. 3.2 representa una parte del sistema Belga de 380 kV y 150 kV como se encontraba en los inicios de los años 80's. La parte externa del sistema es simulada por tres buses infinitos. Existen dos centrales eléctricas importantes, N1 y N10, que producen la mayor parte de la energía: N1 tiene una potencia nominal total de 2200 MVA y N10 de 5000 MVA. La carga global del sistema suma alrededor de 5000 MW y está localizada principalmente en el nivel de subtransmisión, alimentada por transformadores reductores de 150/70 kV.

Los parámetros de los motores de inducción y del sistema están dados en el apéndice B del presente trabajo. Además en el Apéndice B se muestran los resultados del estudio de flujos de potencia para la totalidad del sistema utilizando todos los modelos estáticos del motor de inducción.

A continuación se presentan solo los resultados para las variables principales (V , P , Q y s) de los motores de inducción obtenidos del estudio de flujos de potencia al representar este tipo de carga del sistema de prueba de la Fig. 3.2 por sus diferentes modelos estáticos.

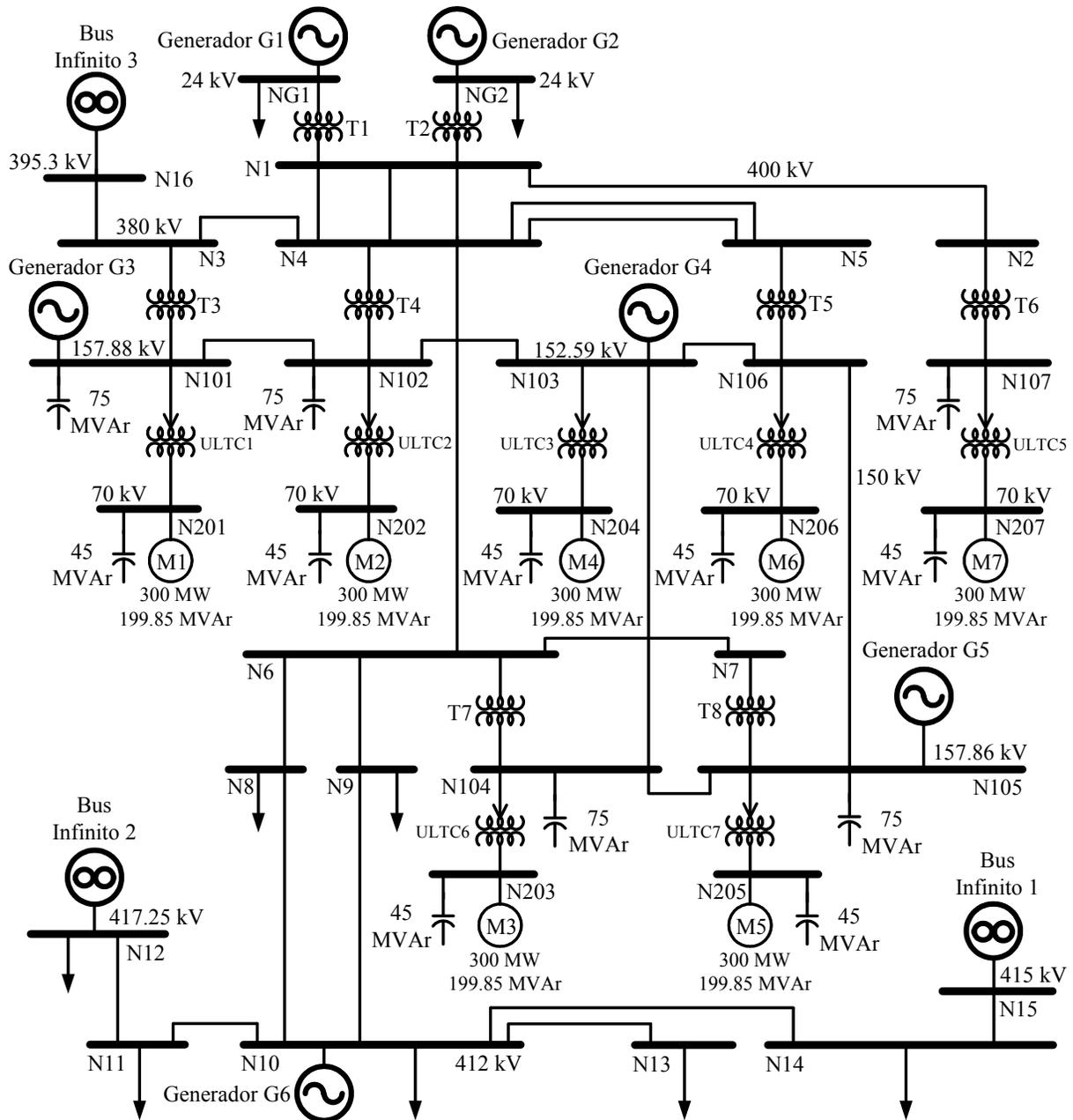


Fig. 3.2. Diagrama unifilar del sistema de prueba CIGRE 32-NODOS (Adaptado de [CIGRE, 1995]).

3.4.2.1 Resultados del estudio de flujos de potencia del Sistema CIGRE 32-Nodos con el programa FLUJOS

Al igual que con el sistema Taylor 10-Nodos con el objetivo de simplificar el análisis de los resultados obtenidos al representar al motor de inducción por sus diferentes modelos estáticos en el estudio de flujos de potencia. A continuación, solo se analizan los resultados obtenidos para cada motor del sistema CIGRE 32-Nodos al representar este tipo de cargas por sus diferentes modelos estáticos descritos hasta

ahora. Los resultados para la totalidad del sistema se muestran a detalle en el Apéndice B. Las simulaciones de esta sección se realizaron con el programa FLUJOS [Ruiz, 1996], para poder simular todos los modelos estáticos descritos en este Capítulo y el Capítulo 2.

Para obtener los resultados de las Tablas 3.4-3.10 se realizaron estudios de flujos de potencia del sistema de la Fig. 3.2 modelando la totalidad de carga de motores de inducción por el mismo tipo de modelo estático, es decir que en cada estudio de flujos de potencia se utilizó el mismo modelo estático para representar a los motores (M1-M7) del sistema de la Fig. 3.2. De esta manera, se realizaron siete estudios de flujos de potencia, uno por cada modelo estático del motor descrito en esta tesis. Sin embargo, para tener una mejor apreciación de las diferencias y similitudes entre resultados de cada modelo estático, los resultados se han organizado por motor, es decir que, para cada motor se presentan los resultados obtenidos por cada modelo estático.

En las Tablas 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran los resultados para las variables principales de los motores M1, M2, M3, M4, M5, M6 y M7 respectivamente. En la primera columna de izquierda a derecha se muestra el número de modelo estático que fue utilizado en el estudio de flujos de potencia para representar al motor de inducción.

TABLA 3.4. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M1 conectado al nodo N201 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.044029	3.000000	1.998538	0.011998000	3	<i>P, Q y s constantes</i>
2	1.041869	3.000000	2.082927	0.010978000	6	<i>P constante</i>
3	1.040984	3.000000	2.117441	0.010587686	4	
4-7	1.039345	3.240609	2.158860	0.011998000	3	<i>s constante</i>

TABLA 3.5. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M2 conectado al nodo N202 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.012019	3.000000	1.998538	0.011998000	3	<i>P, Q y s constantes</i>
2	1.011229	3.000000	2.020031	0.011710000	6	<i>P constante</i>
3	1.009995	3.000000	2.052540	0.011287051	4	
4-7	1.010258	3.061760	2.039713	0.011998000	3	<i>s constante</i>

TABLA 3.6. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M3 conectado al nodo N203 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.011950	3.000000	1.998538	0.011998000	3	<i>P, Q y s constantes</i>
2	1.011131	3.000000	2.019839	0.011713000	6	<i>P constante</i>
3	1.009833	3.000000	2.052293	0.011290889	4	
4-7	1.010031	3.060389	2.038800	0.011998000	3	<i>s constante</i>

TABLA 3.7. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M4 conectado al nodo N204 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.005068	3.000000	1.998538	0.011998000	3	<i>P, Q y s constantes</i>
2	1.004824	3.000000	2.007665	0.011873000	6	<i>P constante</i>
3	1.003945	3.000000	2.040657	0.011432145	4	
4-7	1.004517	3.027064	2.016598	0.011998000	3	<i>s constante</i>

TABLA 3.8. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M5 conectado al nodo N205 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.043885	3.000000	1.998538	0.011998000	3	<i>P, Q y s constantes</i>
2	1.041733	3.000000	2.082634	0.010981000	6	<i>P constante</i>
3	1.040848	3.000000	2.117114	0.010590619	4	
4-7	1.039217	3.239808	2.158327	0.011998000	3	<i>s constante</i>

TABLA 3.9. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M6 conectado al nodo N206 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.011187	3.000000	1.998538	0.011998000	3	<i>P, Q y s constantes</i>
2	1.010415	3.000000	2.018443	0.011731000	6	<i>P constante</i>
3	1.009072	3.000000	2.050701	0.011309003	4	
4-7	1.009350	3.056260	2.036049	0.011998000	3	<i>s constante</i>

TABLA 3.10. Resultados obtenidos por cada modelo estático del motor de inducción para las variables principales del motor M7 conectado al nodo N207 (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	0.989191	3.000000	1.998538	0.011998000	3	<i>P, Q y s constantes</i>
2	0.990935	3.000000	1.981825	0.012239000	6	<i>P constante</i>
3	0.987776	3.000000	2.009956	0.011834905	4	
4-7	0.992855	2.957184	1.970046	0.011998000	3	<i>s constante</i>

De cada modelo se han obtenido los resultados para el voltaje terminal (V), potencia activa (P), potencia reactiva (Q) y deslizamiento (s) del motor. La columna con el encabezado “No. de Iteraciones” muestra el número de iteraciones que fueron necesarias para la solución del sistema en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson al modelar la carga de motores de inducción por el modelo estático correspondiente a la columna con el encabezado “Modelo”.

Los modelo estáticos 2 y 3 con característica de potencia activa constante (P) ofrecen resultados muy similares, pero en número de iteraciones diferentes. Como se muestra en las tablas, se necesitan seis iteraciones para dar solución al sistema al utilizar el modelo estático 2, sin embargo, al utilizar el modelo estático 3 el número de iteraciones necesarias es de cuatro, esto es debido a que el modelo estático 3 cuenta en su estructura con impedancias en paralelo que pueden ayudar al condicionamiento

de Y_{bus} al ser sumadas como admitancias al elemento diagonal correspondiente en dicha matriz.

A partir de los resultados dados en las Tablas 3.4 – 3.10 se puede observar que el modelo estático 1 (el más utilizado en estudios estáticos) ofrece en este caso los resultados más diferentes a los de los modelos estáticos restantes.

3.4.3 Validación de las simulaciones de flujos de potencia del sistema Taylor 10-nodos con el programa PSS/E® versión 29

Para validar tanto la exactitud de los resultados obtenidos con los modelos como su flexibilidad de implementación en cualquier programa, se realizaron simulaciones de flujos de potencia con el programa comercial PSS/E® versión 29 de SIEMENS. Debido a sus características fundamentales, no se pudieron incluir todos los modelos estáticos descritos en este capítulo y el anterior, sino que solamente se consideraron todos los modelos que no modifican la matriz Jacobiana del sistema. De esta manera en estas simulaciones no se incluyeron a los modelos 3 y 4.

Los resultados de las simulaciones de flujos de potencia, para el sistema Taylor 10-Nodos se presentan en las Tablas 3.11 a 3.13 para cada uno de los tres motores del sistema. Los resultados detallados de estas simulaciones son idénticos a los provistos por el programa FLUJOS, presentados en el Apéndice A. Los archivos de entrada y el proceso para ejecutar el programa se presentan en el Apéndice D.

TABLA 3.11. Resultados del motor M1 obtenidos con el PSS/E® para los modelos estáticos del motor que no modifican el Jacobiano de Flujos de Potencia (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	P	Q	s	No. Iteraciones.	Característica del Modelo
1	1.0190	27.000	13.986	0.008811000	5	<i>P, Q</i> y <i>s</i> constantes
3	1.0117	27.000	14.121	0.008392242	5	<i>P</i> constante
5	1.0112	27.609	14.301	0.008811000	5	<i>s</i> constante
6	1.0112	27.607	14.301	0.008811000	5	
7	1.0112	27.605	14.302	0.008811000	5	

TABLA 3.12 Resultados del motor M2 obtenidos con el PSS/E® para los modelos estáticos del motor que no modifican el Jacobiano de Flujos de Potencia (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.0190	3.0000	1.9985	0.011998000	5	<i>P, Q</i> y <i>s</i> constantes
3	1.0117	3.0000	2.0558	0.011246153	5	<i>P</i> constante
5	1.0112	3.0674	2.0435	0.011998000	5	<i>s</i> constante
6	1.0112	3.0674	2.0435	0.011998000	5	
7	1.0112	3.0673	2.0434	0.011998000	5	

TABLA 3.13. Resultados del motor M3 obtenidos con el PSS/E® para los modelos estáticos del motor que no modifican el Jacobiano de Flujos de Potencia (en p.u. a 100 MVA).

Modelo	V (Mag.)	Pm	Qm	s	No. Iteraciones	Característica del Modelo
1	1.0106	15.000	11.779	0.040063000	5	<i>P, Q y s constantes</i>
3	1.0000	15.000	12.199	0.037529881	5	<i>P constante</i>
5	1.0020	15.060	11.826	0.040063000	5	<i>s constante</i>
6	1.0020	15.059	11.826	0.040063000	5	
7	1.0020	15.060	11.825	0.040063000	5	

Los resultados del PSS/E® confirman dos aspectos importantes de los modelos descritos en este trabajo, encontrados en 3.4.1:

- Los resultados de los modelos implementados en el programa FLUJOS son correctos y muy cercanos (idénticos para fines prácticos) a los obtenidos con el PSS/E®, por lo que se comprueba que su exactitud correcta.
- Los modelos con deslizamiento constante (modelos 5, 6 y 7) son equivalentes.

Es interesante observar que en todas las simulaciones el programa PSS/E® requirió más iteraciones para encontrar la solución que el programa FLUJOS:

3.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos de estos dos sistemas es claro que, del grupo de modelos con *s* constante (modelos 4-7) se puede utilizar cualquier modelo (ya que ofrecen exactamente los mismos resultados). Por su facilidad de emplear y simplicidad, el modelo estático 5, sería la opción mas adecuada.

Los modelos estáticos 2 y 3 son equivalentes, por lo que la elección de alguno de estos dos modelos, estará en función de la posibilidad de modificar o no el código fuente del programa de flujos de potencia. Mientras que el modelo estático 2 solamente puede ser empleado en programas donde sea posible modificar el código fuente, el modelo estático 3 puede ser aplicado en cualquier programa. Además, El modelo 3 converge en todos los casos en menos iteraciones que el modelo estático 2, mientras que provee prácticamente los mismos resultados.

Las observaciones derivadas de los resultados de los modelos que no modifican al Jacobiano del sistema, reportados en los primeros párrafos de esta sección con las simulaciones realizadas en el programa FLUJOS, fueron validadas con los resultados del programa PSS/E®, tanto en su precisión como en su tendencia. Las pequeñas diferencias numéricas observadas entre los resultados de ambos programas se debieron a que las salidas del programa PSS/E® están expresadas en valores reales (MW, Mvar, etc.) y su formato de impresión permitió conocer un máximo de 4 decimales de las variables obtenidas, además de que al expresarlas en p.u. se pudo incluir un pequeño error numérico.

Los resultados presentados en este capítulo muestran que los modelos estáticos del motor 2 a 7 presentados en este trabajo proveen una solución numérica correcta del sistema, Sin embargo, se observa que presentan diferencias en sus resultados relacionadas con la variable que se fija (P o s). Los modelos que emplean P constante tienen resultados muy similares entre sí, mientras que los modelos que mantienen s constante tienen resultados idénticos entre sí. Es necesario, por lo anterior, aclarar cuales son los modelos más adecuados a emplear en estudios estáticos, para representar al motor de inducción en sus diferentes regiones de operación y de esta manera hacer que reproduzcan lo más cercanamente posible el comportamiento real de las cargas. Este problema es tratado y solucionado en el capítulo 4.

CAPÍTULO 4:

INICIALIZACIÓN DE MODELOS DINÁMICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

La parte básica de la carga la conforman los motores de inducción, cuya influencia se refleja sustancialmente en los procesos transitorios de todo los nodos del sistema [Vénikov, 1988]. Los cambios lentos con respecto al estado estacionario de los motores de inducción se pueden analizar basándose en sus características estáticas.

Los modelos de cargas estáticas son adecuados solo para desviaciones pequeñas y/o lentas del voltaje y de la frecuencia. Cuando ocurren desviaciones grandes y/o rápidas del voltaje y de la frecuencia, es necesario utilizar modelos que consideren la dinámica de las cargas reales. Estos modelos son conocidos como modelos dinámicos. Un modelo dinámico expresa las potencias activa y reactiva de la carga en cualquier instante de tiempo como funciones de la magnitud del voltaje y de la frecuencia utilizando ecuaciones diferenciales [IEEE, 1993, Ruiz, 1996]. Sin embargo, en algunos casos al analizar los procesos dinámicos, se pueden emplear sus características estáticas [Vénikov, 1988].

En este capítulo se utilizan los modelos estáticos del motor de inducción en el estudio de flujos de potencia, para encontrar sus valores correctos de potencia activa y reactiva y deslizamiento, para el nuevo valor del voltaje terminal al final de este estudio, al tener en cuenta el comportamiento real del motor de inducción ante pequeñas y/o lentas variaciones del voltaje terminal alrededor de su valor nominal de voltaje. Estos resultados se utilizan como una solución al problema de inicialización de modelos dinámicos del motor y se analiza el efecto que tiene el emplear esta forma de inicialización en estudios de estabilidad de corto plazo. Además se comparan sus resultados con los obtenidos con la forma convencional de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción. A partir de los resultados de las simulaciones, se determina cual es la forma más adecuada de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción (en base al comportamiento real de este tipo de cargas en estado estacionario), ya que la elección

del método de inicialización puede modificar los resultados de la simulación dinámica en el dominio del tiempo y por lo tanto la evaluación de la estabilidad del sistema de potencia en general, por lo que se analiza la conveniencia de cada uno de ellos.

4.2 INICIALIZACIÓN DE MODELOS DINÁMICOS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Para resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas no lineales que forman el problema de estabilidad del sistema eléctrico de potencia a grandes disturbios en el corto plazo, es necesario realizar un estudio de flujos de potencia (estudio que utiliza modelos estáticos del sistema) para encontrar la condición inicial o el estado inicial del sistema. Durante este estudio de flujos de potencia, es común representar todas las cargas del sistema como cargas de potencia constante, es decir, cargas independientes del voltaje. Se ha demostrado en muchos estudios, como en [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002], que utilizar este tipo de representación de carga para el motor de inducción (que es la más común y la más básica de flujos de potencia), produce problemas en la inicialización de sus modelos dinámicos. Esto es debido a que los valores de las variables principales del motor (su deslizamiento s y sus consumos de potencia activa y reactiva P_m y Q_m) para un voltaje terminal, usualmente igual a 1.0 p.u., utilizadas para establecer las cargas de potencia constante a ser empleadas en el estudio de flujos de potencia, no coinciden con los valores iniciales de las variables de los modelos dinámicos del motor de inducción que son calculados después del estudio inicial de flujos de potencia de Newton-Raphson, debido a que éstos usualmente cambian para los nuevos valores de voltajes terminales. Para resolver este problema, lo usual es calcular al final del estudio de flujos de potencia las variables del motor, empleando su circuito equivalente mostrado en la Fig. 2.1 y el voltaje terminal del motor obtenido del estudio de flujos de potencia, y modelar la diferencia entre las potencias calculadas y las potencias que se emplearon en el estudio de flujos de potencia como una admitancia de ajuste [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002].

Una solución alternativa a este problema (propuesta inicialmente en [Ruiz, 1996]), consiste en modelar directamente el circuito de estado estacionario del motor de inducción en el estudio de flujos de potencia para que sus variables se ajusten durante el estudio y no se necesite adicionar admitancias ficticias para balancear las condiciones iniciales de los modelos dinámicos. Esto es debido a que, al modelar directamente el motor de inducción en el estudio de flujos de potencia, el valor obtenido de las potencias activa y reactiva y su deslizamiento ya estarán ajustados al valor final del voltaje terminal, por lo que no se necesita de ningún ajuste ficticio adicional, ya que los valores de sus variables coinciden para el nuevo voltaje terminal del motor. Lo anterior se realiza incluyendo en el estudio de flujos de potencia los modelos estáticos del motor de inducción deducidos de su circuito de estado

estacionario de la Fig. 1 o el Modelo Estático 7 deducido del modelo dinámico de tercer orden del motor de inducción (descritos en el Capítulo 2 y ampliados en el Capítulo 3).

4.3 MÉTODOS DE INICIALIZACIÓN DE LOS MODELOS DINÁMICOS

El problema de la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción surge del ajuste al que se ve sometido el voltaje terminal durante el estudio de flujos de potencia por lo que, como se explicó anteriormente, los valores de la potencia activa y reactiva y del deslizamiento que se tenían como datos para el estudio de flujos de potencia no coinciden para el nuevo voltaje terminal del motor de inducción (esto cuando la carga de motores de inducción es representada con una característica de potencia constante). Cuando se utiliza esta forma de representación de carga del motor, se tienen dos métodos de inicialización (explicados a detalle más adelante: Métodos 1 y 2), en los cuales una vez terminado el estudio de flujos de potencia se calculan las potencias activa y reactiva para el nuevo valor de voltaje en terminales (el obtenido de flujos de potencia) del motor de inducción y se modela la diferencia entre las potencias calculadas y las utilizadas como datos en el estudio de flujos de potencia como una admitancia de ajuste conectada al nodo terminal del motor.

Existe otro método (Método 3) propuesto originalmente en [Ruiz, 1996] y reafirmado en [Ruiz-Vega et al., 2002], en el cual se propone modelar directamente el motor de inducción en el estudio de flujos de potencia para obtener valores ajustados de la potencia activa y reactiva y del deslizamiento del motor para el nuevo valor del voltaje terminal.

Los métodos de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción se describen a continuación.

4.3.1 Método de Inicialización 1

Considerando la carga de motores de inducción con una característica de potencia constante (*Modelo estático 1*) en el estudio inicial de flujos de potencia, el voltaje terminal y el valor del deslizamiento del motor obtenidos después del estudio son usados para calcular la potencia activa y reactiva (P_{mc} y Q_{mc} respectivamente) correspondientes al nuevo valor del voltaje terminal del motor utilizando las ecuaciones (2.1) y (2.2) deducidas del circuito de estado estacionario de la Fig. 2.1. La diferencia entre estos valores (P_{mc} y Q_{mc}) y los valores utilizados como datos en el estudio de flujos de potencia (P_{mi} y Q_{mi}) es representada por una admitancia ficticia de ajuste (Y_{ajuste}) que es agregada a la admitancia nodal del elemento terminal en Y_{bus} [EPRI, 1987, IRHQ, 1995].

La diferencia de potencias queda descrita como sigue:

- a) La potencia del motor utilizada como dato (y mantenida constante) en el estudio de flujos de potencia es:

$$S_{mi} = P_{mi} + jQ_{mi} \quad (4.1)$$

- b) La potencia calculada del motor después del estudio de flujos de potencia, correspondiente al nuevo valor del voltaje terminal es:

$$S_{mc} = P_{mc} + jQ_{mc} \quad (4.2)$$

- c) La diferencia entre estas potencias queda descrita como:

$$S_{my} = S_{mi} - S_{mc} = (P_{mi} + jQ_{mi}) - (P_{mc} + jQ_{mc}) \quad (4.3)$$

$$S_{my} = (P_{mi} - P_{mc}) + j(Q_{mi} - jQ_{mc}) \quad (4.4)$$

$$S_{my} = P_{my} + jQ_{my} \quad (4.5)$$

Donde:

$$P_{my} = P_{mi} - P_{mc} \quad (4.6)$$

$$Q_{my} = Q_{mi} - Q_{mc} \quad (4.7)$$

S_{my} es la potencia correspondiente a la admitancia de ajuste, por lo que la admitancia de ajuste queda descrita por la siguiente ecuación:

$$Y_{ajuste} = \frac{S_{my}^*}{|V_{tm}|^2} \quad (4.8)$$

Donde:

V_{tm} : es el valor del voltaje terminal del motor de inducción obtenido del estudio de flujos de potencia

Después del cálculo anterior las potencias P_{mc} y Q_{mc} pasan a ser los nuevos valores de P_{mi} y Q_{mi} :

$$P_{mi} = P_{mc} \quad (4.9)$$

$$Q_{mi} = Q_{mc} \quad (4.10)$$

Lo anterior es debido a que los valores de P_{mc} y Q_{mc} son los valores verdaderos de potencia activa y reactiva del motor que en realidad corresponden al nuevo valor del voltaje terminal. Por lo que los datos iniciales del motor de inducción para estudios en el tiempo quedan descritos por la potencia activa P_{mc} , la potencia reactiva Q_{mc} , el deslizamiento (s) y el voltaje terminal V_{tm} . La admitancia de ajuste Y_{ajuste} cumple la función de representar la diferencia de potencias.

4.3.2 Método de Inicialización 2

Considerando la carga de motores de inducción con una característica de potencia constante (*Modelo estático 1*) en el estudio inicial de flujos de potencia, después de este estudio, el voltaje terminal obtenido y el valor de la potencia activa del motor (que ha sido mantenida constante durante este estudio) son empleados para calcular los valores de la potencia reactiva (Q_{mc}) y el deslizamiento del motor (s_{mc}) correspondientes al nuevo valor del voltaje terminal, utilizando las ecuaciones (2.4) y (2.2) deducidas del circuito de estado estacionario de la Fig. 2.1. La diferencia entre la potencia reactiva calculada (Q_{mc}) y la utilizada como dato (y mantenida constante) en el estudio de flujos de potencia (Q_{mi}), es representada por una admitancia ficticia que es añadida a la admitancia de carga nodal en Y_{bus} [EPRI, 1987, EPRI, 1994, IEEE, 1995, Ruiz, 1996, PSS/E 29, 2002].

La diferencia de potencia reactiva queda descrita como sigue:

$$Q_{my} = j(Q_{mi} - Q_{mc}) \quad (4.11)$$

Q_{my} es la potencia correspondiente a la admitancia de ajuste, por lo que la admitancia de ajuste queda descrita por la siguiente ecuación:

$$Y_{ajuste} = \frac{Q_{my}^*}{|V_{tm}|^2} \quad (4.12)$$

Donde:

V_{tm} : es el nuevo valor del voltaje terminal del motor de inducción obtenido del estudio de flujos de potencia

Después del cálculo anterior la potencia Q_{mc} pasa a ser el nuevo valor de Q_{mi} :

$$Q_{mi} = Q_{mc} \quad (4.13)$$

Lo anterior es debido a que el valor de Q_{mc} es el valor de potencia reactiva del motor que en realidad corresponde al nuevo valor del voltaje terminal. Por lo que, los datos iniciales del motor de inducción para estudios en el tiempo quedan descritos por la potencia activa P_{mi} , la potencia reactiva Q_{mc} , el nuevo valor del deslizamiento (s_{mc}) y el voltaje terminal V_{tm} . La admitancia de ajuste Y_{ajuste} cumple la función de representar la diferencia de potencia reactiva.

4.3.3 Método de Inicialización 3

Este método fue propuesto en [Ruiz, 1996] y ampliado en [Ruiz-Vega et al., 2002], en el cual se propone modelar directamente el motor de inducción en el estudio inicial de flujos de potencia de Newton-Raphson. En las dos referencias anteriores se utilizó únicamente el modelo estático 2 del motor de inducción descrito en el Capítulo 2, ya que, al utilizar este modelo los valores del deslizamiento y de potencia reactiva

del motor son automáticamente ajustados en el estudio de flujos de potencia. En estas referencias se aclara que este ajuste no es arbitrario, ya que, el modelo estático 2 tiene en cuenta el comportamiento real del motor como se describe en [Vénikov, 1988, Taylor, 1994, Ruiz, 1996] y como se describe en detalle en la sección 4.5 de este Capítulo.

Al utilizar este método de inicialización de motores de inducción no se necesita de ninguna admitancia de ajuste, ya que al modelar directamente el circuito de estado estacionario en el estudio de flujos de potencia, los valores de las variables principales del motor son automáticamente ajustados, por lo que los valores de P y Q del motor al final del estudio coinciden para el nuevo valor de voltaje terminal del motor.

Debido a que el método de inicialización 3 tiene sólidas bases y a que en esta tesis se han desarrollado diversos modelos estáticos del motor de inducción, se aplican todos estos modelos estáticos a la inicialización de modelos dinámicos del motor, con el fin de ver el efecto y las diferencias que existen en sus resultados. Además, al final de este capítulo se analiza el proceso de detención del motor de inducción, para elegir los modelos estáticos más adecuados para representar el comportamiento real del motor en cada una de sus regiones de funcionamiento.

A continuación se aplican a un sistema de prueba los tres métodos de inicialización mencionados anteriormente para mostrar las diferencias existentes en sus resultados para el estado inicial de operación del motor de inducción después del estudio de flujos de potencia y los errores que pueden llegar a tener dichos métodos.

4.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.4.1 Sistema de Prueba Taylor 10-Nodos

Este sistema ya ha sido descrito en el capítulo 2 de esta tesis. Está compuesto por 3 generadores síncronos y 10 nodos. Dos cargas de diferentes tipos son alimentadas desde un nodo de 500 kV en el área de carga. La carga industrial (compuesta por dos motores de inducción) es alimentada directamente por un transformador (T1). La carga residencial y comercial es alimentada por dos transformadores (T2 y T3) y una línea de subtransmisión (representada por una impedancia equivalente). Esta carga está compuesta por una carga estática de 1500 MW y un motor de inducción de 1500 MW; este motor equivalente es un agregado de motores altamente dominado por cargas de aire acondicionado. Los parámetros de los motores de inducción y del sistema mostrado en la Fig. 3.1 son presentados en el Apéndice A del presente trabajo. Además en el Apéndice A se muestra de manera detallada el estado inicial para la totalidad del sistema utilizando todos los modelos estáticos del motor de inducción en el estudio de flujos de potencia.

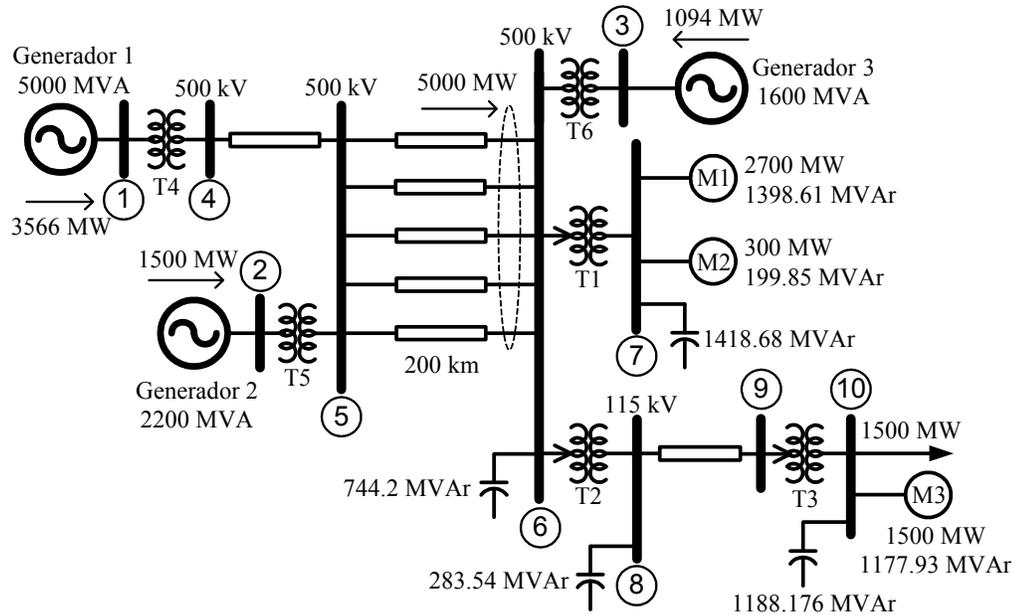


Fig. 3.1. Diagrama unifilar del sistema de prueba Taylor 10-Nodos (Adaptado de [Taylor, 1994]).

A continuación se presentan solo las condiciones iniciales de los motores de inducción del sistema de la Fig. 3.1 al emplear los tres diferentes métodos de inicialización para estudios dinámicos en el tiempo; con cada uno de los modelos seleccionados.

4.4.2 Inicialización de los motores de inducción del sistema Taylor 10-Nodos por los tres métodos utilizando el programa FLUJOS

Los resultados mostrados en las Tablas 4.1 - 4.3 se han obtenido al emplear los tres métodos de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción en los motores del sistema de la Fig. 3.1, empleando como datos iniciales los resultados de flujos de potencia obtenidos en el Capítulo 3 con el programa FLUJOS, mostrados en las Tablas 3.1 a 3.3.

Para los métodos de inicialización 1 y 2, el modelo estático que se utilizó en el estudio de flujos de potencia fue el modelo estático 1, por lo que la carga de motores fue representada con una característica de potencia constante en el estudio de flujos de potencia. Utilizando el voltaje en terminales obtenido del estudio de flujos de potencia para los motores de inducción y considerando los métodos 1 y 2 para inicialización de modelos dinámicos, se obtienen los nuevos valores para las variables principales del motor, en este nuevo estado de operación. La diferencia entre las potencias del motor utilizadas como datos en el estudio de flujos de potencia (mantenidas constantes en este estudio) y las obtenidas de los métodos de inicialización 1 y 2, se representa como una admitancia de ajuste, que es conectada en las terminales del motor, presentada en las Tablas 4.1 - 4.3 para cada motor.

En las Tablas 4.1 - 4.3 se puede comprobar, como se esperaba, que al utilizar los métodos de inicialización 1 y 2 las potencias que consume el motor y el deslizamiento no siempre coinciden con los valores empleados como datos en el estudio de flujos de potencia.

TABLA 4.1. Condiciones iniciales del motor M1 con el programa FLUJOS (en p.u. a 100 MVA).

Método de Inicialización	Modelo Estático	Voltaje (Mag.)	P_m	Q_m	s	Admitancia de Ajuste
Modelo estático de carga con característica de potencia constante (P y Q)						
1	1	1.019010	28.037324	14.523421	0.008811000	-0.998982+0.517376
2	1	1.019010	27.000000	14.103710	0.008455164	0.000000+j0.113178
Modelos estáticos del motor con potencia activa constante						
3	2	1.016454	27.000000	14.086720	0.008502000	-----
	3	1.011722	27.000000	14.120441	0.008391915	-----
Modelo estático del motor con deslizamiento constante						
3	4	1.011174	27.607802	14.300928	0.008811000	-----

TABLA 4.2. Condiciones iniciales del motor M2 con el programa FLUJOS (en p.u. a 100 MVA).

Método de Inicialización	Modelo Estático	Voltaje (Mag.)	P_m	Q_m	s	Admitancia de Ajuste
Modelo estático de carga con característica de potencia constante (P y Q)						
1	1	1.019010	3.115041	2.075208	0.011998000	-0.110788+j0.073836
2	1	1.019010	3.000000	2.035423	0.011517175	0.000000+j0.035521
Modelos estáticos del motor con potencia activa constante						
3	2	1.016454	3.000000	2.030322	0.011580000	-----
	3	1.011722	3.000000	2.056067	0.011246222	-----
Modelo estático del motor con deslizamiento constante						
3	4	1.011174	3.067320	2.043417	0.011998000	-----

TABLA 4.3. Condiciones iniciales del motor M3 con el programa FLUJOS (en p.u. a 100 MVA).

Método de Inicialización	Modelo Estático	Voltaje (Mag.)	P_m	Q_m	s	Admitancia de Ajuste
Modelo estático de carga con característica de potencia constante (P y Q)						
1	1	1.010603	15.319760	12.030462	0.040063000	-0.313085+j0.245872
2	1	1.010603	15.000000	11.977973	0.039166448	0.000000+j0.194479
Modelos estáticos del motor con potencia activa constante						
3	2	1.006829	15.000000	11.906863	0.039482000	-----
	3	1.000001	15.000000	12.199875	0.037531459	-----
Modelo estático del motor con deslizamiento constante						
3	4	1.001970	15.059149	11.825807	0.040063000	-----

Para el método de inicialización 3 se emplearon los modelos estáticos 2, 3 y 4 del motor de inducción. Para esto, se realizaron cuatro estudios de flujos de potencia, un estudio por modelo, y se obtuvieron los valores ajustados de las variables principales del motor (V , P , Q y s) al final del estudio. Al modelar directamente el motor de inducción en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson a través de sus

modelos estáticos, éstos permiten ajustar automáticamente las variables principales del motor cuando ocurren pequeñas variaciones en su voltaje terminal. Para el caso de los modelos estáticos del motor con característica de deslizamiento constante, las variables a ajustar son la potencia activa y reactiva del motor, para el caso de los modelos estáticos con características de potencia activa constante, las variables principales del motor a ajustar son el deslizamiento y la potencia reactiva del motor.

En el Capítulo 3 se mostró que los 4 modelos estáticos con deslizamiento constante ofrecen prácticamente los mismos resultados. Por tal razón, para simplificar el análisis de inicialización de modelos dinámicos del motor, solo se ha utilizado un modelo con deslizamiento constante (el modelo estático 4).

Como se observa en las Tablas 4.1 - 4.3, al modelar directamente el motor de inducción en el estudio de flujos de potencia, no se necesita de ninguna admitancia de ajuste para inicializar modelos dinámicos del motor, ya que los valores de potencia activa y reactiva del motor si corresponden para al nuevo valor del voltaje terminal.

Es importante notar que las admitancias de ajuste requeridas por los métodos 1 y 2 de inicialización, se pueden interpretar como el error de utilizar un modelo inadecuado para el motor de inducción en el estudio de flujos de potencia. Esto se debe a que estas admitancias no existen físicamente, y únicamente son requeridas para que las condiciones iniciales de los motores estén equilibradas para la simulación dinámica en el tiempo. Por lo tanto, se puede utilizar la magnitud de las admitancias como una medida objetiva del error causado por el modelado inadecuado.

En las Tablas 4.4 - 4.6 se presenta una evaluación del error del modelado al mostrar los valores de potencia correspondientes a las admitancias de ajuste en MW y Mvar y en términos del porcentaje que representan las mismas con respecto de la potencia nominal del motor.

TABLA 4.4. Admitancias de ajuste del motor M1 y su error con el programa FLUJOS.

Admitancia de ajuste				
Método de Inicialización	Modelo Estático	Admitancia en p.u. a 100 MVA	Valor en MW y Mvar	MW y Mvar en % de la potencia nominal del motor
1	1	-0.998982+0.517376j	-103.7324-j53.72339	P= 3.8419%, Q= 3.8411%
2	1	0.000000+j0.113178	0.000000-j11.752238	P= 0.0000%, Q=0.8402%

TABLA 4.5. Admitancias de ajuste del motor M2 y su error con el programa FLUJOS.

Admitancia de ajuste				
Método de Inicialización	Modelo Estático	Admitancia en p.u. a 100 MVA	Valor en MW y Mvar	MW y Mvar en % de la potencia nominal del motor
1	1	-0.110788+j0.073836j	-11.504121-j7.667008	P= 3.8347%, Q= 3.8363%
2	1	0.000000+j0.035521j	0.000000-j3.688510	P= 0.0000%, Q=1.8456%

TABLA 4.6. Admitancias de ajuste del motor M3 y su error con el programa FLUJOS.

Admitancia de ajuste				
Método de Inicialización	Modelo Estático	Admitancia en p.u. a 100 MVA	Valor en MW y Mvar	MW y Mvar en % de la potencia nominal del motor
1	1	-0.313085+j0.245872	-31.976013-j25.111435	P= 2.1317%, Q= 2.1318%
2	1	0.000000+j0.194479	0.000000-j19.862549	P= 0.0000%, Q=1.6862%

En la Tabla 4.4 se muestra de manera objetiva que el método de inicialización 1, el cual mantiene constante al deslizamiento, produce los mayores errores. En el caso del motor M1, el error de modelado puede llegar a incluir una admitancia ficticia de casi 4 % de la potencia nominal del motor para P y Q.

Se puede observar también que el error del método 2, que mantiene la potencia activa constante es mucho menor, llegando cuando mucho al 2% (Tabla 4.5, motor M2) de la potencia del motor (aprox. 4 Mvar solamente).

Con esto, se comprueban de manera objetiva los resultados reportados en [Ruiz, 1996, Ruiz-Vega et al., 2002], confirmando que, en caso de no poder modificar el programa de flujos de potencia o de no contar con modelos estáticos adecuados del motor de inducción, el método de inicialización 2 es una buena opción.

El estado inicial completo del sistema es mostrado en el apéndice A.

4.4.3 Validación de la inicialización de los motores del sistema Taylor 10-Nodos por los tres métodos, utilizando el programa PSS/E® versión 29

Las simulaciones realizadas en la sección anterior con el programa FLUJOS son validadas en esta sección con simulaciones del mismo proceso de inicialización en el programa PSS/E®. Los datos iniciales de flujos de potencia empleados en esta sección fueron tomados del capítulo 3, sección 3.4.3, Tablas 3.11 a 3.13.

Las condiciones iniciales calculadas para cada uno de los motores de inducción del sistema Taylor 10-Nodos con el programa PSS/E® se presentan en las Tablas 4.7 a 4.9.

TABLA 4.7. Condiciones iniciales del motor M1 con el programa PSS/E® (en p.u. a 100 MVA).

Método de Inicialización	Modelo Estático	Voltaje (Mag.)	P_m	Q_m	s	Admitancia de Ajuste
Modelo estático de carga con característica de potencia constante (P y Q)						
1	1	1.0190	28.036774	14.523136	0.008811000	-0.998471+j0.517293
2	1	1.0190	27.000	14.103643	0.008455345	0.000000+j0.113297
Modelo estático del motor con potencia activa constante						
3	3	1.0117	27.000	14.121	0.008392242	-----
Modelo estático del motor con deslizamiento constante						
3	5	1.0112	27.609	14.301	0.008811000	-----

TABLA 4.8. Condiciones iniciales del motor M2 con el programa PSS/E® (en p.u. a 100 MVA).

Método de Inicialización	Modelo Estático	Voltaje (Mag.)	P_m	Q_m	s	Admitancia de Ajuste
Modelo estático de carga con característica de potencia constante (P y Q)						
1	1	1.0190	3.114980	2.075167	0.011998000	-0.110732+j0.073834
2	1	1.0190	3.0000	2.035403	0.011517420	0.000000+j0.035539
Modelos estáticos del motor con potencia activa constante						
3	3	1.0117	3.0000	2.0558	0.011246153	-----
Modelo estático del motor con deslizamiento constante						
3	5	1.0112	3.0674	2.0435	0.011998000	-----

TABLA 4.9. Condiciones iniciales del motor M3 con el programa PSS/E® (en p.u. a 100 MVA).

Método de Inicialización	Modelo Estático	Voltaje (Mag.)	P_m	Q_m	s	Admitancia de Ajuste
Modelo estático de carga con característica de potencia constante (P y Q)						
1	1	1.0106	15.319669	12.030390	0.040063000	-0.312998+j0.246145
2	1	1.0106	15.000	11.977916	0.039166698	0.000000+j0.194765
Modelos estáticos del motor con potencia activa constante						
3	3	1.0000	15.000	12.199	0.037529881	-----
Modelo estático del motor con deslizamiento constante						
3	5	1.0020	15.060	11.826	0.040063000	-----

La evaluación del error del modelado correspondiente a las admitancias de ajuste en MW y Mvar y en términos del porcentaje que representan las mismas con respecto de la potencia nominal del motor, se presentan en las Tablas 4.10 a 4.12 utilizando los resultados del programa PSS/E®.

TABLA 4.10. Admitancias de ajuste del motor M1 y su error para el programa PSS/E®.

Admitancia de ajuste				
Método de Inicialización	Modelo Estático	Admitancia en p.u. a 100 MVA	Valor en MW y Mvar	MW y Mvar en % de la potencia nominal del motor
1	1	-0.998471+j0.517293	-103.6774-j53.71368	P= 3.8399%, Q= 3.8405%
2	1	0.000000+j0.113297	0.000000-j11.764320	P= 0.0000%, Q=0.8411%

TABLA 4.11. Admitancias de ajuste del motor M2 y su error para el programa PSS/E®.

Admitancia de ajuste				
Método de Inicialización	Modelo Estático	Admitancia en p.u. a 100 MVA	Valor en MW y Mvar	MW y Mvar en % de la potencia nominal del motor
1	1	-0.110732+j0.073834	-11.498008-j7.666735	P= 3.8326%, Q= 3.8362%
2	1	0.000000+j0.035539	0.000000-j3.690306	P= 0.0000%, Q=1.8465%

TABLA 4.12. Admitancias de ajuste del motor M3 y su error para el programa PSS/E®.

Admitancia de ajuste				
Método de Inicialización	Modelo Estático	Admitancia en p.u. a 100 MVA	Valor en MW y Mvar	MW y Mvar en % de la potencia nominal del motor
1	1	-0.312998+j0.246145	-31.966918-j25.139093	P= 2.1311%, Q= 2.1342%
2	1	0.000000+j0.194765	0.000000-j19.891679	P= 0.0000%, Q=1.6887%

Los resultados obtenidos con el programa PSS/E® validan los resultados obtenidos con el programa FLUJOS numéricamente, para los modelos que no modifican la matriz Jacobiana de flujos de potencia. Los resultados de ambos programas son iguales para fines prácticos; las diferencias encontradas (entre las Tablas 4.1 a 4.6 y las Tablas 4.7 a 4.12 respectivamente) se deben a las características del programa PSS/E® reportadas en §3.5.

A continuación se realizan estudios de estabilidad de corto plazo del sistema Taylor 10-Nodos y se utilizan los datos de las Tablas 4.1 – 4.3 para la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción. Los modelos dinámicos y sus parámetros empleados en las simulaciones se presentan en el apéndice C.

4.4.4 Estudios de estabilidad de corto plazo del sistema Taylor 10-Nodos

4.4.4.1 Descripción de la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia con motores de inducción

La propiedad de un sistema de potencia que le permite permanecer en un estado de operación en equilibrio bajo condiciones normales de operación y recuperar un estado aceptable de operación en equilibrio después de que ha ocurrido un disturbio, es conocida como estabilidad [Ruiz, 1996]. Esta importante propiedad se ha dividido para su estudio principalmente en estabilidad angular, estabilidad de voltaje y estabilidad de frecuencia (una descripción más detallada de los problemas de estabilidad se hace en el capítulo 5 de este trabajo).

La estabilidad angular está relacionada con la habilidad del sistema de potencia de permanecer en sincronismo, mientras que la estabilidad de voltaje se relaciona con la habilidad del sistema de potencia de mantener niveles de voltajes aceptables en todos los nodos del sistema, ambas bajo condiciones normales de operación y después de que el sistema ha sido sujeto a un disturbio [IEEE, 1982, IEEE, 1991].

Es de especial interés el estudio de la estabilidad de corto plazo, en la cual el período de análisis de la estabilidad es aproximadamente de 0 hasta 20 segundos [IEEE, 2004]. En este período de tiempo, la distinción entre las inestabilidades angulares y de voltaje no es siempre muy clara, por lo que pueden existir aspectos de ambos fenómenos [Kundur, 1994]. Esto se debe a que en el caso de los motores de inducción la inestabilidad no está relacionada con la pérdida de sincronismo. Si un motor de inducción después de que ocurre un disturbio no puede desarrollar el par necesario para mover la carga en su flecha, el motor se desacelera y se detiene. Esta condición es llamada inestabilidad, y puede ocurrir, debido a que, el voltaje en las terminales del motor sea muy bajo (una inestabilidad de voltaje) [Kimbark, 1956].

Por esta razón, en un sistema de potencia que contiene máquinas síncronas y motores de inducción la estabilidad del sistema, después de que ocurre una falla,

depende de que todas las máquinas síncronas permanezcan en sincronismo y de que todos los motores de inducción recobren su velocidad original [Taylor, 1994]. Este será el criterio para definir la estabilidad del sistema de la Fig. 3.1 en los estudios de estabilidad de corto plazo dados a continuación.

4.4.4.2 Análisis del efecto de los diferentes métodos de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción en estudios de estabilidad de corto plazo del sistema Taylor 10-nodos

A continuación se presenta el análisis de estabilidad de corto plazo del sistema Taylor 10-Nodos, utilizando los tres métodos de inicialización para el motor de inducción descritos anteriormente. En todos los casos se aplicó una falla trifásica sólida al nodo 5 del sistema de la Fig. 3.1 y se obtuvo el tiempo crítico de liberación por cada método de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción. Para las simulaciones del sistema se empleó el simulador digital TRANSTAB [Ruiz, 1996], en el cual se solucionan las ecuaciones del sistema en forma simultánea y el método de integración utilizado es la regla trapezoidal de integración, por lo que el método que emplea el programa para el análisis de estabilidad de corto plazo de sistemas de potencia es conocido como método implícito simultáneo.

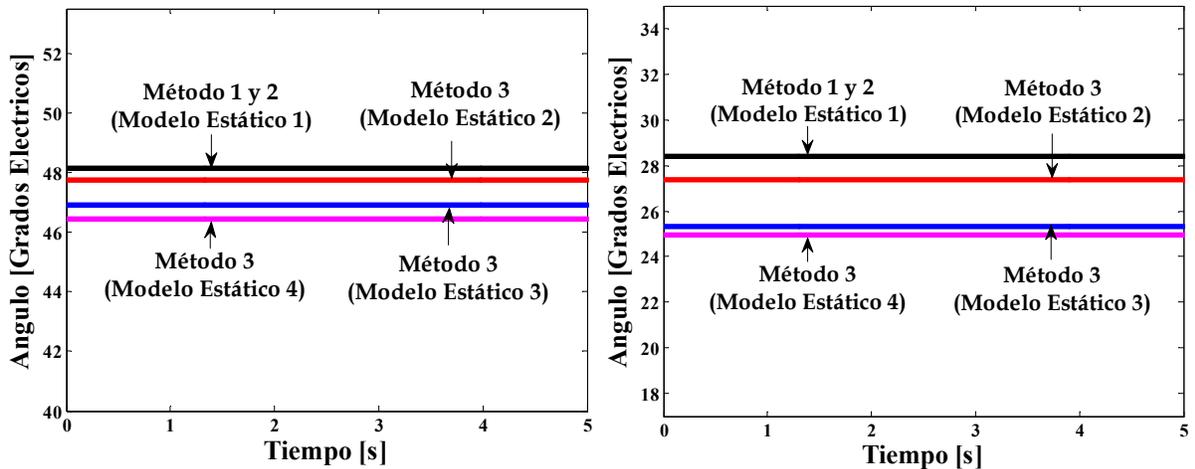
Para verificar el cálculo correcto de las condiciones iniciales, primero se realiza una simulación sin falla, por lo que, a continuación se muestran los resultados del programa al simular el sistema de la Fig. 3.1 sin falla, por los tres métodos de inicialización.

Estado inicial del sistema Taylor 10-Nodos (Sin falla)

En las Figs. 4.1 y 4.2 se muestra el comportamiento del ángulo de carga de los generadores G2 y G3 y de las velocidades de los motores M1 y M2 respectivamente, al utilizar los tres métodos de inicialización para los motores de inducción. Como muestran las figuras, el comportamiento del ángulo de carga de los generadores es constante al no haber falla, por lo que se puede considerar que el programa ofrece resultados aceptables, al calcular correctamente condiciones iniciales balanceadas.

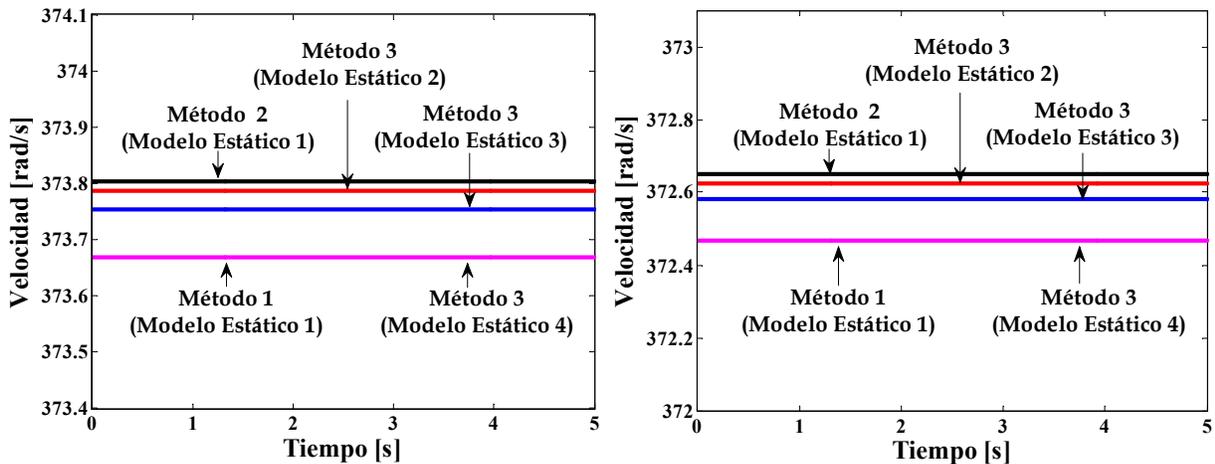
Como muestran las Figs 4.1 y 4.2, los tres métodos de inicialización ofrecen resultados muy similares del comportamiento del sistema pero con ciertas diferencias, por lo que es de esperar que al analizar el sistema bajo contingencia, se obtengan diferentes tiempos críticos de liberación de falla para cada método de inicialización.

En la siguiente sección se presentan los estudios de estabilidad de corto plazo del sistema de la Fig. 3.1 aplicando una falla trifásica al nodo 5 del sistema y liberando una línea entre los nodos 5 y 6 del sistema al liberar la falla. Para cada método de inicialización se obtienen los tiempos críticos de liberación y se comparan los resultados.



a) Comportamiento del ángulo de carga del G2 b) Comportamiento del ángulo de carga del G3

Fig. 4.1. Las figuras a y b muestran el resultado del comportamiento sin falla del ángulo de carga de los generadores G2 y G3 al emplear los tres métodos de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción al sistema de la Fig. 3.1 (el generador G1 tiene resultados similares).



a) Comportamiento de la velocidad del M1 b) Comportamiento de la velocidad del M2

Fig. 4.2. Las figuras a y b muestran el resultado del comportamiento sin falla de la velocidad de los motores M1 y M2 al emplear los tres métodos de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción al sistema de la Fig. 3.1 (el motor M3 tiene resultados similares).

Caso estable del Sistema Taylor 10-Nodos para todos los métodos de inicialización

Las Figs. 4.3 y 4.4 muestran el efecto en el ángulo del generador G2 y en la velocidad del motor M3 de los métodos de inicialización en el análisis de la estabilidad de corto plazo del sistema de la Fig. 3.1 al someterlo a una falla trifásica en el nodo 5 en el tiempo $t = 0$ s, liberando una línea entre los nodos 5 y 6 en el tiempo $t = 0.099$ s, para un tiempo de estudio de 5 s. Los resultados presentados en las Figs. 4.3 y 4.4 corresponden a los resultados de los generadores G2 y G3 y los motores en este caso en el que el sistema es estable para todos los métodos de inicialización. Puede notarse en esta figura que el método de inicialización 1 ofrece resultados un poco más alejados y menos estables que los resultados de los otros dos métodos.

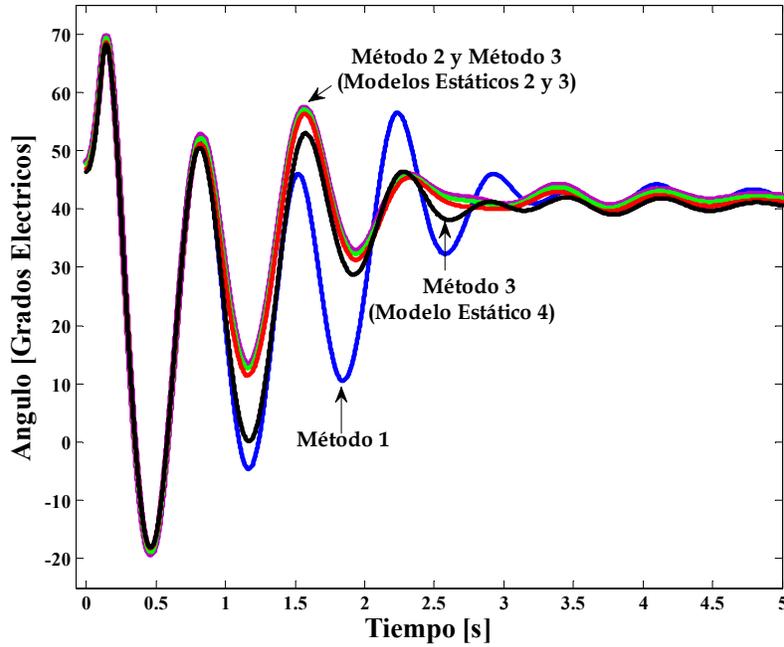


Fig. 4.3. Efecto de los métodos de inicialización en el ángulo de carga del generador G2 (caso estable para todos los métodos). La falla fue liberada en 0.099 s

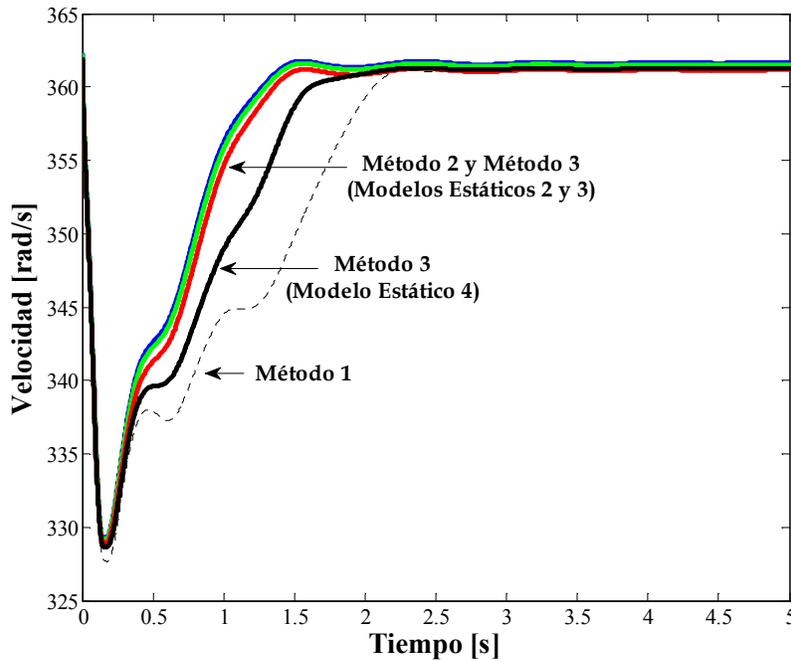


Fig. 4.4. Efecto de los métodos de inicialización en la velocidad del motor M3 (caso estable para todos los métodos). La falla fue liberada en 0.099 s

Los métodos 2 y 3 por su parte ofrecen prácticamente los mismos resultados, a excepción de cuando el método 3 utiliza el modelo estático 4 del motor de inducción. En este caso, al emplear el modelo estático 4, los resultados que se obtienen de emplear el método 3 en el estudio de estabilidad de corto plazo del sistema de la Fig. 3.1 son más parecidos a los del método 1.

Caso inestable del Sistema Taylor 10-Nodos para el método de inicialización 1

Las Figs. 4.5 - 4.6 muestran la comparación de resultados para la velocidad del motor M3 para el caso del sistema cuando la falla fue liberada en $t = 0.1$ s, en el cual el motor es inestable para las condiciones iniciales obtenidas por el método 1. Para los demás métodos el sistema es estable. En todas las simulaciones se consideró un tiempo de estudio de 5 s. Solo se presenta la velocidad del motor M3 debido a que la inestabilidad del sistema se debe a que los motores son incapaces de recuperar su velocidad original y tienden a detenerse. El motor M3 es el más representativo de los tres motores para este caso en el que el sistema es inestable.

Como se observa en la Fig. 4.5 para un tiempo de liberación $t = 0.1$ s, el sistema es inestable por el método de inicialización 1. El método de inicialización 3, que utiliza el modelo estático 4 del motor de inducción, también tiende a mostrar un comportamiento similar al método 1. Los métodos de inicialización 2 y 3 (con modelos estáticos 2 y 3 para el método 3) muestran un comportamiento muy similar y aún un poco lejano de la inestabilidad del sistema.

La Fig. 4.6 muestra un acercamiento de la Fig. 4.5, en la cual se aprecian aún mejor las diferencias entre los métodos y el efecto de considerar los diferentes modelos estáticos del motor de inducción para el método 3 de inicialización. Estas diferencias en los resultados, aunque aún no se haya determinado aún el modelo estático que representa de manera adecuada al motor en su región de operación estable, muestran que la elección del modelo afecta de manera importante a los resultados de la simulación en el tiempo.

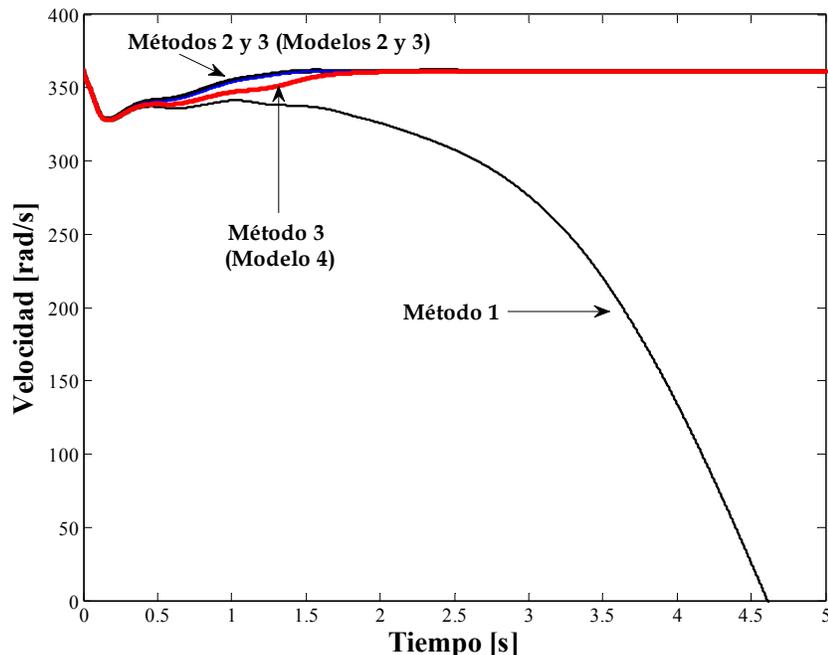


Fig. 4.5. Efecto de los métodos de inicialización en la velocidad del motor M3 (caso inestable para el método 1). La falla fue liberada en 0.100 s

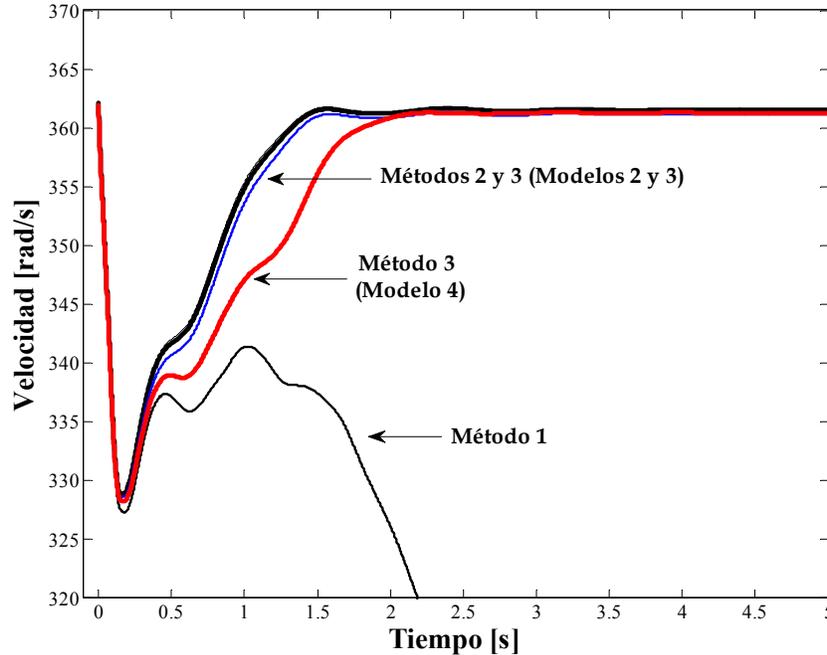


Fig. 4.6. Acercamiento de la Fig. 4.5 que muestra el efecto de los métodos de inicialización en la velocidad del motor M3 (caso inestable para el método 1). La falla fue liberada en 0.100 s

Caso inestable del Sistema Taylor 10-Nodos para todos los métodos de inicialización

Las Figs. 4.7 – 4.8 muestran la comparación de resultados para el ángulo de carga del generador G2 y la velocidad del motor M3 respectivamente, para el caso de simulación en el que el sistema es inestable para todos los métodos de inicialización del motor de inducción. Además, se muestra el tiempo para el cual el sistema se vuelve inestable al utilizar cada método. En todos los casos, la inestabilidad del sistema es definida por el comportamiento de los motores de inducción, ya que estos son incapaces de recuperar su velocidad original y tienden a detenerse, mientras que el efecto de la falla en el generador es muy pequeño (la desviación angular máxima es de apenas 75 grados eléctricos). De esta manera, estos casos corresponden a un problema de estabilidad de voltaje de corto plazo [IEEE,2004].

La Tabla 4.13 muestra los tiempos críticos de liberación obtenidos de emplear cada método de inicialización y el tiempo en que el sistema se vuelve inestable. En esta tabla se observa que los tiempos críticos obtenidos por los métodos de inicialización 2 y 3 son casi iguales (a excepción del método 3, cuando utiliza el modelo estático 4 de motores de inducción). Por lo que el método 2 es una buena opción de inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción al no contar con modelos estáticos adecuados de este tipo de cargas para su representación en el estudio de flujos de potencia, esto corrobora lo expuesto en [Ruiz-Vega et al., 2002].

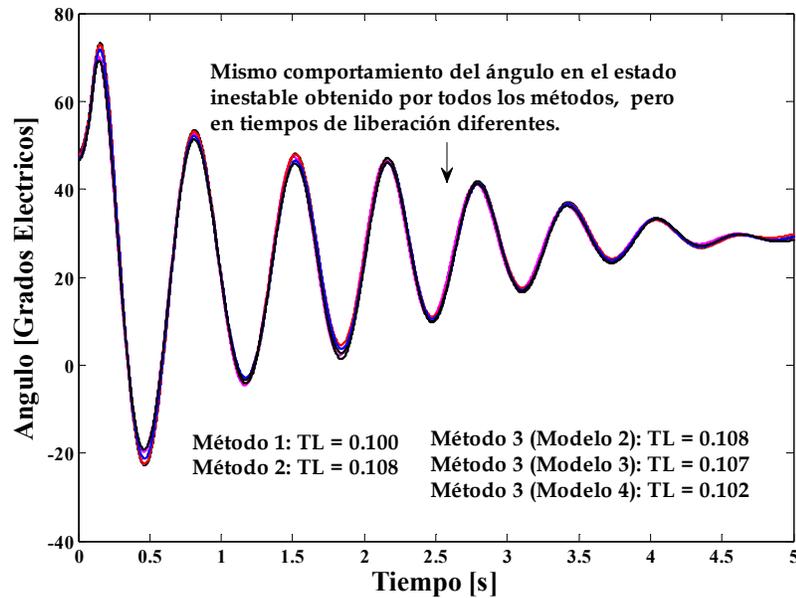


Fig. 4.7. Efecto de los métodos de inicialización en el ángulo de carga del generador G2 (caso inestable). Los generadores G1 y G3 tienen un comportamiento similar (TL= Tiempo de Liberación).

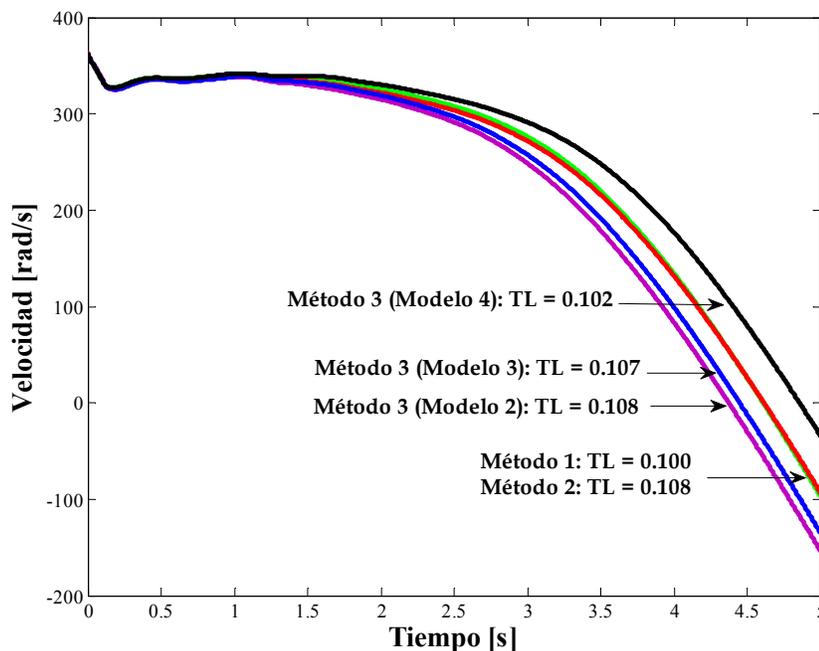


Fig. 4.8. Efecto de los métodos de inicialización en la velocidad del motor M3 (caso inestable), los motores M1 y M2 tienen un comportamiento similar.

TABLA 4.13. Tiempos críticos de liberación correspondientes a cada método de inicialización

Método de Inicialización	Modelo Estático	Tiempo crítico (Seg.)	Tiempo de inestabilidad (Seg.)	Consideración para la inestabilidad del sistema
1	1	0.099	0.100	En todos los casos los motores son incapaces de recuperar su velocidad original y tienden a detenerse
2	1	0.107	0.108	
3	2	0.107	0.108	
3	3	0.106	0.107	
3	4	0.101	0.102	

Como se observa en la Tabla 4.13 y en las Figs. 4.7 y 4.8, al utilizar los modelos estáticos 2 y 3 del motor de inducción en el estudio de flujos de potencia y usar sus resultados para la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción, se obtienen tiempos críticos y comportamientos del sistema casi idénticos. Por lo que una solución adecuada a la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción, al no poder modificar el código fuente del estudio de flujos de potencia, es el empleo del modelo estático 3. En el caso de que sea posible modificar dicho código, la opción mas adecuada será el modelo estático 2. Como conclusión los modelos estáticos 2 y 3 del motor para este sistema son prácticamente equivalentes.

En las Figs. 4.7 y 4.8 se muestra que el estado inestable del sistema obtenido por todos los métodos de inicialización de modelos dinámicos del motor es casi igual, pero la inestabilidad del sistema es lograda en diferentes tiempos de liberación para cada método. Como se observa, una inicialización inadecuada podría arrojar resultados inexactos del comportamiento del sistema, ya que, como se ha visto hasta este punto, el método de inicialización 1 arroja como resultado que el sistema solo puede soportar la falla en un tiempo máximo de 0.099 s, mientras que los métodos 2 y 3 ofrecen que el sistema soporta la falla en un tiempo máximo de 0.106-0.107s.

Todos los modelos estáticos del motor de inducción ofrecen resultados aceptables para su estado inicial (en lo se refiere a que las potencias se encuentren balanceadas) y que con este estado inicial se pueden obtener soluciones de estabilidad de corto plazo de los sistemas de potencia, esto no es suficiente para determinar los modelos estáticos que mejor representan el comportamiento verdadero del motor ante variaciones lentas de su voltaje terminal y por consecuencia los que ofrecen los resultados más reales, por lo que aún falta aclarar este punto. Por tal motivo, en la siguiente sección se describe el comportamiento del motor de inducción ante variaciones lentas de su voltaje terminal, con el fin de determinar los modelos estáticos del motor de inducción que son los más adecuados para su uso en la inicialización de modelos dinámicos del motor en el estudio de estabilidad.

4.5. COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCION ANTE VARIACIONES LENTAS DEL VOLTAJE EN TERMINALES

El comportamiento típico de los motores de inducción en estado estacionario cuando el voltaje en sus terminales tiene una variación lenta de aproximadamente el 15% es mostrado en la Fig. 4.9 [Taylor, 1994, Ruiz, 1996]. Esta figura fue reportada en una investigación del EPRI, en donde fueron probados muchos motores e industrias que utilizan motores [Taylor, 1994, Ruiz, 1996]. A partir de la Fig. 4.9, se puede decir que la potencia activa en estado estacionario consumida por el motor (línea continua) es casi independiente a variaciones lentas del voltaje terminal ($\pm 15\%$). Sin embargo, la potencia reactiva del motor (línea punteada) es más sensible a los niveles de voltaje y otros efectos.

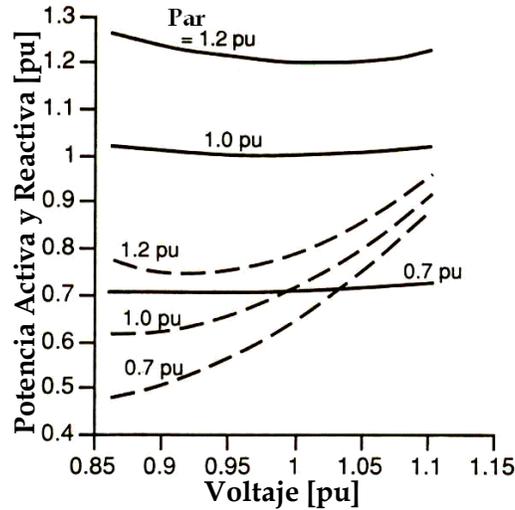


Fig. 4.9. Comportamiento típico de la potencia activa (línea continua) y reactiva (línea punteada) del motor de inducción ante variaciones lentas del voltaje terminal con carga mecánica constante (Adaptado de [Taylor, 1994, Ruiz, 1996]).

4.5.1 Regiones de funcionamiento del motor de inducción.

El motor de inducción tiene solamente una región de funcionamiento estable la cual que se halla entre la velocidad síncrona ($s = 0$) y la velocidad correspondiente al deslizamiento crítico ($s = s_{cr}$). La región que está entre el deslizamiento crítico y el deslizamiento igual a la unidad ($s = 100\%$) es inestable. En condiciones normales el motor funciona en la parte estable de la curva (sección $s = 0$ a $s = s_{cr}$ en la Fig. 4.10a) moviendo su carga mecánica con un deslizamiento menor que el crítico [Vénikov, 1988].

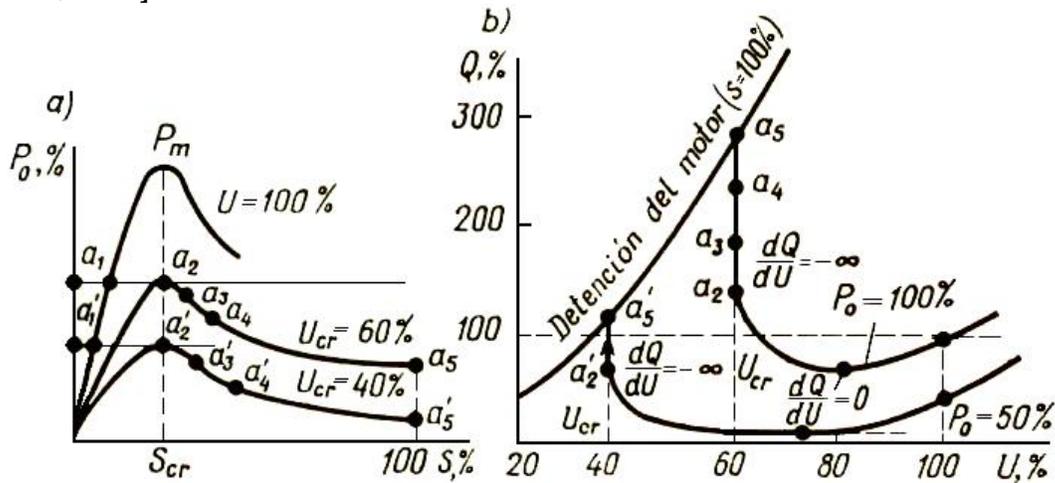


Fig. 4.10. Dependencia de las variables (P , Q y s) del motor de inducción con respecto a su voltaje en terminales (Adaptado de [Vénikov, 1988]).

4.5.2 Proceso de detención de los motores de inducción.

Las curvas tanto de la potencia activa como de la reactiva de la Fig. 4.10 tienen un comportamiento parecido al de las curvas de la Fig. 4.9, pero en la Fig. 4.10 se puede observar que después de que el voltaje disminuye hasta cierto valor (que aún es mayor que el voltaje crítico), la demanda de potencia reactiva del motor aumenta [Ruiz, 1996]. Durante la caída de tensión en terminales del motor o el aumento del momento mecánico de rotación, el motor puede llegar al régimen crítico (punto a_2). Si la disminución de la tensión continua, el punto que caracteriza el régimen pasará a la parte decreciente de la curva (Fig. 4.10a, sección $a_3 - a_4$); el motor se frenará, la corriente y potencia reactiva aumentarán bruscamente (Fig. 4.10b, $a_2 - a_5$) y luego el motor se detendrá (punto a_5).

Cuando la tensión en terminales del motor es constante e igual a la crítica, el proceso de detención transcurre como se muestra en la Fig. 4.10b. Generalmente, los motores conectados a unas barras cuya tensión no depende de sus regímenes funcionan con un margen de estabilidad grande, su deslizamiento de operación es mucho menor que el crítico [Vénikov, 1988]. En estas condiciones las variaciones de la tensión en las barras de un motor unitario (equivalente) no son peligrosas desde el punto de vista de la estabilidad de los motores, y la detención de éstos es causada solamente por caídas grandes de la tensión en sus barras (aproximadamente del 20 al 30 %). Cuando un grupo de motores es alimentado por un generador (o equivalente de generadores) cuya potencia es muy cercana a la potencia de demanda del grupo de motores, entonces, como consecuencia de la caída de tensión, la detención de los motores puede suceder ante pequeñas variaciones de la tensión en sus terminales (del 2% al 3% aproximadamente).

4.5.3 Simulación del proceso de detención y de las regiones de funcionamiento del motor de inducción

Como datos iniciales del motor de inducción se tienen el consumo de potencia activa y reactiva del motor y su deslizamiento para un voltaje terminal dado (usualmente igual a 1.0 p.u.).

4.5.3.1 Sistema de Prueba

El sistema de prueba mostrado en el Fig. 4.11 está compuesto por un motor de inducción alimentado por un bus infinito a través de una línea de transmisión; esto se hace con el fin de que el valor del voltaje terminal del motor de inducción no dependa de su régimen. La Tabla 4.14 muestra los parámetros principales del motor de inducción.

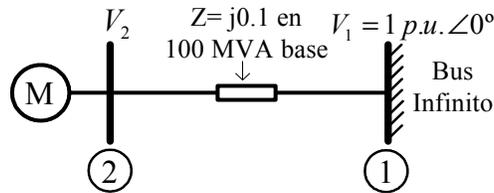


Fig. 4.11. Diagrama unifilar del sistema de prueba Motor - Bus Infinito.

TABLA 4.14. Parámetros del Motor de Inducción en p.u.* [Ruiz-Vega et al., 2002].

P (100%)	H	Rs	Xs	Xm	Rr	Xr	s_0
0.01265	0.0062	2.25	7.00	157.50	0.633	7.00	0.009233

*en una base de 100 MVA.

4.5.3.2 Metodología

Para simular el proceso de detención del motor de inducción se realizan estudios de flujos de potencia sucesivos variando el voltaje del bus infinito (básicamente disminuyéndolo). A continuación se describe este proceso.

4.5.3.2.1 Simulación del proceso de detención por modelos estáticos que modifican el Jacobiano del Estudio de Flujos de Potencia de Newton –Raphson

- La región estable del motor ($s = 0$ a $s = s_{cr}$ de las Figs. 4.10) es simulada por el Modelo Estático 2 de potencia activa constante. Se realizan estudios sucesivos del estudio de flujos de potencia disminuyendo el voltaje del bus infinito en cada estudio, por lo que se obtienen distintos puntos de operación del sistema (estos puntos de operación son los que se grafican para obtener la región estable de la curva VQ del motor mostrada en la Fig. 4.12). Esto se hace hasta que se encuentra el deslizamiento crítico, lo cual ocurre cuando las raíces de la ecuación (4) son iguales (lo anterior no siempre sucede en sistemas de mayores dimensiones, ya que el bajo voltaje en algún nodo de generación puede provocar problemas en alguna otra parte del sistema y no necesariamente en el nodo terminal del motor, lo cual podría causar que el sistema no tuviera solución, dando lugar a no poder llegar al voltaje y deslizamiento crítico del motor).
- El voltaje en terminales del motor correspondiente al deslizamiento crítico del rotor es su voltaje crítico.
- Una vez encontrado el deslizamiento y voltaje crítico del motor, el Modelo Estático 2 ya no es adecuado para simular el comportamiento del motor para los siguientes valores de voltaje que son menores que el crítico, por lo que este es cambiado por el Modelo Estático 4 de deslizamiento constante para simular la región de paro de la curva VQ , esto se hace manteniendo el deslizamiento constante e igual a 1 ($s = 100\%$).

- d) El último punto obtenido con el Modelo Estático 2 y el primer punto obtenido con el Modelo Estático 4 describen la región inestable del motor de inducción ($s = s_{cr}$ a $s = 100\%$) y delimitan la región estable y de paro de la curva VQ del motor.

4.5.3.2.2 Simulación del proceso de detención por modelos estáticos que modifican el archivo de entrada del Estudio de Flujos de Potencia de Newton –Raphson

- a) De manera similar a los modelos que modifican el Jacobiano del estudio de Flujos de Potencia de Newton – Raphson, la región estable del motor ($s = 0$ a $s = s_{cr}$) es simulada por el Modelo Estático 3. Se realizan estudios sucesivos del estudio de flujos de potencia disminuyendo el voltaje del bus infinito en cada estudio, por lo que se obtienen distintos puntos de operación del sistema (estos puntos de operación son los que se grafican para obtener la región estable de la curva VQ del motor mostrada en la Fig. 4.13). Esto se hace hasta que el estudio de flujos de potencia no encuentre solución, lo cual puede suceder por el bajo voltaje en el nodo terminal del motor (lo que causa un gran incremento de la potencia reactiva de consumo del motor) o por otros problemas en alguna parte del sistema (esto en sistemas de mayores dimensiones) generados por la caída del voltaje en algún nodo de generación. Para comprobar que el estudio de flujos de potencia no ha convergido por haber llegado el voltaje crítico en el nodo terminal del motor se hace lo siguiente:
 - i. Debido a que el modelo estático 3 es muy similar al modelo estático 2 (mantienen constante la potencia activa de consumo del motor) se toma la ecuación (2.04).
 - ii. Si el discriminante de la ecuación (2.04) es igual a cero o menor que cero para el último nivel de voltaje obtenido, entonces se ha llegado al voltaje crítico del motor, debido a que solo se tiene una solución para la ecuación cuadrática (2.04) y por lo tanto existe un solo valor para el deslizamiento, el cual es crítico.
 - iii. Si este discriminante no es cero o menor que cero, entonces la causa de que el estudio de flujos de potencia no haya convergido es por alguna otra causa, como que el sistema no tenga solución para el bajo nivel general de voltaje en los nodos del sistema.
- b) Una vez encontrado el deslizamiento y voltaje crítico del motor, el Modelo Estático 3 ya no es adecuado para simular el comportamiento del motor para los siguientes valores de voltaje que son menores que el crítico, por lo que éste es cambiado por el Modelo Estático 5 de deslizamiento constante para simular la región de paro de la curva VQ del motor. Esto se hace manteniendo el deslizamiento constante e igual a 1 ($s = 100\%$).

- c) El último punto obtenido con el Modelo Estático 3 y el primer punto obtenido con el Modelo Estático 5 describen la región inestable del motor de inducción y delimitan la región estable y de paro de la curva VQ del motor.

Las curvas VQ de las Figs. 4.12 - 4.14, muestran las regiones de funcionamiento del motor del sistema mostrado en la Fig. 4.11. Estas curvas han sido obtenidas a través de la simulación del motor por sus modelos estáticos 2-4 y 3-5 aplicando la metodología descrita anteriormente. La Fig. 4.12, fue obtenida por los modelos estáticos 2 y 4 que modifican el Jacobiano del Estudio de Flujos de Potencia de Newton-Raphson; la región estable de la curva VQ del motor es simulada por el Modelo Estático 2 hasta encontrar el inicio de la región inestable, punto a_2 . En este punto tenemos el voltaje y deslizamiento críticos, además de la potencia reactiva correspondiente a este punto (como se muestra en la Fig. 4.12). Una vez que se ha llegado al punto a_2 el modelo 2 es cambiado por el modelo estático 4 y éste es utilizado para simular la región de paro de la curva VQ del motor. El primer punto obtenido con el modelo estático 4, punto a_5 , es el punto final de la región inestable y es el punto de detención del motor (por tal razón este punto es obtenido haciendo $s=100\%$); en este punto tenemos la potencia reactiva máxima de consumo del motor. La región inestable (a_2-a_5) delimita la región estable y de paro de la curva VQ del motor. Debido a que después del punto a_5 el motor ya se encuentra detenido (para los siguientes valores de voltaje menores que el crítico), la región de paro del motor es simulada con el Modelo estático 4 haciendo el deslizamiento constante e igual a la unidad ($s=100\%$).

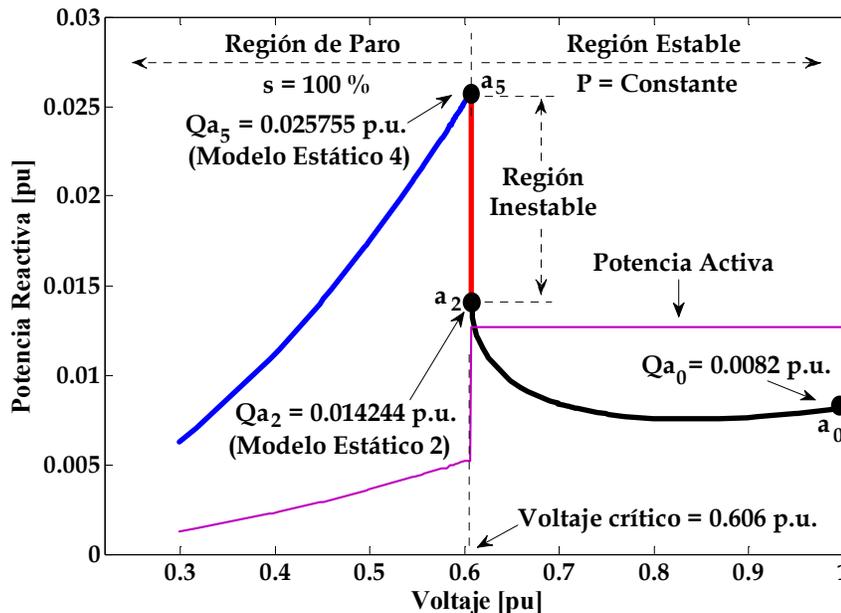


Fig. 4.12. Curva VQ del motor de inducción donde se muestra la región estable e inestable y la región de paro del motor obtenida con los modelos estáticos 2 y 4 que modifican el Jacobiano del Estudio de Flujos de Potencia de Newton - Raphson.

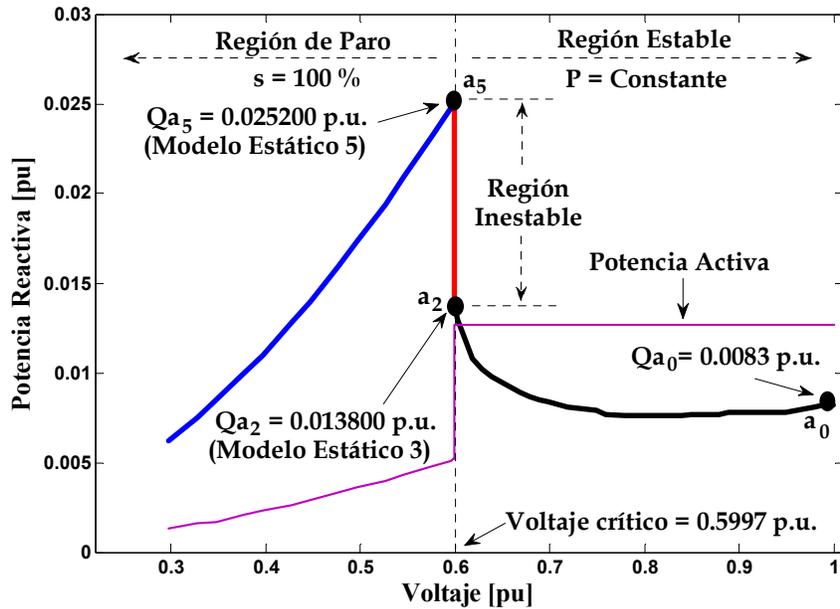


Fig. 4.13. Curva VQ del motor de inducción donde se muestra la región estable e inestable y la región de paro del motor obtenida con los modelos estáticos 3 y 5 que modifican el archivo de entrada de datos del estudio de Flujos de Potencia de Newton - Raphson.

De manera similar a la Fig. 4.12, la Fig. 4.13 fue obtenida por los modelos estáticos 3 y 5 que modifican el archivo de entrada de datos del Estudio de Flujos de Potencia.

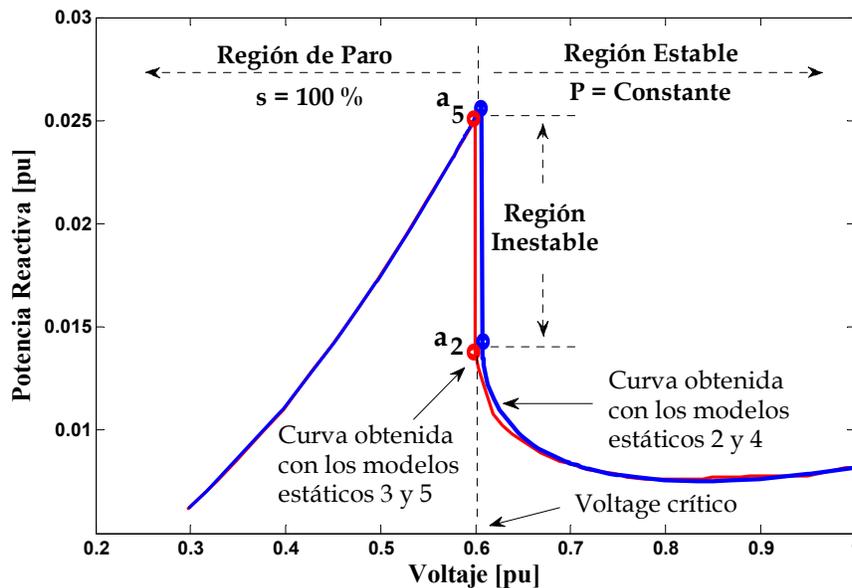


Fig. 4.14. Comparación de las curvas VQ del motor de inducción donde se muestra la región estable e inestable obtenidas por los dos tipos de modelo (los que modifican el Jacobiano y los que solo modifican el archivo de entrada de datos del estudio de flujos de potencia de Newton - Raphson).

La región estable de la curva VQ del motor es simulada por el Modelo Estático 3 y una vez que se ha llegado al punto a_2 (punto inicial de la región inestable) el modelo 3 es cambiado por el modelo estático 5 y es encontrado el punto a_5 (punto final de la región inestable). La región de paro del motor es simulada con el Modelo estático 5 haciendo el deslizamiento constante e igual a la unidad ($s=100\%$).

En la Fig. 4.14 se muestra la comparación de los dos grupos de modelos y se observa que la variación en los resultados es mínima. En la Tabla 4.15 se muestran los valores de las variables principales del motor para el voltaje crítico y la máxima potencia reactiva de consumo del motor en el paro (Q_{a5}) para los dos grupos de modelos.

TABLA 4.15. Variables principales del motor de inducción en el paro, obtenidas por sus diferentes modelos estáticos (a 100 MVA base).

V_{cr}	s_{cr}	Q_{a2}	Q_{a5}	P_{a5}
Modelos que modifican el Jacobiano				
Modelo Estático 2			Modelo Estático 4	
0.606729	0.05456	0.014244	0.025755	0.005217
Modelos que modifican el archivo de entrada de datos				
Modelo Estático 3			Modelo Estático 5	
0.599700	0.04473	0.013800	0.025200	0.005200

4.5.3.3 Discusión de Resultados

Como se observa en la Fig. 4.14 y en la Tabla 4.15, la diferencia de resultados entre los dos grupos de modelos es mínima (entre los modelos 2 y 4 y entre los modelos 3 y 5), por lo que estos modelos, además de ser similares en cuanto a deducción, son equivalentes en cuanto a resultados. También se puede observar que las curvas VQ obtenidas (Figs. 4.12–4.14) son muy similares a la curva VQ de la Fig. 4.10b, pues para el 100% de la potencia activa del motor, éste se detiene cuando su voltaje terminal es de aproximadamente el 60% de su voltaje nominal y la potencia reactiva del motor en el punto de detención (a_5) se incrementa alrededor del 300% de la inicial (la que corresponde al 100% del voltaje). Por los resultados obtenidos se puede deducir que estos modelos representan adecuadamente el comportamiento del motor a variaciones lentas de su voltaje terminal.

4.6 CONCLUSIONES DE ESTE CAPÍTULO

El efecto de las variaciones lentas de voltaje en el consumo de potencia activa y reactiva del motor ya han sido estudiadas en [Vénikov, 1988, Taylor, 1994, Ruiz, 1996] y fueron detalladas en este capítulo. En [Taylor, 1994, Ruiz-Vega et al., 2002] es descrito este efecto como: “La potencia activa en estado estacionario consumida por el motor es moderadamente independiente del voltaje hasta el punto de detención. La potencia reactiva del motor es más sensible a los niveles de voltaje y otros efectos.

Con las caídas de voltaje, la potencia reactiva primero decrecerá, pero luego incrementará conforme el voltaje descienda cada vez más". Este comportamiento del motor es observado cuando su carga mecánica tampoco es constante o depende de la velocidad angular del rotor [Taylor, 1994].

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la forma correcta para solucionar el modelo de estado estacionario del motor de inducción y poder tener valores adecuados para la inicialización de sus modelos dinámicos es considerar que su potencia activa es constante (esto cuando el motor opera en su región estable). Por lo que los resultados más exactos para la inicialización son los obtenidos de emplear los modelos estáticos 2 y 3 del motor de inducción (ya que el análisis del sistema se realiza con los motores operando en su región estable y no en la de paro), por consiguiente los resultados más reales de la simulación dinámica en el dominio del tiempo del sistema de la Fig. 3.1 son los obtenidos de utilizar estos modelos en la inicialización de los modelos dinámicos del motor.

Los resultados de inicialización de los modelos dinámicos utilizando el programa FLUJOS fueron validados con simulaciones estáticas en el programa PSS/E® para los modelos que no modifican a la matriz Jacobiana de flujos de potencia (modelos 3 y 5). Los resultados numéricos obtenidos por ambos programas son, para fines prácticos, iguales.

Este resultado es muy importante debido a que en este capítulo se ha probado que los modelos 3 y 5, propuestos en este trabajo son necesarios para representar al motor en todas sus regiones de operación (el modelo 3 para la región de operación estable y el modelo 5 para la región de paro del motor), y además que ambos modelos pueden ser incluidos fácilmente en cualquier programa de simulación estática, incluyendo programas comerciales de simulación, proporcionando resultados numéricos iguales a los de los modelos que modifican la matriz Jacobiana del sistema (los cuales son numéricamente correctos para ambas regiones pero muy difíciles de emplear en programas comerciales). De esta manera, se logra ampliar la aplicación de los modelos estáticos del motor a cualquier sistema de potencia que se pueda simular en programas comerciales.

Como una extensión congruente del análisis de los modelos estáticos del motor de inducción a variaciones lentas de su voltaje terminal, es la recomendación de estos modelos estáticos (Modelo estático 2 y 3) para su uso en el estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo. Este importante aspecto es desarrollado en detalle en el siguiente capítulo de este trabajo.

CAPÍTULO 5:

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE LARGO PLAZO INCLUYENDO MOTORES DE INDUCCIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP's) están compuestos principalmente por los subsistemas de generación, transmisión, subtransmisión, distribución y elementos como transformadores, dispositivos de compensación (capacitores, compensadores síncronos) y dispositivos en los cuales la energía eléctrica se emplea con objetivos industriales o domésticos, estos dispositivos comúnmente se denominan receptores de la energía eléctrica, los cuales conforman el subsistema de carga (consumidores). Los nodos donde se conectan los diferentes subsistemas de carga a las redes de alto voltaje de los sistemas eléctricos de potencia se llaman nodos de carga. Durante el funcionamiento normal del subsistema de carga y durante los diferentes arranques y detenciones de los equipos (como los motores de inducción), tienen lugar los *procesos transitorios normales*. Las desconexiones de ciertos elementos del SEP (salida de generadores, líneas de transmisión) y/o cortocircuitos causan los *procesos transitorios graves* [Vénikov, 1988].

En los sistemas de potencia de hoy en día, los motores de inducción consumen una gran cantidad de la energía generada, éstos constituyen aproximadamente el 60% de la carga total del sistema [Taylor, 1994] y más del 85% de las máquinas eléctricas de CA [Ruiz, 1996]. El efecto de motores de inducción en la estabilidad de voltaje es significativo, ya que son cargas con bajo factor de potencia, tienden a restaurar su consumo de potencia después de un disturbio y finalmente son propensos a detenerse [Vournas and Manos, 1998]. El arranque de los motores, las oscilaciones bruscas del par en sus ejes, etc., causan las variaciones de la magnitud y ángulo del voltaje en los nodos de carga. Estas variaciones en las magnitudes del voltaje no deben sobrepasar los límites permisibles. La influencia de las grandes perturbaciones del funcionamiento de los motores en el sistema de subtransmisión comúnmente se refleja en formas de oscilaciones de la tensión de manera notoria [Vénikov, 1988].

En estos últimos años se han vuelto más frecuentes los incidentes causados por inestabilidad de voltaje con énfasis en los efectos del motor de inducción, los incidentes pueden ser causados por fallas en las líneas de transmisión y/o disparo de generadores acompañado de un escaso suministro de potencia reactiva [Liu et al., 1997]. En el transcurso de los últimos 25 años, varios investigadores se han dado a la tarea de desarrollar métodos o técnicas para entender el problema de las inestabilidades de voltaje, debido a que se han convertido en una limitante principal de las transferencias de potencia en SEP's de muchos países. La habilidad de los SEP's para transferir la potencia de forma segura está limitada por sus características físicas y eléctricas, tales como: límites térmicos de las máquinas o algunos elementos de la red, *rangos de variación de voltaje (mínimos y máximos)*, y los límites de estabilidad, es decir, el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) debe ser capaz de soportar los pequeños y los grandes disturbios sin tener cambios drásticos de voltaje o bien sufrir la pérdida de sincronismo [López, 2006].

En la actualidad los centros de control plantean la necesidad de realizar análisis de estabilidad de voltaje de los SEP's de interés con respecto a márgenes de cargabilidad. Dichos estudios determinan la seguridad del SEP (habilidad para sobrevivir disturbios inminentes sin interrumpir el servicio eléctrico a los consumidores) cuando ocurren incrementos de carga con diversos escenarios en estado estacionario y ante diferentes contingencias; lo anterior tiene la finalidad de verificar que el SEP opere siempre dentro de sus límites seguros de transferencia de potencia. Para determinar los límites de operación del SEP ante problemas de estabilidad de voltaje de largo plazo se han propuesto varios índices de estabilidad de voltaje relacionados con el estudio de flujos de potencia. Uno de los índices más comúnmente aceptados es el límite de transferencia de potencia (cargabilidad de las líneas de enlace entre áreas o de un área de control específica) que se obtiene del método de las curvas *PV* [López, 2006].

Sin embargo los modelos utilizados en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo con modelos estáticos del sistema de potencia como los métodos de las curvas *PV* ó *VQ* emplean modelos tan similares a los del estudio de flujos de potencia que muchas veces son incorrectamente conducidos utilizando el modelo convencional más básico de este estudio. Se ha demostrado en muchos estudios, como en [López-Luis et al., 2007], que utilizar el modelo convencional de flujos de potencia en el estudio de estabilidad de voltaje provee resultados que no son nada exactos ni confiables. Esto se debe en parte a que en el estudio de flujos de potencia, es común representar todas las cargas del sistema como cargas de potencia constante. Diversos estudios muestran que el límite máximo de cargabilidad y el límite de estabilidad de voltaje son mejor estimados cuando se incorpora el modelo de carga del motor de inducción [Liu et al., 1997]. Por lo tanto, los modelos de este tipo de motores en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo deben representar adecuadamente su dinámica asociada, ya que, mientras se utiliza el modelo de carga más apropiado, se obtienen resultados más precisos del análisis de estabilidad de voltaje.

En el capítulo anterior (capítulo 4) se determinó que los modelos estáticos del motor de inducción que representan adecuadamente el comportamiento del motor ante variaciones pequeñas y/o lentas de su voltaje terminal son los modelos estáticos 2 y 3 del motor de inducción, por lo que en este capítulo se utilizan exclusivamente estos modelos en el estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo, con la finalidad de observar el efecto de considerar modelos estáticos adecuados del motor de inducción en este estudio y por ende obtener resultados más precisos del análisis de estabilidad de voltaje de largo plazo.

5.1.1 Comportamiento típico de la carga con respecto al tiempo en los SEP's

La mayor parte de los disturbios que ocurren en el SEP se deben a cambios por variaciones normales de la carga y/o acciones programadas por los ingenieros encargados de la operación del SEP para realizar el mantenimiento de elementos de la red de transmisión y plantas generadoras. En la Fig. 5.1 se muestra un ejemplo de la variación normal de la carga con respecto al tiempo, la curva de demanda horaria del área de control central del Sistema Eléctrico Mexicano para dos días diferentes de 1995 [López, 2006]. En la Fig. 5.1 se puede observar claramente que la variación de la carga no solamente es horaria sino que también varía estacionalmente y además depende del calendario de días laborales (el primero de enero es feriado, mientras que el primero de junio es laboral).

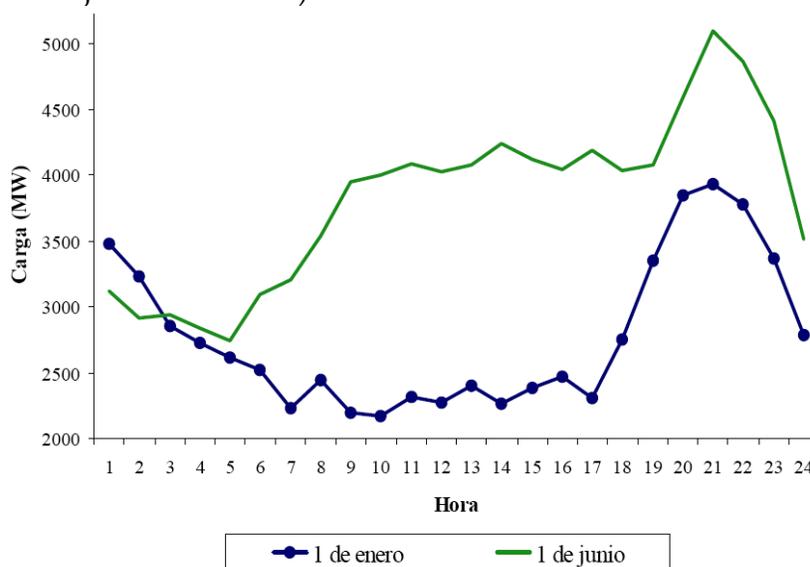


Fig. 5.1. Curvas de demanda horaria del área de control central del Sistema Eléctrico Mexicano para dos días diferentes de 1995 (adaptado de [Ruiz-Vega, 2002, López, 2006]).

Aunque siempre estén ocurriendo cambios en el SEP, es conveniente considerar que en ciertos períodos de tiempo éste funciona en estado estacionario, es decir, que para propósitos de análisis tanto los parámetros como las variables son considerados constantes [IEEE, 1982, López, 2006]. Un ejemplo de lo anterior es el análisis del caso

base del sistema, para el cual, se utiliza un estudio de flujos de potencia considerando modelos estáticos del sistema.

5.2 ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La estabilidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP's) se define actualmente de la siguiente manera: "La estabilidad del sistema de potencia es su habilidad para permanecer en un estado de operación aceptable después de estar sujeto a disturbios repentinos, programados o normales [IEEE, 2004, López, 2006]". En esta definición de estabilidad se asume que en el período transitorio, entre los estados estacionarios inicial (antes del disturbio) y final (después del disturbio), el amortiguamiento y las variables principales del SEP permanecen limitadas por sus valores admisibles y tienen un impacto pequeño en la calidad del servicio eléctrico. En el estado de operación aceptable al que finalmente llega el SEP los valores de voltaje y frecuencia permanecen dentro de sus límites normales y todos los generadores síncronos operan en sincronismo [López, 2006].

La Fig. 5.2 presenta la última clasificación de la estabilidad propuesta por un comité del CIGRE y el IEEE en [IEEE, 2004]. En esta figura se puede observar que los diferentes tipos de clasificación de la estabilidad de un SEP van de acuerdo a los siguientes tres criterios:

1. La naturaleza física del problema y el parámetro principal en el que se puede observar la inestabilidad.
2. El tamaño del disturbio que inicia el problema de inestabilidad.
3. El periodo de tiempo en el que se desarrolla la inestabilidad del sistema.

A continuación se da una definición más concreta de la estabilidad de voltaje mostrada en la Fig. 5.2, que va de acuerdo al primer criterio (la naturaleza física del problema):

- **Estabilidad de Voltaje:** Es la habilidad de los subsistemas de generación y transmisión para restaurar las potencias de las cargas y alcanzar valores aceptables de voltaje en los nodos del sistema después de un disturbio. "La inestabilidad de voltaje es causada por el intento de las cargas de restaurar su consumo de energía a un valor mucho mayor que el de la capacidad combinada de los sistemas de generación y transmisión [Van Cutsem and Vournas, 1998, López, 2006]".

La inestabilidad de voltaje comúnmente se manifiesta como una caída progresiva e incontrolable del voltaje en algunos nodos del SEP. Un resultado posible de la inestabilidad de voltaje es la pérdida de la carga en un área o el disparo de líneas de transmisión y otros elementos debido a la operación de sus sistemas de protección. La consecuencia más drástica de la inestabilidad de voltaje se conoce con el término

colapso de voltaje, que frecuentemente, es empleado incorrectamente al hacer referencia a todos los problemas de estabilidad de voltaje, esto se debe a que es posible que el sistema eléctrico de potencia no experimente siempre un colapso de voltaje y opere en estado estable aún con bajos voltajes, después de que los transformadores con cambiador automático de derivación bajo carga alcancen su límite y queden fijos [IEEE, 2004].

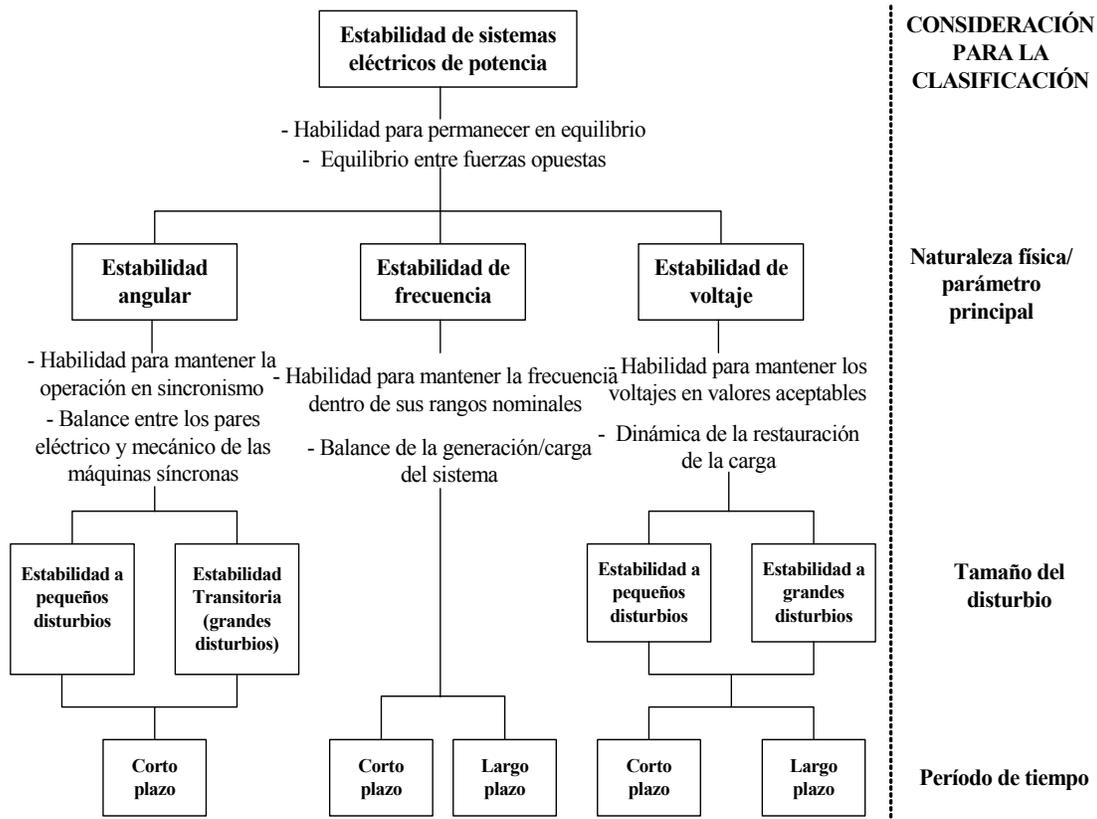


Fig. 5.2. Clasificación de los problemas de inestabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia (Adaptado de [Ruiz-Vega, 2002, IEEE, 2004]).

- **Colapso de voltaje:** Es el proceso secuencial de eventos que acompaña a la inestabilidad de voltaje provocando apagones o un perfil de voltaje inaceptablemente bajo en una parte significativa del SEP [Kundur, 1994].

El segundo criterio de clasificación se refiere al *tamaño del disturbio* que inicia el problema de estabilidad, el cual es definido como:

- **Tamaño del Disturbio:** Un disturbio es clasificado como pequeño si es posible analizar sus consecuencias utilizando un modelo lineal del sistema. En caso contrario, se clasifica como un gran disturbio [IEEE, 1982].

Esta definición cumple muy bien su función, ya que lo que define el tamaño de un disturbio es que los resultados de un análisis utilizando el modelo lineal del sistema sean válidos al estudiar el sistema real (no-lineal).

El tercer criterio es el período de tiempo en el que se desarrolla el problema de estabilidad del sistema (corto y largo plazo), los tiempos de análisis pueden ir desde milisegundos segundos hasta decenas de minutos, este se muestra en la Fig. 5.3, con respecto a las bandas de tiempo de los diferentes fenómenos dinámicos presentes en los SEP's.

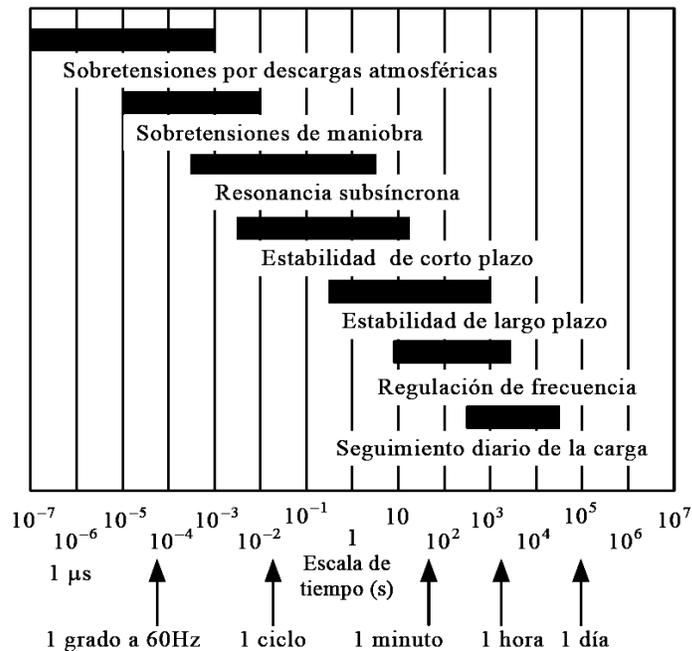


Fig. 5.3. Período de tiempo en el que se desarrollan los problemas de estabilidad del sistema con respecto a las bandas de tiempo de los diferentes fenómenos dinámicos de los SEP's (Adaptado de [Anderson et al., 1990, López, 2006]).

Los problemas de estabilidad de voltaje permiten ser clasificados de manera natural, de acuerdo al comportamiento dinámico del sistema, en dos diferentes períodos de tiempo como fenómenos de *corto plazo* o de *largo plazo*. A continuación se describe cada una de las clases de estabilidad de voltaje que van de acuerdo a este tercer criterio:

- **Estabilidad de voltaje de corto plazo:** En esta clasificación el mecanismo de la inestabilidad de voltaje es influenciado de manera muy importante por la dinámica de los motores de inducción, cargas controladas electrónicamente, y convertidores de líneas de transmisión de corriente directa en alta tensión. El período de estudio de interés está en el rango de varios milisegundos hasta 20 segundos y el análisis requiere solucionar de manera adecuada el sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas no lineales que representan al sistema, por lo que este enfoque es muy similar a un estudio de estabilidad angular transitoria utilizando un programa de simulación en el tiempo [López, 2006] Como un requisito indispensable es necesario que el programa de simulación modele de manera adecuada las cargas dinámicas de motores de inducción del sistema [Becerril, 2008].

- **Estabilidad de voltaje de largo plazo:** En esta clasificación la dinámica importante del sistema que afecta a la estabilidad involucra la acción de dispositivos de acción lenta (transformadores con cambiador de derivación bajo carga, cargas controladas con termostatos y limitadores de corriente de campo en los generadores), que usualmente no son considerados en los estudios de estabilidad de corto plazo. El período de estudio se extiende hasta varios minutos, y en este marco de tiempo se considera que la mayoría de los elementos dinámicos importantes en los problemas de corto plazo (como las máquinas eléctricas y la mayoría de sus controles) han alcanzado sus condiciones de estado estacionario y pueden, por lo tanto, ser representados por medio de ecuaciones algebraicas (como es el caso de los modelos estáticos motor de inducción) para el modelo del sistema en estos estudios de estabilidad [López, 2006].

En este capítulo se trata exclusivamente con el análisis de estabilidad de voltaje de largo plazo de sistemas de potencia. Aunque los motores de inducción no son los elementos dinámicos principales que intervienen en este tipo de estabilidad, el enfoque empleado en este trabajo consiste en mejorar la evaluación de la estabilidad de largo plazo en sistemas que tienen una parte importante de cargas de motores de inducción, incluyendo modelos estáticos más exactos de estos motores.

Los problemas de inestabilidad de voltaje de largo plazo tienen las siguientes causas principales [Van Cutsem and Vournas, 1998]:

- **La pérdida del equilibrio de la dinámica de largo plazo:** Esto ocurre, por ejemplo, cuando se intenta restaurar la carga en puntos de operación más allá de la capacidad máxima combinada de los subsistemas de transmisión y generación.
- **La escasez de atracción hacia el equilibrio estable de post disturbio:** Un ejemplo de esta pérdida de estabilidad se tiene cuando una acción correctiva que restaura el equilibrio de largo plazo es aplicada a destiempo, no lo suficientemente rápido como para que el sistema sea atraído al equilibrio estable de post disturbio.
- **La pérdida de estabilidad por medio de oscilaciones que crecen lentamente:** Este tipo de inestabilidad se menciona para que la clasificación sea completa, pero no se ha observado en SEP's reales.

Hay dos aspectos interesantes que se pueden observar en los mecanismos de la estabilidad de voltaje de largo plazo mencionados anteriormente: La causa principal de los problemas de inestabilidad es la pérdida del equilibrio de largo plazo. Como se ha mencionado desde la definición del problema de la estabilidad de voltaje, esta propiedad del SEP está relacionada con la capacidad de los subsistemas de generación y transmisión para restaurar las potencias de las cargas, por lo que es importante determinar el valor máximo de la capacidad de estos en condiciones de estado estacionario y, sobre todo, cuando el SEP ha estado sujeto a una contingencia (la salida inesperada de un elemento como una línea de transmisión o un generador).

El segundo mecanismo de inestabilidad mencionado, debido a la falta de atracción de la trayectoria del sistema hacia el equilibrio estable de post disturbio, está relacionado con las medidas de control de la estabilidad de voltaje, estableciendo principalmente que una parte muy importante de estas acciones de control depende, además de la cantidad de potencia que se compensa, la secuencia de tiempo en la que se aplica. De esta manera, en el estudio que interesa en este trabajo, se verifica principalmente el primer mecanismo de inestabilidad mencionado anteriormente, utilizando el estudio de cargabilidad.

5.2.1 La cargabilidad de sistemas eléctricos de potencia

Se ha determinado que los problemas de estabilidad de voltaje se producen cuando la restauración de la carga después de un disturbio excede la capacidad combinada de los subsistemas de transmisión y generación. Debido a lo anterior, es relevante conocer los límites de transmisión de potencia del SEP ante variaciones de carga. Este problema se conoce como determinación del límite máximo de cargabilidad [López, 2006].

“El límite máximo de cargabilidad indica la potencia máxima que se puede aumentar en un área o grupo de nodos del SEP sin que este experimente problemas de sobrecargas, de bajos voltajes, o bien, de estabilidad [López, 2006]”.

La variación de la carga puede medirse como la suma de los cambios absolutos de la potencia de carga, o bien, por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los cambios de potencia de carga. Actualmente se asume que los incrementos de carga conservan un factor de potencia constante, por lo que para estos casos el cambio de carga puede ser medido únicamente por la variación de potencia activa. Además la medición de la cargabilidad se representa como la suma de los cambios absolutos en potencia activa y se representa con el *factor de cargabilidad* (λ) [IEEE, 2001]. El aumento de la carga en el SEP se puede modelar en ocasiones como una disminución de la generación en el área de interés [Bettiol, 2000].

Si se parte de una condición base de operación hasta un siguiente punto de equilibrio del SEP para el cual se establece el incremento de potencia de carga y su dirección de estrés (patrón específico del incremento), entonces se tendrá un valor denominado *factor de cargabilidad* (λ) el cual representa el aumento de potencia de carga entre la cantidad de potencia de carga base y el valor de potencia de carga para el siguiente punto de equilibrio, por lo general λ se expresa en valores de por unidad [p.u.]; el *factor de cargabilidad* es el índice más básico y ampliamente aceptado para hacer referencia en un colapso de voltaje, debido a la posibilidad de realizar incrementos sucesivos de λ hasta encontrar el último punto de equilibrio para el cual el SEP tiene estabilidad de voltaje (punto crítico de estabilidad de voltaje) [López, 2006].

Algunas de las ventajas del *factor de cargabilidad* visto como un índice de estabilidad de voltaje son [IEEE, 2001]:

- El *factor de cargabilidad* se puede trabajar de forma muy directa para un fácil entendimiento del proceso de cargabilidad del SEP.
- El *factor de cargabilidad* se basa en un modelo general del sistema de potencia, es decir, no se particulariza para un modelo del SEP; simplemente se requiere definir el modelo estático de carga a emplear.
- El *factor de cargabilidad* es un índice certero que toma en cuenta la no-linealidad de la carga del sistema, y este llega a un valor máximo, es decir, a manera que la carga se incrementa se encuentran los límites del control de potencia reactiva, los límites no se reflejan en cambios súbitos del factor de cargabilidad.
- Una vez que se calcula el *factor de cargabilidad* es fácil y rápido calcular su sensibilidad con respecto a cualquiera de los parámetros del SEP o bien con alguno de sus controles.
- El *factor de cargabilidad* representa el patrón o dirección de la variación del incremento de carga.

Si el *factor de cargabilidad* se elige como un parámetro de variación es posible obtener un diagrama conocido como curva *PV*; ésta indica el margen de cargabilidad hasta el punto de colapso como la distancia en términos del factor de cargabilidad desde un punto de operación inicial (caso base) hasta la nariz de la curva *PV*. Este margen de cargabilidad es una herramienta útil (sobre todo si se considera el efecto de las contingencias en el SEP) para realizar el estudio de seguridad dinámica.

El límite de cargabilidad no es único, ya que puede variar dependiendo del problema específico que se analice. En general se pueden mencionar tres casos generales de interés:

1. El límite de cargabilidad total del SEP. En este límite se aumenta la carga de todo el SEP y se analiza su respuesta sin falla y ante diferentes contingencias.
2. El límite de cargabilidad de las líneas de enlace entre áreas. En este estudio se definen dos tipos de áreas principales: de generación y de carga. Normalmente se aumenta la potencia en las áreas de carga y este aumento se compensa por las áreas de generación correspondientes.
3. El límite de cargabilidad de un nodo del SEP. En este caso se aumenta la potencia de carga en un solo nodo.

Los aumentos de carga mencionados anteriormente son alimentados por el nodo *compensador* ó por un grupo de generadores. Esta decisión depende principalmente de la estructura del SEP y de su forma de operar.

De manera incorrecta, muchos ingenieros realizan indiscriminadamente la compensación de este incremento de carga por el nodo *compensador* del SEP. Esto es un error grave en la realización del estudio de cargabilidad, ya que provee valores del límite máximo de cargabilidad muy irreales que no reflejan el comportamiento del SEP. La aplicación de la compensación del incremento de carga se debe realizar teniendo en cuenta la estructura del sistema de estudio y su operación real. Por ejemplo, si se realiza el estudio de cargabilidad del sistema completo y se aumenta la carga total del sistema, es más real distribuir el aumento de la potencia de carga entre el grupo de generadores que participan en el control secundario de frecuencia que dejar que el nodo *compensador* haga lo propio con el incremento. El nodo *compensador*, además, representa una máquina síncrona real con límites muy bien establecidos, por lo que si se considera esta opción se debe modelar esta máquina con sus límites reales.

En la siguiente sección se hace una descripción de las curvas *PV* y su utilización en la evaluación de la estabilidad de voltaje.

5.2.2 El método de las curvas *PV*

Para determinar la distancia entre la condición actual de operación y el límite de estabilidad de voltaje, llamada también la proximidad al colapso de voltaje, se emplean actualmente los perfiles de voltaje nodal del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), estos perfiles de voltaje son las denominadas curvas nariz, curvas *PV* ó diagramas de bifurcación. Este tipo de gráfica permite que los operadores de los centros de control realicen medidas de prevención oportunas para evitar la pérdida del sistema [Berizzi et al., 1995, Ejebe et al., 1998].

El método de las curvas *PV* grafica la variación de la magnitud del voltaje en el nodo crítico con respecto a cambios de potencia activa de la carga del sistema. Es útil para analizar tanto redes radiales como malladas donde P (la potencia activa) puede ser la carga total en un área, o bien, puede ser la transferencia de potencia a través de un enlace de transmisión o interconexión, y V es el voltaje en el nodo crítico o representativo del sistema [Taylor, 1994].

La idea básica para obtener los perfiles de voltaje es mediante soluciones sucesivas de Flujos de Potencia en diferentes puntos de operación del SEP. Si se desea obtener las curvas *PV* de cualquier SEP empleando el método de Flujos de Potencia (Newton-Raphson) se tendrá la desventaja de que en la mayoría de las ocasiones existen problemas de convergencia cerca del punto máximo de cargabilidad, por lo que es imposible precisar el valor máximo exacto del factor de cargabilidad. La única

manera de poder graficar el comportamiento del perfil de voltaje de cualquiera de los nodos del SEP se logra con la aplicación de un Método de Continuación (Una descripción general de los Métodos de Continuación se presenta en [López, 2006]).

En la Figura 5.4 se muestra una curva típica *PV*. Esta curva se puede trazar utilizando el modelo de estático del sistema. Esta gráfica en particular relaciona el voltaje en un nodo crítico con el aumento la carga dentro de un área o el flujo a través de un enlace. En la Figura 5.4 se pueden distinguir dos valores importantes de la cargabilidad del sistema: el valor de la potencia de carga en el caso base, y el valor de la carga en la condición de cargabilidad máxima. En base a estos valores se puede definir un margen de seguridad dinámico para estabilidad de voltaje (indicando la máxima transferencia de potencia posible, por ejemplo) como la diferencia entre ambos puntos.

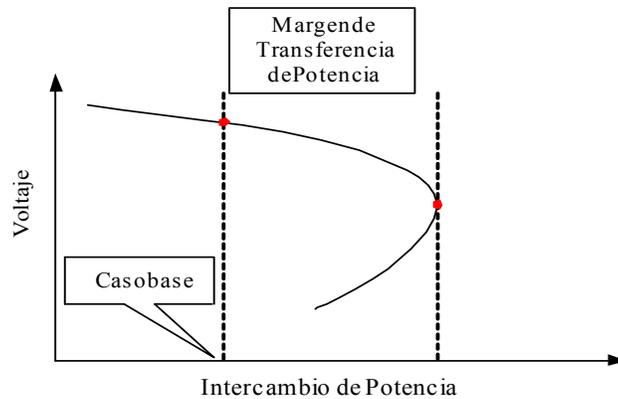


Fig. 5.4. Se muestra una curva *PV* típica, siempre se comienza desde un caso base hasta el punto de bifurcación nodo silla de montar (adaptada de [López, 2006]).

Para obtener las curvas *PV* se realizan estudios sucesivos de Flujos de Potencia. Siempre se inicia el estudio a partir de un caso base de Flujos de Potencia (solución inicial); posteriormente se desea calcular un nuevo punto de operación, en este punto se incrementa la potencia de carga, el aumento total de carga del SEP o de un área debe ser repartido entre las unidades generadoras del SEP o de un área del mismo, esto se realiza hasta que se encuentra el punto máximo de cargabilidad (bifurcación), o bien, la nariz de la curva *PV*.

Por medio del método de las curvas *PV* se puede evaluar el efecto de contingencias (salidas de elementos del SEP: líneas de transmisión y generadores) en el valor máximo del factor de cargabilidad. Cuando se realiza el análisis del grupo de contingencias posibles del SEP, la *contingencia crítica* es la que tiene el menor valor del factor de cargabilidad posible y este valor se establece como el límite máximo de cargabilidad del SEP.

La condición de operación correspondiente al punto máximo de cargabilidad del sistema puede ser interpretada por medio de la teoría de bifurcaciones como un punto de bifurcación tipo nodo silla de montar.

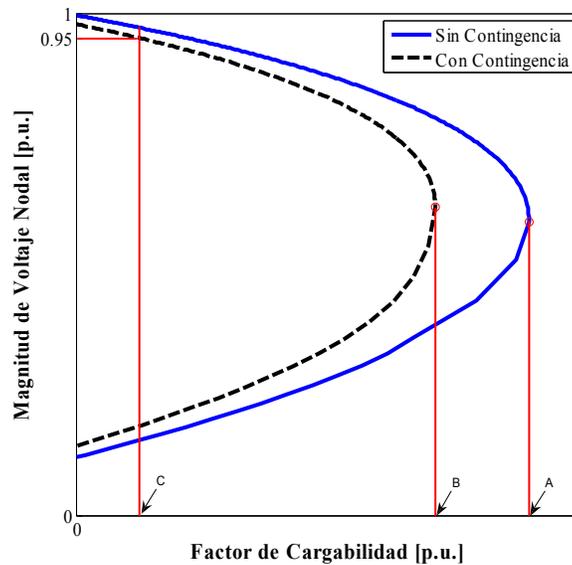


Fig. 5.5. Se muestra una curva *PV* típica sin contingencia (línea sólida) y con contingencia (línea punteada). El punto A representa el límite físico de estabilidad sin contingencia, el punto B el límite de estabilidad con contingencia y el punto C el límite seguro de operación (adaptada de [Domínguez, 2008]).

En la Figura 5.5 se muestran dos curvas *PV* una de ellas corresponde al caso de operación sin contingencia (línea sólida), la otra corresponde a la curva *PV* con contingencia (línea punteada). Para el caso de la curva sin contingencia, se indica el punto máximo de cargabilidad y haciendo una proyección sobre la vertical se traza una línea para indicar sobre el eje de las abscisas el punto A (límite físico de estabilidad sin contingencia), lo mismo se hace para el valor máximo de cargabilidad con contingencia, llamando a este punto B (límite de estabilidad con contingencia) y se considera un tercer punto para lo cual se dice que para un valor de voltaje de 0.95 p.u. sobre la curva *PV* con contingencia le corresponde un valor del factor de cargabilidad λ que le llamaremos C (límite seguro de operación). Todo esto se hace con la finalidad de realizar un estudio de estabilidad de forma práctica ya que debemos tener en cuenta que en un sistema real se presenta el aumento del factor de cargabilidad (es decir se va estresando el sistema), pero es necesario determinar el límite de cargabilidad para así poder definir hasta donde el sistema es seguro.

Es viable analizar cualquier punto de la curva *PV* sin contingencia hasta un valor del factor de cargabilidad máximo obtenido con contingencia crítica (punto B), esto es porque si el sistema está operando en cualquiera de estos puntos hasta antes del punto B, incluso el mismo punto B y ocurriese una contingencia el punto de operación cae sobre la curva *PV* con contingencia por lo que se podría decir que el sistema opera de manera segura. En el caso de que ocurriese un disturbio para un valor del factor de cargabilidad λ superior al punto B pero inferior ó igual al punto A, el sistema estaría desprotegido porque ese punto de operación no cae sobre la curva *PV* con contingencia.

5.3 ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE LARGO PLAZO UTILIZANDO MODELOS ESTÁTICOS DEL MOTOR

Los ingenieros encargados de la planeación y la operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP's) basan muchas de sus decisiones para reforzar el SEP y/o para mejorar el desempeño del mismo, en los resultados de estudios de simulación como los Estudios de Flujos de Potencia y de Estabilidad. Cuando se realiza alguna simulación del SEP el modelo debe incluir una representación más detallada de los elementos principales que tienen una influencia importante en el comportamiento del SEP en estado estacionario y dinámico. La forma en que se representan los componentes más importantes del SEP depende del objetivo y tipo del estudio, así como del marco de tiempo en el que se desarrolla el fenómeno de interés [Ruiz-Vega and Enríquez-Harper, 2005].

Como ya antes se ha explicado, la dinámica importante del sistema que afecta a la estabilidad de voltaje de largo plazo involucra la acción de dispositivos de acción lenta (transformadores con cambiador de derivación bajo carga, cargas controladas con termostatos, limitadores de corriente de campo en los generadores). El período de estudio se extiende hasta varios minutos, y en este marco de tiempo se considera que la mayoría de los elementos dinámicos importantes en los problemas de corto plazo (como las máquinas eléctricas y la mayoría de sus controles) han alcanzado sus condiciones de estado estacionario y pueden, por lo tanto, ser representados por medio de ecuaciones algebraicas (como es el caso de los modelos estáticos motor de inducción) para el modelo del sistema.

En estudios de análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia generalmente el subsistema de cargas se modela por medio de cargas equivalentes, que en realidad representan un equivalente compuesto del efecto de las redes de subtransmisión y distribución y el efecto agregado de un gran número de cargas individuales de diferentes tipos (Domesticas, Industriales, Comerciales), vistas desde la red troncal de transmisión, en los niveles de tensión de 400 kV a 115 kV. Por lo que, la carga de motores que se representan en los estudios del SEP, en realidad representan un equivalente agregado de un gran número de motores.

Debido a lo anterior la representación de cargas de motores de inducción en estudios del sistema, comprenden dos problemas principales: a) La determinación correcta de los parámetros del motor equivalente y b) La representación adecuada de este equivalente en estudios del sistema. Como se ha explicado anteriormente, el objetivo de esta tesis es la representación adecuada de las cargas de motores de inducción en estudios que utilizan modelos estáticos del sistema.

Una de las razones de tener una representación mas detallada de los motores de inducción en el estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo, es que, la parte básica de la carga (comúnmente desde un 50 % hasta un 80 % de la carga total) la conforman

los motores de inducción, cuya influencia se refleja sustancialmente en los procesos transitorios de todos los nodos del sistema [Vénikov, 1988], debido a que son cargas con bajo factor de potencia, tienden a restaurar su consumo de potencia después de un disturbio y finalmente son propensos a detenerse [Vournas and Manos, 1998].

Por lo tanto, los modelos de este tipo de motores que se deben emplear en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo son los que representen adecuadamente su dinámica asociada. Mientras se utiliza el modelo de carga más apropiado, se obtienen resultados más precisos del análisis de estabilidad de voltaje.

En el Capítulo 4, se determinó que los modelos estáticos del motor de inducción 2 y 3 representan adecuadamente su comportamiento en la región estable (hasta el punto de detención), por lo que éstos modelos serán empleados a continuación para representar la carga de motores de inducción en un análisis de estabilidad de voltaje de largo plazo de sistemas de potencia. Para tener una mejor apreciación del efecto de modelar inadecuadamente este tipo de cargas en estudios que utilizan modelos estáticos del sistema como es el caso del estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo, se comparan los resultados de los modelos del motor con los obtenidos de emplear el modelo de carga más básico en este tipo de estudios, el Modelo estático 1 (con característica de potencia constante).

Para tener una apreciación más clara del efecto del modelo del motor de inducción en los resultados del estudio, el modelado de todos los componentes restantes del sistema se realizará con el modelo convencional de flujos de potencia sin límites.

5.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.4.1 Sistema de Prueba Taylor 10-Nodos (Tres-Motores)

Uno de los sistemas seleccionados que se ha elegido para aplicación de la metodología es el sistema mostrado en la Fig. 3.1, obtenido de [Taylor, 1994]. Este sistema, que ya ha sido descrito en el Capítulo 3 del presente trabajo de tesis, está compuesto por 3 generadores síncronos y 10 nodos. Dos cargas de diferentes tipos son alimentadas desde un nodo de 500 kV en el área de carga. La carga industrial (compuesta por dos motores de inducción) es alimentada directamente por un transformador (T1). La carga residencial y comercial es alimentada por dos transformadores (T2 y T3) y una línea de subtransmisión (representada por una impedancia equivalente), esta carga está compuesta por una carga estática de 1500 MW y un motor de inducción de 1500 MW; este motor equivalente es un agregado de motores altamente dominado por cargas de aire acondicionado. Dos generadores remotos entregan 5000 MW al área de carga a través de cinco líneas de 500 kV. Los parámetros de los motores de inducción y del sistema se presentan en el apéndice A del presente trabajo.

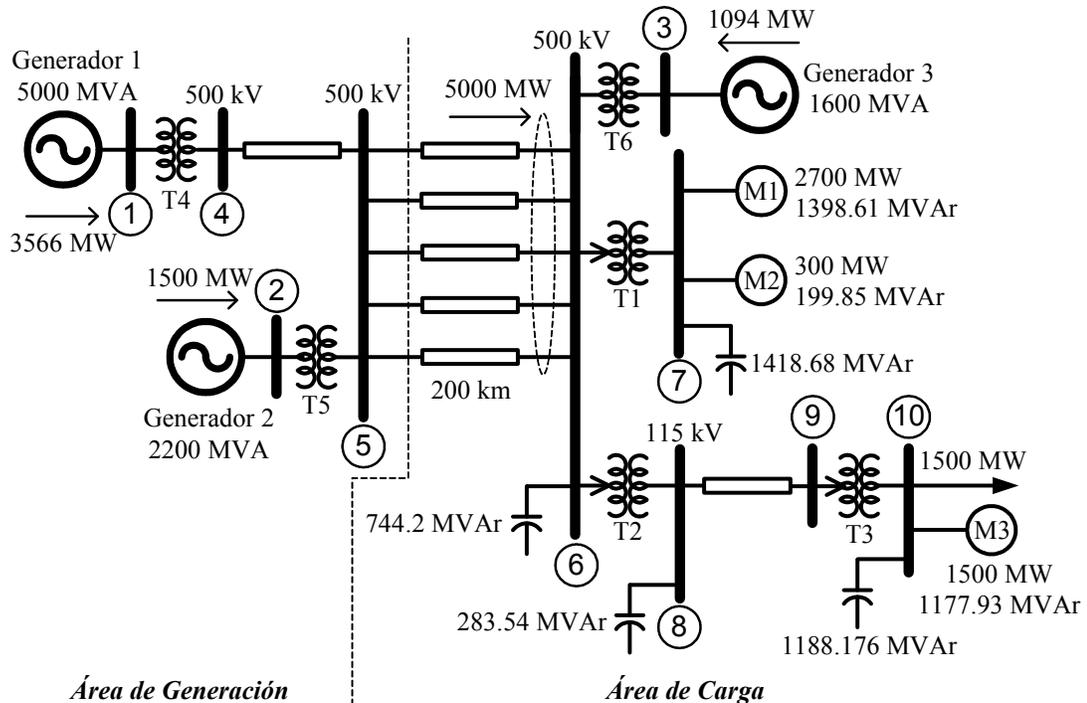


Fig. 3.1. Diagrama unifilar del sistema de prueba Taylor 10-Nodos (Adaptado de [Taylor, 1994]).

5.4.2 Resultados del estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo del Sistema Taylor 10-Nodos con el programa FLUJOS

El análisis de la estabilidad de voltaje de largo plazo del sistema de la Fig. 3.1 se realizó mediante estudios de flujos de potencia sucesivos, un estudio por cada incremento del factor de cargabilidad, para así obtener el comportamiento del voltaje en el nodo crítico del sistema bajo cada incremento de carga. La carga de motores de inducción del sistema que se encuentra en los nodos 7 y 10 fue representada por los modelos estáticos 1, 2 y 3.

Para este sistema se presentan tres casos, uno en el que solo se aumenta la carga estática del nodo 10, otro en el que solamente se aumenta la carga de motores de inducción del sistema sin aumentar la carga estática del nodo 10 y el tercer caso en el que se analiza el sistema bajo contingencia, al sacar una línea entre los nodos 5-6 y se aumenta la carga de motores de inducción del sistema. En todos los casos la carga estática del nodo 10 fue modelada con una característica de potencia constante.

5.4.2.1 Aumentando de la carga estática del nodo 10, sin aumentar la carga de motores de inducción del sistema Taylor 10-Nodos: Caso 1

Para el análisis del sistema, primeramente, se optó por solamente aumentar la carga estática, esta carga se encuentra en el nodo 10 del sistema mostrado en la Fig. 3.1. La carga estática es de 15000 MW en el estado inicial del sistema, por su

parte, la carga de motores de inducción suma alrededor de 4500 MW y 2776.39 Mvars, el aumento de carga estuvo compensado por los generadores 1 y 2, la distribución de la carga para cada uno de estos generadores estuvo en función de su inercia, por lo que el generador con mayor inercia fue el encargado de compensar la mayor parte del aumento de carga del sistema. Se realizaron tres estudios completos de estabilidad de voltaje, es decir, un estudio por modelo estático del motor, y en cada estudio se obtuvo el nodo con el voltaje crítico. El criterio para determinar el máximo factor de cargabilidad del sistema estuvo dado por la capacidad del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para dar solución al sistema bajo cada incremento de carga.

En la Fig. 5.6 se muestran los resultados obtenidos por cada modelo para el comportamiento del voltaje del nodo crítico, que, en todos los casos fue el nodo 9. Esta figura fue obtenida de emplear el programa de simulación "FLUJOS" desarrollado en lenguaje FORTRAN, presentado en la referencia [Ruiz y Olguín, 1997], se empleó este programa para poder representar el modelo estático 2, ya que, para la utilización de este modelo se necesita modificar el código fuente del estudio de flujos de potencia.

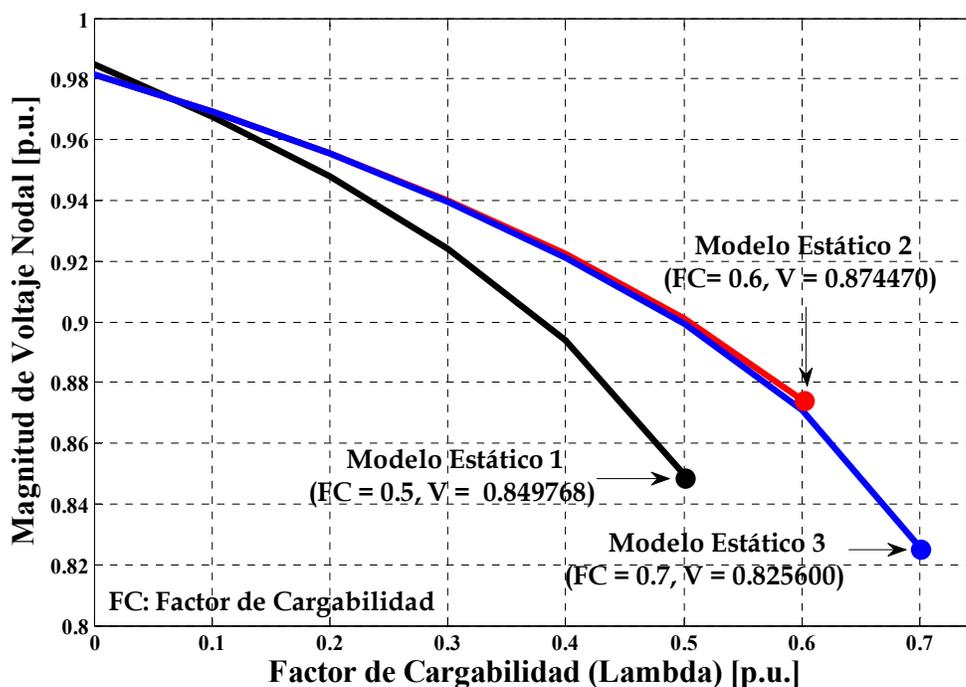


Fig. 5.6. Comportamiento del voltaje del nodo crítico N9 y máximo factor de cargabilidad obtenido por cada modelo estático del motor de inducción cuando solo es aumentada la carga estática del nodo 10 del sistema de la Fig. 3.1.

Como se observa, en este caso, el impacto en los resultados al considerar el modelo del motor de inducción en el estudio es significativo, comparado con la representación más común utilizada en estudios estáticos para representar este tipo de cargas (Modelo estático 1).

5.4.2.2 Aumento de la carga de motores de inducción del sistema Taylor 10-Nodos: Caso 2

Para este caso el estudio se realizó aumentando solo la carga de motores de inducción del sistema de la Fig. 3.1. Se realizaron tres estudios completos de estabilidad de voltaje, es decir, un estudio por modelo estático del motor, y en cada estudio se obtuvo el nodo con el voltaje crítico (para los tres casos fue el mismo nodo, el nodo 9). El criterio para determinar el máximo factor de cargabilidad del sistema estuvo dado por la capacidad del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para dar solución al sistema bajo cada incremento de carga.

Para que las potencias de consumo de los motores de inducción bajo cada incremento de carga correspondieran a sus parámetros, se optó por cambiar la potencia base original de cada motor por su potencia base correspondiente al nuevo incremento de carga y después recalcular sus parámetros, esto se realizó en cada incremento del factor de cargabilidad. Este procedimiento es acorde al descrito en las referencias [Henriques et al., 2002, Martins et al., 2003].

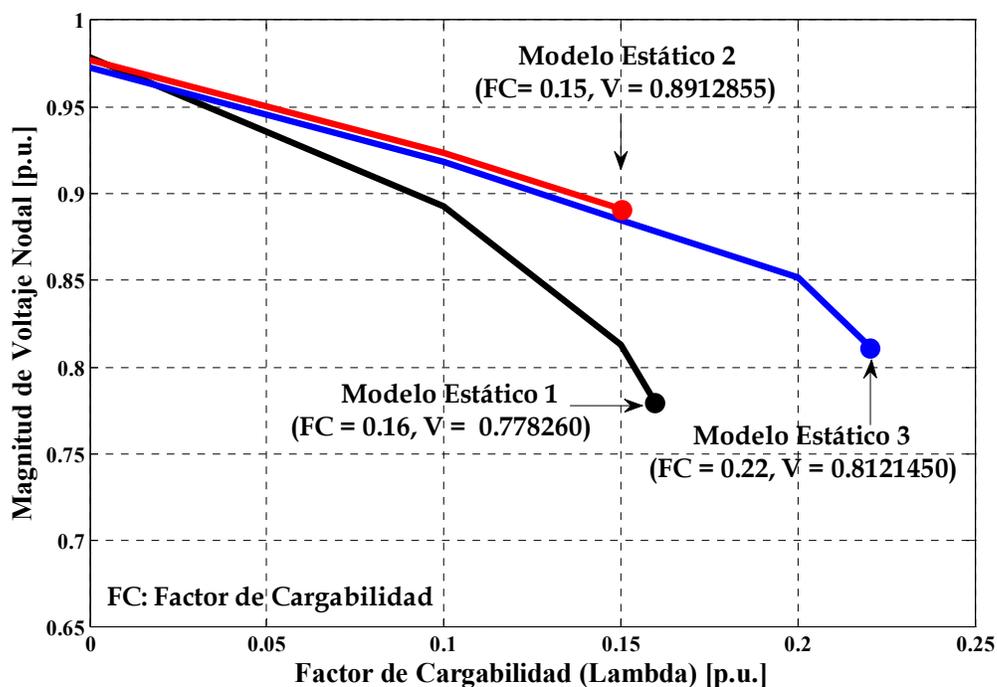


Fig. 5.7. Comportamiento del voltaje del nodo crítico N9 y máximo factor de cargabilidad obtenido por cada modelo estático del motor de inducción al aumentar solamente la carga de motores de inducción del sistema de la Fig. 3.1.

En la Fig. 5.7, se muestra el comportamiento del voltaje del nodo crítico 9 con respecto al factor de cargabilidad por cada modelo estático del motor de inducción. Al igual que el caso 1 esta figura fue obtenida de emplear el programa de simulación “FLUJOS” para así poder utilizar el modelo estático 2.

Como se observa en la Fig. 5.7, con el modelo estático 1 (que modela la carga de motores de inducción de una forma inadecuada) se obtienen resultados muy alejados a los obtenidos con los modelos estáticos 2 y 3 del motor de inducción, los cuales sí representan el comportamiento real del motor a variaciones lentas de su voltaje terminal.

También se puede observar el efecto de mejorar el condicionamiento de Y_{bus} en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson, ya que aunque los modelos estáticos 2 y 3 conservan el mismo comportamiento hasta un factor de cargabilidad del sistema igual a 0.15, después de este factor de cargabilidad el modelo estático 2 ya no ofrece solución al sistema, mientras que el modelo estático 3 (el cual por su estructura cuenta con elementos en paralelo que pueden ser sumados a la diagonal de Y_{bus} y mejorar el condicionamiento del sistema), ofrece resultados hasta un factor de cargabilidad iguala a 0.22.

5.4.2.3 Aumentando de la carga estática del nodo 10, considerando que se encuentra desconectada una línea entre los nodos 5 y 6: Caso 3 (sistema bajo contingencia)

Para este caso el sistema fue analizado bajo contingencia, por lo que se consideró la salida de una línea entre los nodos 5 y 6. De esta manera, el sistema fue analizado considerando solo 4 líneas de las 5 líneas de 500 kV entre los nodos 5 y 6. Para el aumento de la carga de motores de inducción se siguió el mismo procedimiento que en el caso 2. La carga estática del nodo 10 se mantuvo sin alteraciones y fue simulada con una característica de potencia constante.

La Fig. 5.8 muestra los resultados obtenidos en este caso particular. Como se observa la diferencia entre los resultados es significativa para todos los modelos estáticos del motor de inducción. Al igual que los casos anteriores, el modelo estático 1 presenta un comportamiento muy diferente a los obtenidos con los modelos estáticos 2 y 3, por su parte con estos últimos modelos se obtienen comportamientos similares del voltaje del nodo crítico 9, pero muy diferentes para el valor máximo del factor de cargabilidad del sistema. Esto se debe en gran parte a la estructura de los modelos ya que, como se ha mencionado anteriormente, a diferencia del modelo estático 2 el modelo estático 3, debido a su estructura, ayuda al condicionamiento de la matriz Y_{bus} del sistema, por lo que esto permite que con este modelo se puedan encontrar mas puntos de operación del sistema que con los modelos estáticos 1 y 2. Esto será tratado y discutido en la sección 5.5 del presente capítulo.

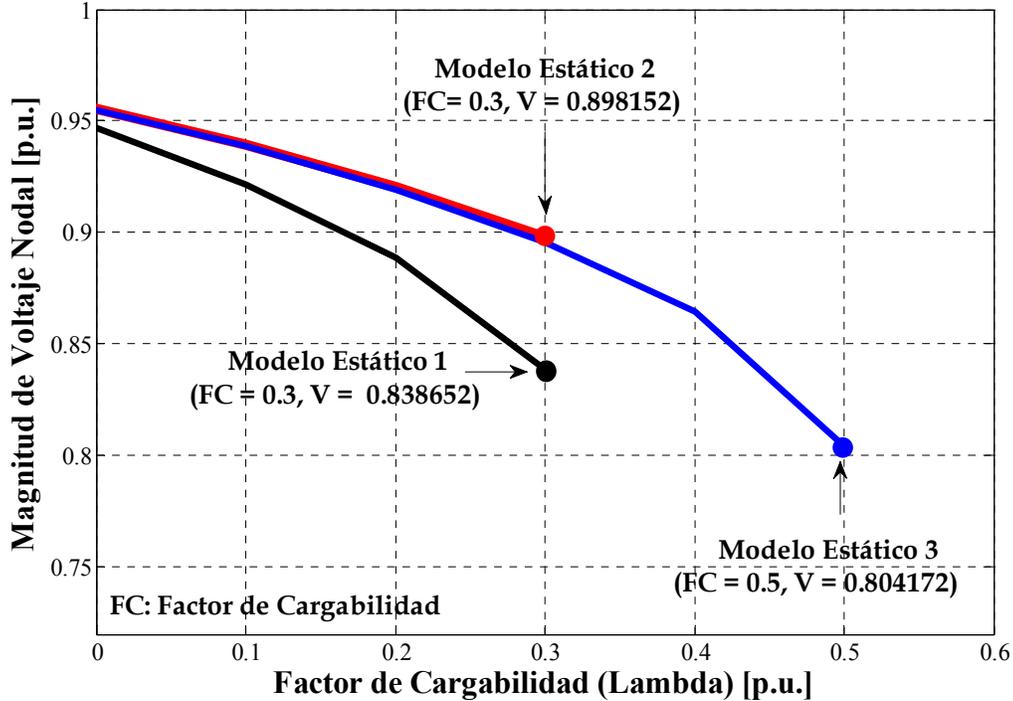


Fig. 5.8. Comportamiento del voltaje del nodo crítico N9 y máximo factor de cargabilidad obtenido por cada modelo estático del motor de inducción al aumentar solamente la carga de motores de inducción del sistema de la Fig. 3.1, considerando que se encuentra desconectada una línea entre los nodos 5 y 6.

5.4.3 Sistema de Prueba CIGRE 32-Nodos (Siete-Motores)

El segundo sistema que se ha elegido para la aplicación de la metodología es el sistema de prueba CIGRE de 32 nodos, reportado en [CIGRE, 1995]. Este sistema es de interés para el trabajo por el hecho de que, en la mayoría de los nodos PQ, la carga está compuesta por motores de inducción. Este sistema ya ha sido descrito en el Capítulo 3. Los parámetros de los motores de inducción y del sistema están dados en el apéndice B del presente trabajo.

5.4.4 Resultados del estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo del Sistema CIGRE 32-Nodos con el programa FLUJOS

El análisis de la estabilidad de voltaje de largo plazo del sistema de la Fig. 3.2 se realizó mediante estudios de flujos de potencia sucesivos, un estudio por cada incremento del factor de cargabilidad, para así obtener el comportamiento del voltaje en el nodo crítico del sistema bajo cada incremento de carga. La carga de motores de inducción del sistema que se encuentra en los nodos N201 a N207 fue representada por los modelos estáticos 1, 2 y 3.

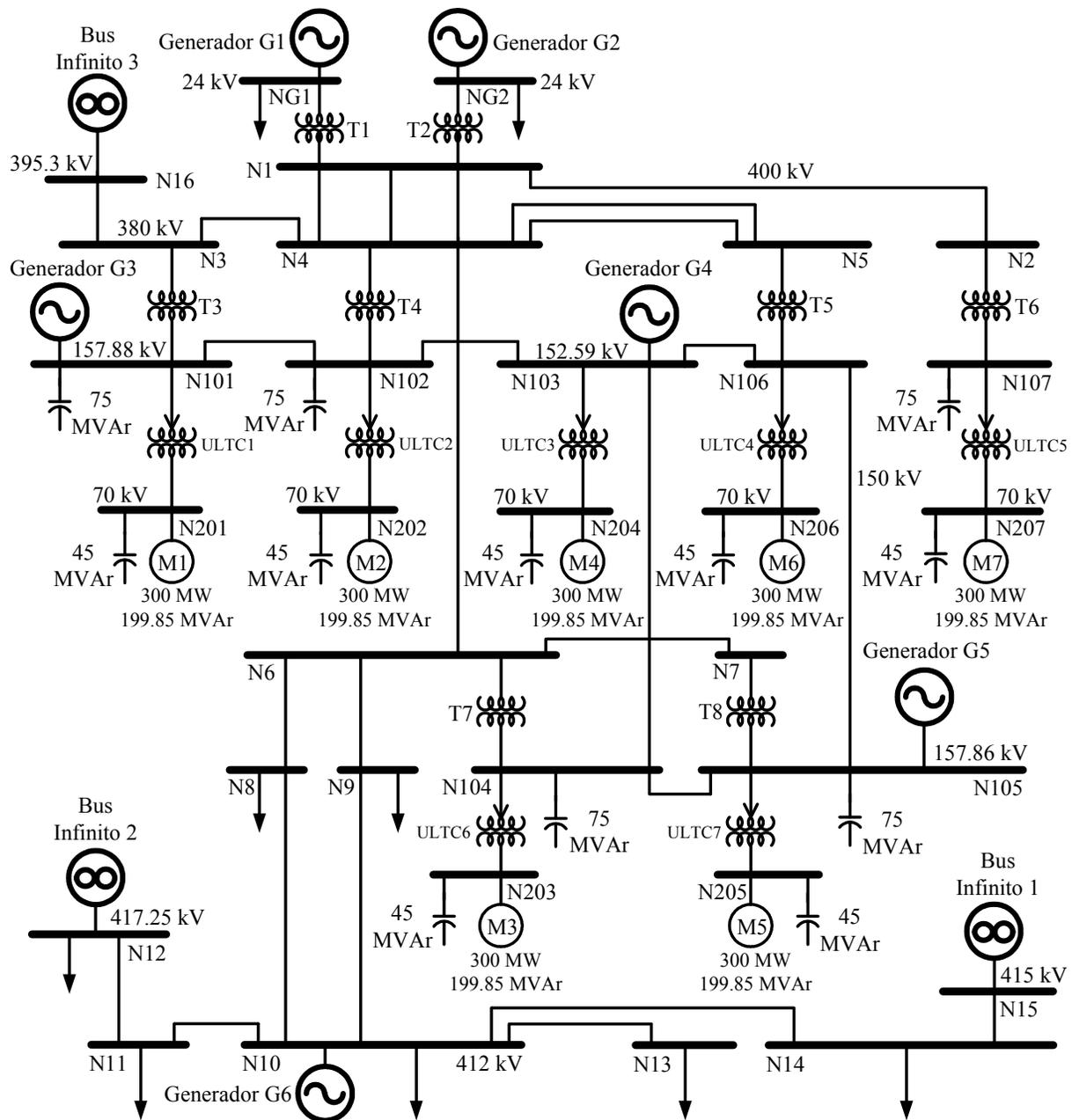


Fig. 3.2. Diagrama unifilar del sistema de prueba CIGRE 32-NODOS (Adaptado de [CIGRE, 1995]).

Con el objeto de determinar la magnitud del impacto en los resultados al considerar el modelo del motor de inducción en el estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo, a continuación, se presentan tres casos de este tipo de estudio para el sistema CIGRE de 32 nodos. En el primero de los casos solo se aumenta la carga estática del sistema y la carga de motores de inducción permanece sin alteraciones, en el segundo de los casos solo se aumenta la carga de motores de inducción y la carga estática del sistema permanece sin alteraciones, en el último de los casos, se aumenta la carga total del sistema (carga estática y motores). En todos los casos la carga estática del sistema fue representada con una característica de potencia constante.

5.4.4.1 Aumento de la carga estática del sistema CIGRE 32-Nodos: Caso 1

Para el análisis del sistema se optó por aumentar en este caso solamente la carga estática, la cual se encuentra en los nodos: NG1, NG2, N8 a N14. La carga estática suma alrededor de 2459 MW y 443 Mvars en el estado inicial del sistema, por su parte, la carga de motores de inducción suma alrededor de 2100 MW y 1398.95 Mvars. El aumento de carga fue compensado por todos los generadores, y repartido individualmente de acuerdo a la inercia de cada unidad. Se realizaron tres estudios completos de estabilidad de voltaje, es decir, un estudio por modelo estático del motor, y en cada estudio se obtuvo el nodo con el voltaje crítico. El criterio para determinar el máximo factor de cargabilidad del sistema estuvo dado por la capacidad del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para dar solución al sistema bajo cada incremento de carga.

En la Fig. 5.9 se muestran los resultados obtenidos por cada modelo para el comportamiento del voltaje del nodo crítico, que, en todos los casos fue el nodo N207. Esta figura fue obtenida de emplear el programa de simulación "FLUJOS".

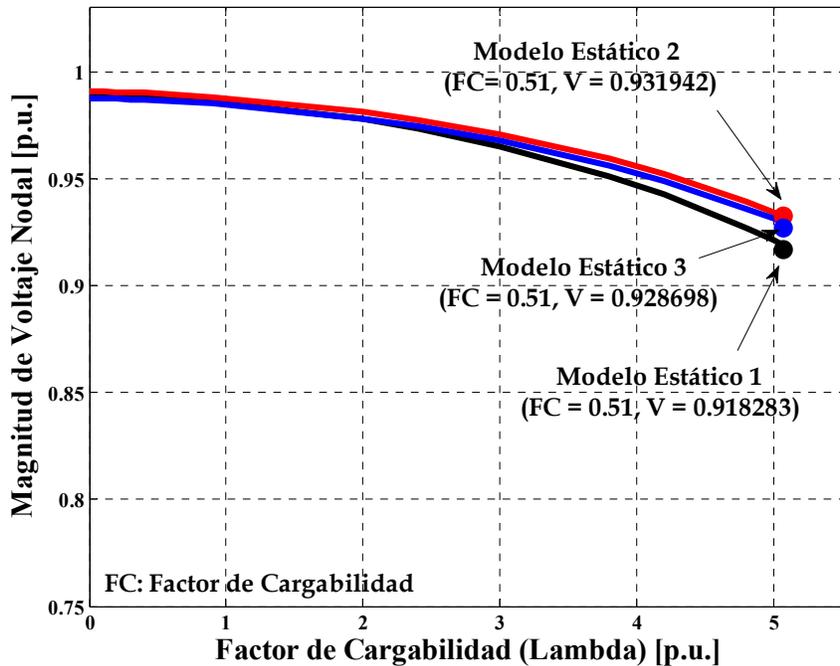


Fig. 5.9. Comportamiento del voltaje del nodo crítico N207 y máximo factor de cargabilidad obtenido por cada modelo estático del motor de inducción al aumentar solamente la carga estática del sistema de la Fig. 3.2.

Como se observa, en este caso, el impacto en los resultados al considerar el modelo del motor en el estudio es mínimo, comparado con la representación más común utilizada en estudios estáticos para representar este tipo de cargas (Modelo estático 1). Aunque, con los tres modelos se obtuvo el mismo factor máximo de cargabilidad ($\lambda = 0.51$), se presentan ciertas diferencias en cuanto al valor del voltaje obtenido por cada modelo.

Una de las razones de que no exista gran diferencia en los resultados mostrados en la Fig. 5.9, es debido a que gran parte de la carga estática se encuentra en los nodos de generación o cerca de estos.

5.4.4.2 Aumento de la carga de motores de inducción del sistema CIGRE 32-Nodos: Caso 2

Para este caso el estudio se realizó aumentando solo la carga de motores de inducción del sistema de la Fig. 3.2. El aumento de carga fue compensado por todos los generadores, y repartido individualmente de acuerdo a la inercia de cada unidad. Se realizaron tres estudios completos de estabilidad de voltaje, es decir, un estudio por modelo estático del motor, y en cada estudio se identificó el nodo con el voltaje crítico (para los tres casos fue el mismo nodo, el N207). El criterio para determinar el máximo factor de cargabilidad del sistema estuvo dado por la capacidad del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para dar solución al sistema bajo cada incremento de carga.

Para que las potencias de consumo de los motores de inducción bajo cada incremento de carga correspondieran a sus parámetros, se optó por cambiar la potencia base original de cada motor por su potencia base correspondiente al nuevo incremento de carga y después recalcular sus parámetros. Esto se realizó en cada incremento del factor de cargabilidad, de al procedimiento descrito en las referencias [Henriques et al., 2002, Martins et al., 2003].

En la Fig. 5.10, se muestra el comportamiento del voltaje del nodo crítico N207 con respecto al factor de cargabilidad para cada modelo estático del motor de inducción. Al igual que los casos anteriores, esta figura fue obtenida de emplear el programa de simulación "FLUJOS".

Como se observa en la Fig. 5.10, con el modelo estático 1 (que modela la carga de motores de inducción de una forma inadecuada) se obtienen resultados muy alejados a los obtenidos con los modelos estáticos 2 y 3 del motor de inducción, los cuales sí representan el comportamiento real del motor a variaciones lentas de su voltaje terminal.

También se puede observar el efecto de mejorar el condicionamiento de Y_{bus} en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson, ya que, aunque los modelos estáticos 2 y 3 conservan el mismo comportamiento hasta un factor de cargabilidad del sistema igual a 0.4, después de este factor de cargabilidad el modelo estático 2 ya no ofrece solución al sistema, mientras que el modelo estático 3 (el cual por su estructura cuenta con elementos en paralelo que pueden ser sumados a la diagonal de Y_{bus}), ofrece resultados hasta un factor de cargabilidad iguala a 0.51.

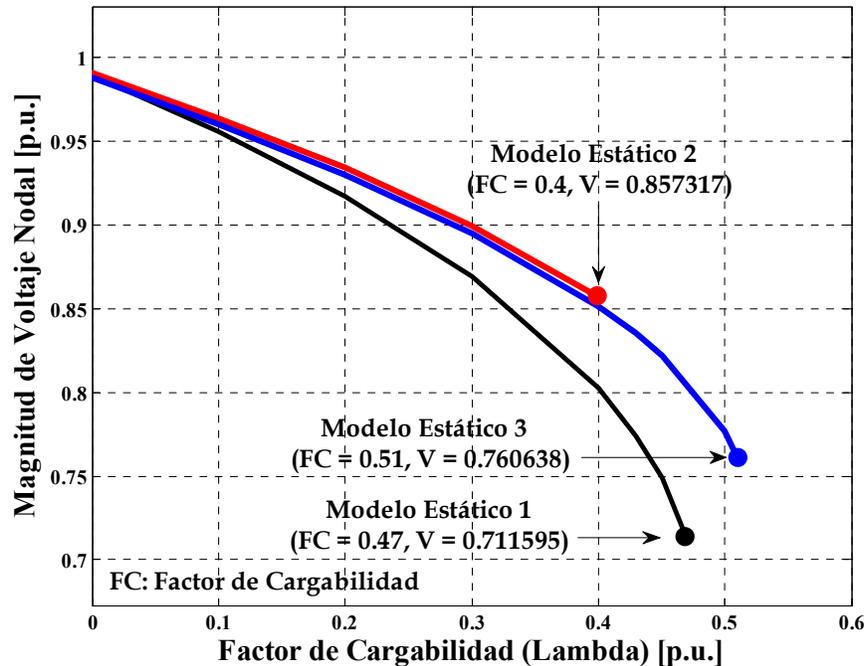


Fig. 5.10. Comportamiento del voltaje del nodo crítico N207 y máximo factor de cargabilidad obtenido por cada modelo estático del motor de inducción al aumentar solamente la carga de motores de inducción del sistema de la Fig. 3.2.

En este caso si existió gran diferencia entre los resultados al emplear cada modelo estático del motor de inducción. Es de esperarse que una representación inadecuada de este tipo de cargas en estudios estáticos arroje resultados incorrectos, esto debido a que gran parte de la carga de los SEP's esta conformada por motores de inducción, por lo que, para estudios estáticos y dinámicos es de suma importancia tener modelos que representen el comportamiento real del motor.

5.4.4.3 Aumento de la carga total del sistema CIGRE 32-Nodos: Caso 3

En este caso se aumentó la carga total del sistema, tanto la carga estática como la de motores de inducción. El aumento de carga fue compensado por todos los generadores, y repartido individualmente de acuerdo a la inercia de cada unidad. La carga estática fue representada con una característica de potencia constante, mientras que la carga de motores de inducción fue representada por sus respectivos modelos estáticos. Para el aumento de la carga de motores de inducción se siguió el mismo procedimiento descrito en el caso 2, en el cual, para cada incremento del factor de cargabilidad, se modificó la potencia base del motor y se recalcularon sus parámetros utilizando la nueva base, de acuerdo a [Henriques et al., 2002, Martins et al., 2003].

El criterio para determinar el máximo factor de cargabilidad estuvo dado por la capacidad del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para dar solución al sistema bajo cada incremento del factor de cargabilidad. La Fig. 5.11 muestra los resultados para este caso.

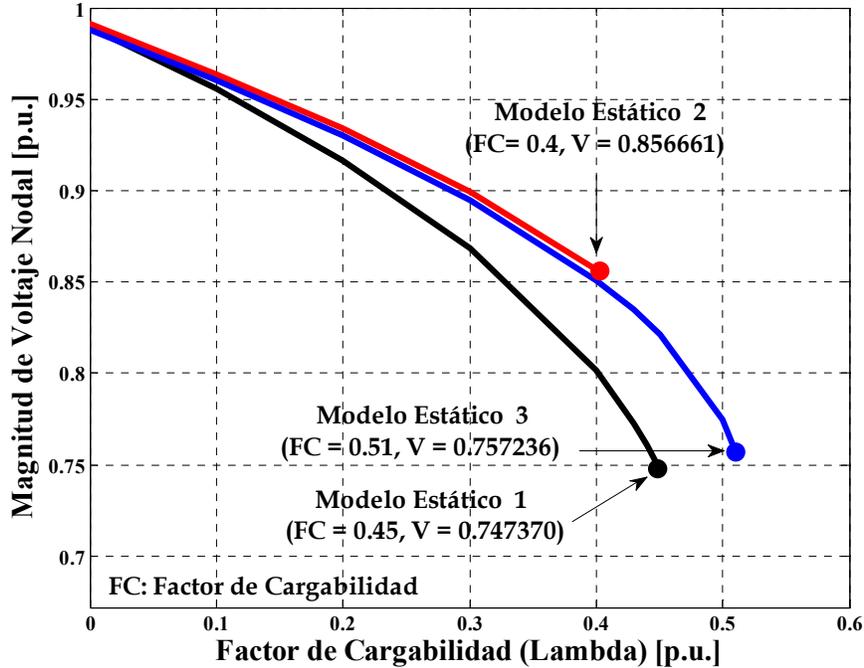


Fig. 5.11. Comportamiento del voltaje del nodo crítico N207 y máximo factor de cargabilidad obtenido por cada modelo estático del motor de inducción.

Al igual que en el caso 2, las diferencias entre los resultados obtenidos por cada modelo es significativa. El modelo estático 1 ofrece resultados muy alejados a los modelos estáticos 2 y 3 para el máximo factor de cargabilidad. Sin embargo los modelos estáticos 2 y 3, los cuales tienen la misma característica (potencia activa constante) tienen casi el mismo comportamiento hasta un factor de cargabilidad igual a 0.4, el cual es el máximo factor de cargabilidad para el modelo estático 2.

5.4.5 Validación Resultados del Sistema de Prueba CIGRE 32-Nodos con el Programa PSS/E®

De manera similar a las validaciones presentadas en § 3.4.3 y § 4.4.3, en esta sección se validan los resultados del modelo estático del motor que no modifica la matriz Jacobiana del sistema, ahora en el estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo empleando la técnica de las curvas *PV*. Se eligió realizar la validación de los resultados obtenidos con el programa FLUJOS para el caso de estabilidad de § 5.4.4.2, debido a que tanto el sistema de prueba como el estudio considerado en este caso son diferentes a los analizados en las dos validaciones anteriores.

El estudio anterior realizado en § 5.4.4.2 al sistema de la Fig. 3.2, se realizó utilizando el programa comercial "PSS/E®", obteniéndose los mismos resultados que con el programa "FLUJOS" al emplear los modelos estáticos 1 y 3 para representar la carga de motores de inducción. No fue posible utilizar el modelo estático 2, debido a que el programa PSS/E® no admite modificaciones de su código fuente.

En la Fig. 5.12 se muestra la comparación de resultados para el comportamiento del voltaje del nodo crítico N207 obtenido por los programas FLUJOS y PSS/E® para los modelos estáticos 1 y 3.

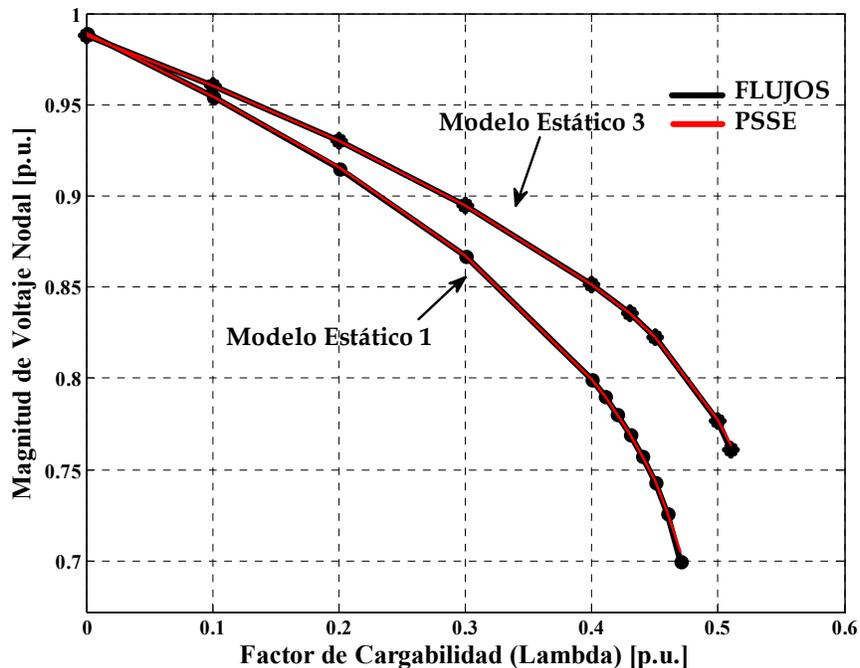


Fig. 5.12. Comparación de resultados para el voltaje del nodo crítico N207 obtenido por el programa FLUJOS y el programa PSS/E® para los modelos estáticos 1 y 3 del motor de inducción al aumentar solamente la carga de motores de inducción del sistema de la Fig. 3.2.

Como se observa en la Fig. 5.12 se obtuvieron exactamente los mismos resultados al emplear los modelos estáticos 1 y 3 en el programa FLUJOS y PSS/E®. De esta manera se comprueba la exactitud de los resultados de simulación del programa FLUJOS y se demuestra que el modelo 3 es una solución adecuada para la representación de cargas de motores de inducción en estudios estáticos del sistema donde no sea posible modificar el código fuente del programa.

5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se observa en las Figs. 5.6 a 5.12, el modelar la carga de motores de inducción con una característica de potencia constante, ofrece resultados erróneos del comportamiento real del sistema.

Aunque los modelos estáticos 2 y 3 tienen el mismo comportamiento hasta cierto valor del factor de cargabilidad, el modelo estático 2 en la mayoría de los casos no es capaz de dar solución al sistema para el máximo factor cargabilidad obtenido con el modelo estático 3. De los tres modelos estáticos, el modelo 2 es el que ofrece un factor de cargabilidad más bajo en la mayoría de los casos. Esto se debe a que toda la potencia aparente del motor es modelada como una simple inyección de potencia. Por

su parte, el modelo estático 3 es el que ofrece el mayor límite máximo de cargabilidad. Puede tomarse el resultado obtenido con este modelo como el más cercano al real límite máximo de cargabilidad del sistema, debido al análisis realizado en § 4.5.

La diferencia principal de resultados entre los modelos estáticos 2 y 3 radica en el condicionamiento de Y_{bus} , ya que mientras el modelo estático 2 no cuenta con elementos en paralelo que puedan sumarse a la matriz Y_{bus} del sistema utilizada en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson, el modelo estático 3, por su estructura, cuenta con dos elementos en paralelo que son sumados al elemento diagonal correspondiente a los nodos terminal e interno del modelo del motor de inducción en dicha matriz.

Podría modificarse el modelo estático 2 y obtener de las ecuaciones que conforman este modelo una admitancia que represente el consumo de potencia reactiva que no dependa directamente del deslizamiento y de esta manera poder mejorar el condicionamiento de Y_{bus} a la hora de utilizar este modelo en el estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson (por supuesto que las ecuaciones del modelo también tendrían que modificarse), pero aun así, habría la necesidad de modificar el código fuente del programa del estudio de flujos de potencia.

Como se explicó en el capítulo 4, un aspecto importante en la determinación del modelo estático del motor, es la determinación de la variable correcta a fijar para la solución de su circuito de estado estacionario (mostrado en la Fig. 2.1). También se aclaró que la forma correcta de modelar el motor en su región estable (la que comprende un voltaje terminal de 0.6 a 1 p.u., cuando el motor opera al 100% de su carga, [Vénikov, 1988, Taylor, 1994]), es considerar que su potencia activa es constante. Sin embargo, como se observó en los resultados anteriores, la estructura del modelo también es de gran importancia, ya que aunque los modelos 2 y 3 tienen la misma característica, su estructura es completamente deferente, lo cual lleva a obtener un comportamiento similar pero con resultados finales muy diferentes.

El modelo estático 3 propuesto en este trabajo representa de manera adecuada el comportamiento real del motor de inducción ante variaciones lentas de su voltaje terminal, por lo que se puede concluir que los resultados obtenidos de emplear este modelo en los estudios estáticos son los más cercanos al comportamiento real del sistema. Tiene la ventaja adicional de poder ser empleado en cualquier programa de simulación (incluyendo los programas comerciales), lo que permite que sea aplicado de manera sencilla a cualquier sistema que el programa de simulación pueda analizar (incluyendo sistemas de gran dimensión). Además, debido a su estructura, facilita la convergencia del programa de simulación al mejorar el condicionamiento de la matriz de admitancias del sistema (porque mejora la conexión con el nodo de referencia, como se menciona en § 3.2.1). Por estas ventajas, se recomienda su uso en simulaciones estáticas de sistemas de potencia.

CAPÍTULO 6:

CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo de tesis fue el análisis y el desarrollo de modelos del motor de inducción adecuados para estudios estáticos de sistemas de potencia. Este objetivo se logró adecuadamente, debido a que se hizo una revisión de todos los modelos estáticos que habían sido publicados hasta ahora y se propusieron dos modelos estáticos nuevos del motor de inducción, basados en su circuito equivalente de estado estacionario, que son adecuados para representar al motor en todas sus regiones de operación, que mejoran la convergencia de la solución del modelo completo del sistema y que pueden ser empleados en cualquier programa de simulación, manteniendo la exactitud requerida en la simulación del comportamiento del motor ante variaciones lentas de su voltaje en terminales.

En general se observó que los modelos estáticos del motor de inducción, propuestos hasta ahora, se podrían dividir en dos categorías principales:

- a) Modelos que mantienen la potencia activa constante.
- b) Modelos que mantienen el deslizamiento del rotor constante.

Ambos tipos de modelos fueron propuestos para representar al motor en su región estable de operación, en la cual mueve a su carga mecánica. Después de analizar las diferentes regiones de operación, se demostró en § 4.5 que ambos tipos de modelos principales son necesarios para representar al motor en todas las regiones de operación. En particular, los modelos con potencia activa constante son adecuados para simular la operación del motor en la región estable, mientras que los modelos con deslizamiento constante son los indicados para la región de paro del motor.

Se demostró que utilizar el modelo de carga estática con característica de potencia constante no es adecuado para representar el comportamiento del motor de inducción ante variaciones lentas de su voltaje en terminales. Esto se observó en todos los estudios. En los estudios de inicialización estos modelos fueron los únicos que requirieron una admitancia ficticia de ajuste (ver § 4.4), mientras que en los estudios

de estabilidad de voltaje de largo plazo (ver § 5.4), los valores del límite de operación fueron muy diferentes con respecto a los obtenidos con los modelos estáticos del motor.

Se verificó (ver § 3.4) que todos los modelos que mantienen la potencia activa constante, a pesar de sus diferencias en estructura e implementación en el modelo estático del sistema, tienen resultados muy similares entre sí. De manera parecida, los modelos que mantienen el deslizamiento constante son prácticamente equivalentes.

Como los resultados de los modelos de diferentes tipos fueron muy similares, la manera en la que se incluye el modelo estático del motor en el modelo del sistema de potencia tiene una gran importancia, porque en el caso de los modelos que no modifican la matriz Jacobiana del sistema se comprobó que pueden ser aplicados en cualquier programa de simulación sin perder la exactitud en la representación del motor. Estas dos características (exactitud y flexibilidad de modelado) fueron verificadas para todos los tipos de simulaciones estáticas consideradas en este trabajo (simulaciones de flujos de potencia § 3.4.3 y de estabilidad de voltaje de largo plazo con el método de las curvas *PV*, § 5.4.5, así como el proceso de inicialización de modelos dinámicos del motor para simulaciones en el tiempo § 4.4.3) comparando los resultados de las simulaciones realizadas con el programa FLUJOS con las del programa comercial PSS/E® versión 29, con los dos sistemas de prueba considerados en este trabajo.

En particular, los modelos propuestos en este trabajo mostraron una mejor convergencia obteniendo la solución del sistema en un número menor de iteraciones, y llegando a valores mayores de cargabilidad en el estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo, debido a que en su estructura incluyen impedancias en paralelo entre los nodos y la tierra que mejoran el condicionamiento de la matriz de admitancias de nodo y no se modelan como simples inyecciones de potencia hacia la red, como es el caso de los modelos que modifican el Jacobiano.

Los modelos estáticos 2 y 3, los cuales representan el comportamiento real del motor en su región estable, son adecuados para su utilización en la inicialización de modelos dinámicos del motor en estudios de estabilidad de voltaje de corto plazo. Cabe mencionar que se verificó que el método de inicialización 2 permanece como una solución adecuada a este problema (ver § 4.4).

Una conclusión relevante de este trabajo es que demuestra la importancia de desarrollar herramientas de simulación propias. El programa de simulación FLUJOS, aunque no está diseñado para analizar de manera eficiente sistemas de gran dimensión (por no contar con técnicas de solución y almacenamiento de sistemas dispersos) fue una gran ayuda en el desarrollo de esta investigación, permitiendo probar, utilizando las mismas técnicas de simulación todos los modelos estáticos del motor de inducción publicados anteriormente y propuestos en este trabajo.

6.2 APORTACIONES

- Se desarrollaron dos modelos estáticos nuevos (modelos 3 y 5) que son adecuados para su uso en cualquier tipo de programas y en especial en programas comerciales en los cuales no se puede modificar la matriz Jacobiana del sistema. Con estos modelos se puede simular de manera sencilla el motor en todas sus regiones de operación.
- Se describió de manera detallada la forma de incluir todos los modelos estáticos del motor de inducción en estudios de flujos de potencia, en la inicialización de modelos dinámicos del motor de inducción para estudios de estabilidad de voltaje de corto plazo y en estudios de estabilidad de voltaje de largo plazo.
- Todos los modelos descritos se incluyeron en el programa "FLUJOS", del Grupo de Investigación de Fenómenos Dinámicos de la SEPI-ESIMEZ, IPN.
- Se describieron y simuló detalladamente todas las regiones de funcionamiento del motor de inducción. Se demostró que ambos tipos de modelos principales son necesarios para representar al motor en todas sus regiones de operación. En particular, los modelos con potencia activa constante son adecuados para simular la operación del motor en la región estable, mientras que los modelos con deslizamiento constante son los indicados para la región de paro del motor.
- Haciendo referencia al circuito de estado estacionario del motor de inducción derivado del modelo dinámico de tercer orden, se demostró que tiene los mismos resultados numéricos que los modelos derivados del circuito equivalente en estado estacionario convencional.
- Todos los resultados de las simulaciones estáticas con los modelos que no modifican a la matriz Jacobiana del sistema se validaron con simulaciones en el programa PSS/E® de SIEMENS. Se validaron principalmente dos aspectos: la exactitud del modelo y su factibilidad de implementación en un programa comercial. Ambos aspectos fueron validados satisfactoriamente debido a que los resultados de ambos tipos de programas fueron idénticos en todos los casos.

6.3 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

- Es necesario simular el proceso de detención de motores de inducción mediante pruebas de laboratorio y comparar sus resultados con los obtenidos en simulaciones digitales empleando los modelos estáticos presentados en esta tesis. Esta simulación reforzaría los resultados publicados en [Taylor, 1994].

- Validar los resultados obtenidos para las curvas *PV* al emplear los modelos desarrollados en este trabajo con los resultados obtenidos del comportamiento real del sistema, para lo cual podría utilizarse el simulador experimental de SEP's.
- Los modelos de motores propuestos en este trabajo se pueden emplear para representar motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla (reales o equivalentes) en estudios estáticos de sistemas de potencia a nivel de la red de transmisión en los que se considere que el sistema opera de forma balanceada y, por lo tanto, utilice una representación monofásica del sistema como es el caso de programas de simulación que flujos de potencia, programas de análisis de contingencias, programas de determinación del estado de operación de postdisturbio del sistema, programas de flujos de potencia de continuación, programas de simulación cuasi-estacionaria en el tiempo, programas de flujos de potencia óptimos y otros.
- Se debe verificar el desempeño de los modelos de motores desarrollados en este trabajo en estudios estáticos empleando modelos detallados de todos los componentes del sistema (generadores y sus controles, compensadores estáticos de vars, etc.) para verificar su efecto en la determinación de los límites de operación del sistema.
- Aunque se ha reportado que la diferencia principal no está en la estructura del rotor sino en el tipo de carga mecánica que mueven (par constante, ventilador u otras), se pueden investigar la aplicación de modelos de máquinas de inducción trifásicas con doble jaula de ardilla o rotor de barra profunda para desarrollar modelos equivalentes de carga, al nivel de la red de transmisión para que sean utilizados en estudios estáticos de sistemas de potencia.
- Debido a que se ha reportado un aumento importante de su influencia en el comportamiento del sistema en estado estacionario y dinámico (y para completar la representación estática del modelo de carga estándar propuesto por la WECC), se deben desarrollar modelos de motores de inducción monofásicos para representar cargas agregadas de aire acondicionado.
- Debido a que ha sido reconocida tradicionalmente como una parte importante en el modelado de cargas en sistemas eléctricos de potencia, y a que actualmente es muy necesaria para reproducir el comportamiento registrado del sistema durante apagones (al menos en el caso de la WECC, en el que se ha estudiado más seriamente) se deben desarrollar trabajos en la determinación de parámetros de modelos equivalentes de cargas agregadas, estáticas y dinámicas. Debido a las características propias de la carga (su gran variabilidad en estructura y magnitud), esta tarea permanece como un área abierta de

investigación que hasta el día de hoy no ha tenido una solución satisfactoria, pero que es de gran interés práctico para mejorar de manera importante la toma de decisiones en los contextos de planeación y operación del sistema de potencia.

REFERENCIAS

- [Anderson et al., 1990] P. M. Anderson, B. L. Agrawal and J. E. Van Ness. *Subsynchronous Resonance in Power Systems*. IEEE Press, New York, USA, 1990.
- [Anderson et al., 2005] G. Andersson, P. Donalek, R. Farmer, N. Hatzargyriou, I. Kamwa, P. Kundur, N. Martins, J. Paserba, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, R. Schulz, A. Stankovic, C. Taylor, and V. Vittal. “Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 4, pp. 1922-1928, November 2005.
- [Aromataris, et al., 2005] Luis Aromataris, Jorge Martínez, Gustavo Rodríguez, Diego Moitre. “Modelo del Motor de Inducción para Estudios Estáticos de Estabilidad de Tensión de Largo Plazo”. *Memorias del Undécimo Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré (ERLAC)*, Ciudad del Este Paraguay, 2005.
- [Arrillaga and Arnold, 1990] Arrillaga, J; Arnold, C.P. *Computer Analysis of Power Systems*. John Wiley & Sons, 1a Edición, 1990.
- [Balanathan et al., 2002] R. Balanathan, N. C. Pahalawaththa and U. D. Annakkage. “Modelling Induction Motor Loads for Voltage Stability Analysis”. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp. 469-480, No. 24, 2002.
- [Berizzi et al., 1995] A. Berizzi, P. Bresesti, P. Marannino, M. Montagna, S. Corsi, and G. Piccini. “Security Enhancement Aspects in the Reactive-Voltage Control”. *Proceedings of Stockholm Power Tech*, Stockholm, June 1995.
- [Bettiol, 2000] A. Bettiol. *Maximum Power Transfer in Transient Stability-Constrained Power Systems: Application to a Brazilian Power Network*. Dépôt légal D/2000/0480/4, ISSN 0075-9333. Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées No. 213. Institut de mécanique et génie civil, Université de Liège, Liège, BELGIQUE, Janvier 2000.
- [Carmona-Sánchez and Ruiz-Vega, 2010] J. Carmona-Sánchez and D. Ruiz-Vega. “Review of Static Induction Motor Models”. *Proceedings of the North American Power Symposium, NAPS 2010*. 25-29 September 2010, Arlington, Texas, USA.
- [Carmona y Ruiz, 2009] J. Carmona Sánchez y D. Ruiz Vega. “Revisión de Modelos Estáticos del Motor de Inducción”. *Memorias del 11º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas CNIES 2009*, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. Noviembre 9-13, 2009.
- [Carmona y Ruiz, 2010] J. Carmona Sánchez y D. Ruiz Vega. “Simulación del Proceso de Detención de los Motores de Inducción Utilizando Modelos Estáticos”. *Memorias de la Reunión de Verano de Potencia del IEEE Sección México, RVP 2010*. 11 – 17 Julio 2010, Acapulco Guerrero, Mexico.
- [Chin, 2006] G. L. Chin. “Modeling Stalled Induction Motors”. *Proceedings of the 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, May 21-24, 2006, Dallas Texas USA.
- [CIGRE, 1995] CIGRE Task Force 38.02.08. “Long Term Dynamics, Phase II”. Final Report. *Technical Brochure No. 102*. March, 1995.

- [Da Costa and Da Silva, 1998] V. F. da Costa and L. C. P. da Silva. “Voltage Stability Including Detailed Induction Motor Models”. *Proceedings of the Midwest Symposium on Circuits and Systems*. Pages 203-206, 9 -12 Aug. 1998, Notre Dame, IN, USA.
- [De Leon II and Taylor, 2002] J. A. Diaz de Leon II and C. W. Taylor. “Understanding and Solving Short-Term Voltage Stability Problems”. *Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting*, Vol. 2, Pages 745-752, July 2002, Chicago, IL, USA.
- [Dizdarevic, 2001] N. Dizdarevic. *Unified Power Flow Controller in Alleviation of Voltage Stability Problem*, Ph.D. thesis, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Dept. Power Systems, October 2001
- [Dominguez, 2008] S. Domínguez Becerril. *Métodos de Análisis de Sensibilidad para la Evaluación de la Estabilidad de Voltaje de Sistemas Eléctricos de Potencia*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica presentada el 18 de Noviembre del 2008 en la SEPI-ESIME-Zacatenco, IPN.
- [Ejebe et al., 1998] G. C. Ejebe, J. Tong, J. G. Waight, J. G. Frame, X. Wang, W. F. Tinney. “Available Transfer Capability Calculations”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 4, pp. 1521-1527, November 1998.
- [Elgerd, 1982] O. I. Elgerd. *Electric Energy Systems Theory : An Introduction*. McGraw Hill, Second Edition., 1982.
- [EPRI, 1987] Electric Power Research Institute. “Load modeling for power flow and transient stability computer studies”. *Final Rep. EPRI EL-5003*, vol. I, Jan. 1987.
- [EPRI, 1994] Electric Power Research Institute. “Extended transient-midterm stability program (ETMSP), Version 3.1: vol. 2, User’s manual (Revision 1)”. *Final Rep. EPRI TR-102 004-V2R1*, May 1994.
- [García, 2007] Mario Alberto García Domínguez (2007). *Modelo de Equilibrio del Generador Síncrono con Controles Primarios para Estudios de Simulación Cuasi-Estacionaria en el Tiempo*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica presentada el 19 de Diciembre de 2007 en la SEPI-ESIME-Zacatenco, IPN.
- [Henriques et al., 2002] R. Mota Henriques, N. Martins and J. C. R. Ferraz. “Impact of Induction Motor Loads into Voltage Stability Margins of Large Systems”. *Proceedings of the 14th Power Systems Computation Conference (PSCC), Session 38*, Paper 1, pp 1-6, 24th -28th June 2002, Sevilla, España.
- [IEEE, 1982] IEEE Task Force on Terms & Definitions, Power System Dynamic Performance Subcommittee. “Proposed Terms and Definitions for Power System Stability”. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 7, pp. 1894-1898, July, 1982.
- [IEEE, 1991] IEEE Power Engineering Society. “IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Studies”. *IEEE Std.* pp. 1110-1991, Nueva York, N.Y., EUA. 1991.
- [IEEE, 1993] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. “Load Representation for Dynamic Performance Analysis”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No 2, pp. 472-482, May 1993.
- [IEEE, 1995] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, System Dynamic Performance Subcommittee Power system Engineering Committee. “Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 1302-1313, August 1995.

- [IEEE, 2001] IEEE/PES Power Systems Stability Subcommittee Report on “Voltage Stability Assessment, Procedures and Guides”. C. A. Cañizares (Editor). Final Draft, January 2001. Disponible en Internet por demanda en: <http://www.power.uwaterloo.ca/~claudio/claudio.html>.
- [IEEE, 2004] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Cañizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal. “Definition and Classification of Power System Stability”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, May 2004.
- [IRHQ, 1995] Institute de Recherche d’Hydro Québec. “Programme de Stabilité ST600 version 403.1”. Tech. Rep., Manuel d’Utilization, Jan. 1995.
- [Kimbark, 1956] E. W. Kimbark. *Power System Stability, Vol. 3: Synchronous Machines*. Dover Publications Inc., Nueva York, N.Y. EUA. 1956.
- [Kosterev et al., 1999] D. N. Kosterev, C. W. Taylor, W. A. Mittelstadt. “Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, August 1999.
- [Kosterev and Melkin, 2006] D. Kosterev, A. Meklin. “Load Modeling in WECC”. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2006, PSCE 06. Oct. 29 -Nov. 1 2006, Atlanta, Georgia, USA.
- [Kundur, 1994] P. Kundur. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [Lesieutre et al., 2010] B. Lesieutre, R. Bravo, R. Yinger, D. Chassin, H. Huang, N. Lu, I. Hiskens, G. Venkataramanan. *Load Modeling Transmission Research*. Final Project Report, Prepared for CIEE By Lawrence Berkeley National Laboratory. Date: March, 2010.
- [Li et al, 2006] S. H. Li, H. D. Chiang and S. Liu. “Analysis of Composite Load Models on Load Margin of Voltage Stability”. *Proceedings of the International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006*. Page(s):1 – 7, Oct. 2006, Chongqing, CHINA.
- [Liu et al., 1997] Y.-H. Liu, W.-J. Lee and M.-S. Chen. “Incorporating Induction Motor Model in a Load Flow Program for Power System Voltage Stability Study”. *Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*. pp TC3/7.1 – TC3/7.3, 18 -21 May 1997. Milwaukee, WI, USA.
- [López, 2006] E. López Luis. *Análisis de las Estabilidad de Voltaje de Sistemas Eléctricos de Potencia Utilizando el Método de Flujos de Potencia de Continuación*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica presentada el 25 de Septiembre del 2006 en la SEPI-ESIME-Zacatenco, IPN.
- [López-Luis et al., 2007] E. López-Luis, M. A. García-Domínguez and D. Ruiz-Vega. “The Effect of Improved System Modeling in the Continuation Power Flow Method”. *Proceedings of the IREP Symposium 2007, Bulk Power System Dynamics and Control VII- "Revitalizing Operational Reliability"*, August 19-24 2007, Charleston South Carolina, USA.
- [Mahyavanshi and Radman, 2006] B. Mahyavanshi and G. Radman. “A Study of Interaction Between Dynamic Load and STATCOM”. *Proceedings of the 38th Southeastern Symposium on System Theory*, March 5-7, 2006, Tennessee Technological University, Cookeville, TN, USA.
- [Martins et al., 2003] N. Martins, R. Mota Henriques and A. de A. Barbosa. “Impact of Induction Motor Loads in System Loadability Margins and Damping of Inter-area Modes”. *Proceedings of the IEEE PES General Meeting*, Vol. 3, Page ,13-17 July, 2003.
- [Morison et al., 2003] K. Morison, H. Hamadani and L. Wang. “Practical Issues in Load Modeling for Voltage Stability Studies”. *Proc. of the IEEE PES General Meeting*, 13th-17th July, 2003, Toronto, Canada.

- [Mota et al., 2002] R. Mota Henriques, N. Martins and J. C. R. Ferraz. "Impact of Induction Motor Loads into Voltage Stability Margins of Large Systems". *Proc. Of the 14th PSCC, Session 38*, Paper 1, pp 1-6, 24th - 28th June 2002, Sevilla, España.
- [Nath, 2008] S. Nath. "Dynamic Behavior of Induction Motor Under Static Inverter Supply". *TIG Research Journal*, Vol. 1, No. 1, May 2008.
- [Omata and Uemura, 1998] T. Omata and K. Uemura. "Aspects of Voltage Response of Induction Motor Loads". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 4, November 1998.
- [Pereira et al., 2002] L. Pereira, D. Kosterev, P. Mackin, D. Davies, J. Undrill and W. Zhu. "An Interim Dynamic Induction Motor Model for Stability Studies in the WSCC". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 4, November 2002.
- [Popovic et al., 1998] D. H. Popovic, I.A. Hiskens and D. J. Hill. "Stability Analysis of Induction Motor Networks". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 20, No. 7, pp. 475-487, October, 1998.
- [Pourbeik, 2010] P. Pourbeik. "Approaches to Validation of Power System Models for System Planning Studies". *Proceedings of the IEEE PES General Meeting 2010*, July 25 – 29, 2010, Minneapolis Minnesota, USA.
- [Powell and Radman, 2007] J. Powell and G. Radman. "Initialization for Dynamic Simulation of Stressed Power Systems Considering Induction Motor Components of Loads". *Proceedings of the 39th North American Power Symposium*, 30 September-2 October 2007, Las Cruces, New Mexico, USA.
- [PSS/E 29, 2002] PSS/E 29 Program Application Guide. Tech. Rep., PTI, Schenectady, NY, vol. 2, Oct., 2002.
- [Ruiz and Olguín, 1995] Daniel Ruiz Vega, Daniel Olguín Salinas. "Modelos matemáticos de la máquina de inducción para estudios de flujos de potencia y de estabilidad a grandes disturbios". Reporte interno No. SEPI-IE95-04 Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME - IPN. México D.F.
- [Ruiz y Olguín, 1997] D. Ruiz Vega y D. Olguín Salinas (1997). "Programa de Computadora Digital para Estudios de Flujos de Potencia: Estudio Básico Empleando el Método de Newton-Raphson en Forma Polar". Reporte interno No. SEPI-IE97-03. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME – Zacatenco, IPN. México D.F.
- [Ruiz, 1996] D. Ruiz. *Efecto de los Modelos de Motores de Inducción en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica presentada el 2 de Febrero de 1996 en la SEPI-ESIME-Zacatenco, IPN.
- [Ruiz-Vega and Enríquez-Harper, 2005] D. Ruiz-Vega, G. Enríquez-Harper. "The Effect of Power System Dynamic Modeling in the Analysis of Poorly Damped Oscillations". *Memorias del Undécimo Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré (ERIAC)*, Ciudad del Este Paraguay, 2005.
- [Ruiz-Vega et al., 1999] D. Ruiz-Vega, T. I. Asiaín and D. Olguín. "A Method for Initializing Induction Motors Modeling During Power System Transient Stability Studies". *Proceedings of the International Electric Machines and Drives Conference IEEE IEMDC'99*. Paper No. 1158, Technical session MO1, May 9-12, Seattle Washington, USA.
- [Ruiz-Vega et al., 2002] D. Ruiz-Vega, T. I. Asiaín, D. Olguín-Salinas. "An Approach to the Initialization of Dynamic Induction Motor Models". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 3, pp 747-751, August 2002.
- [Ruiz-Vega, 2002] Daniel Ruiz-Vega. *Dynamic Security Assessment and Control: Transient and Small Signal Stability*. Dépôt légal D/2002/0480/19, ISSN 0075-9333. Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées No. 213. Institut de mécanique et génie civil, Université de Liège, Liège, BELGIQUE, Juin 2002.

- [Stagg and El-Abiad, 1968] G. W. Stagg and H. El-Abiad. *Computer Methods in Power System Analysis*. McGraw Hill, 1968.
- [Stott, 1974] B. Stott. "Review of Load-Flow Calculation Methods". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, No. 7, pp 916-929, 1974.
- [Taylor, 1994] C. W. Taylor. *Power System Voltage Stability*. McGraw Hill, 1994.
- [Van Cutsem and Vournas, 1998] T. Van Cutsem and C. Vournas. *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [Van Cutsem, 2000] Th. Van Cutsem. "Voltage Instability: Phenomena, Countermeasures and Analysis Methods". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No 2, February, 2000.
- [Vénikov, 1988] V. Vénikov. *Procesos Transitorios Electromecánicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia*. MIR, Traducción del Ruso, 1988.
- [Vournas and Manos, 1998] C. D. Vournas, G. A. Manos. "Modelling of Stalling Motors During Voltage Stability Studies". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 3, August 1998.

APÉNDICE A:

DATOS Y ESTADO INICIAL DEL SISTEMA DE PRUEBA TAYLOR DE 10 NODOS

A. 1. DATOS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS

Este sistema, mostrado en la fig. 3.1, está compuesto por 3 generadores síncronos y 10 nodos, además de dos cargas de diferentes tipos que son alimentadas desde un nodo de 500 kV en el área de carga. Una carga es de tipo industrial, representada por dos motores de inducción (M1 y M2), la otra carga esta compuesta por una carga estática de 1500 MW y un motor de inducción de 1500 MW (representando una combinación de carga residencial y comercial respectivamente).

A continuación se presentan para el Sistema Eléctrico de Potencia Taylor 10-Nodos los datos de nodos de generación (Tabla A.1), líneas de transmisión (Tabla A.2), de transformadores (Tabla A.3) y los datos de los motores de inducción (Tabla A.4).

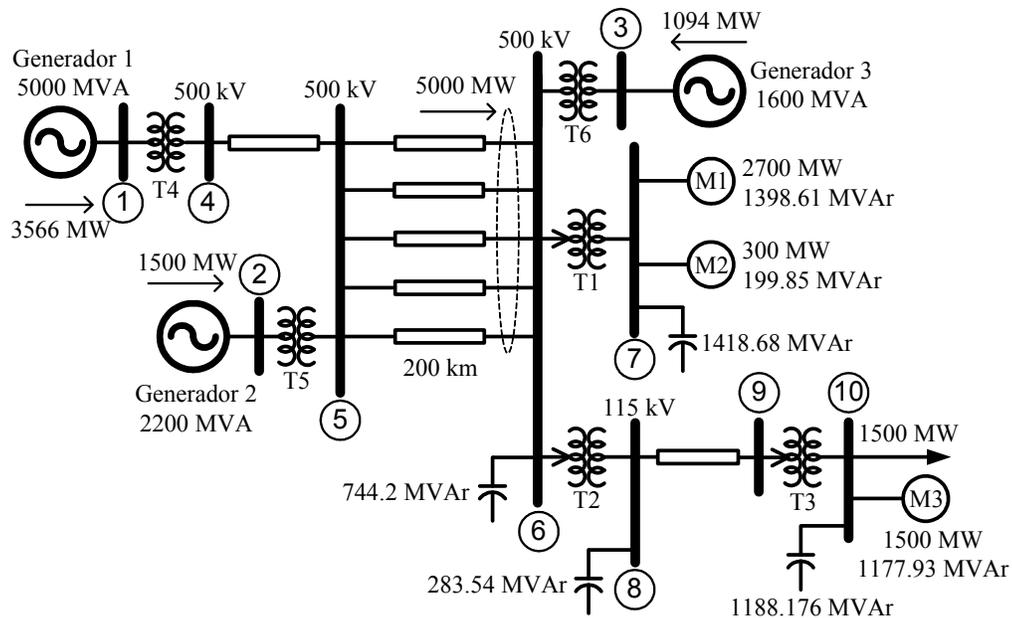


Fig. 3.1. Sistema de prueba Taylor 10-Nodos (Adaptado de [Taylor, 1994]).

TABLA A.1. Datos de nodos de generación del SEP Taylor 10-Nodos en p.u. a 100 MVA

Elemento	Nodo i	VT (p.u.)	Vbase kV	Límites de Potencia Reactiva	
				Qmin	Qmax
Generador 1	1	0.980	13.2	Nodo Slack	Nodo Slack
Generador 2	2	0.964	13.2	-2.00	7.25
Generador 3	3	0.972	13.2	-2.00	7.00

TABLA A.2. Datos de líneas del SEP Taylor 10-Nodos en p.u. a 100 MVA

Elemento	Nodos Terminales		Impedancia Serie		B/2	Circuito
	Nodo i	Nodo j	R	X		
Línea 1	4	5	0.0000000	0.0034294	0.0000	1
Línea 2	5	6	0.0012860	0.0246914	1.3681	1
Línea 3	5	6	0.0012860	0.0246914	1.3681	2
Línea 4	5	6	0.0012860	0.0246914	1.3681	3
Línea 5	5	6	0.0012860	0.0246914	1.3681	4
Línea 6	5	6	0.0012860	0.0246914	1.3681	5
Línea 7	8	9	0.0008592	0.0028641	0.0000	1

TABLA A.3. Datos de transformadores del SEP Taylor 10-Nodos en p.u. a 100 MVA

Elemento	Nodos Terminales		Impedancia Serie		Tap		Relación de Transformación
	Nodo i	Nodo j	R	X	Mag.	Áng.	
Transf. 1	6	7	0.000	0.002920	0.9853	0.000	525/13.8-kV
Transf. 2	6	8	0.000	0.002889	0.9906	0.000	525/115-kV
Transf. 3	9	10	0.000	0.001000	0.9744	0.000	115/13.8-kV
Transf. 4	1	4	0.000	0.002000	0.9657	0.000	13.2/540-kV
Transf. 5	2	5	0.000	0.004500	0.9552	0.000	13.2/540-kV
Transf. 6	3	6	0.000	0.006020	0.9539	0.000	13.2/530-kV

TABLA A.4. Parámetros de los motores de inducción en p.u. a 100 MVA base

Motor	P	H	Rr	Rs	Xr	Xs	Xm	s ₀
M1	27	50.620	0.0003	0.0004	0.0050	0.0020	0.1126	0.008811
M2	3	3.5000	0.0036	0.0062	0.0360	0.0200	0.6400	0.011998
M3	15	8.3448	0.0024	0.0023	0.0031	0.0037	0.0880	0.040063

A.2 CONDICION INICIAL DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS EMPLEANDO LOS DIFERENTES MODELOS ESTATICOS DEL MOTOR DE INDUCCION EN EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA

A.2.1 Resultados empleando el Modelo 1

Como ya antes se mencionó, para este modelo la potencia activa y reactiva de consumo del motor de inducción se modela con una característica de potencia constante (se fija P y Q) durante todo el estudio de flujos de potencia. En la Fig. A.1 se muestran los resultados del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para el sistema de la Fig. 3.1 modelando la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10 con una característica de potencia constante. Todos los resultados del estudio están en p.u. a una base de 100 MVA.

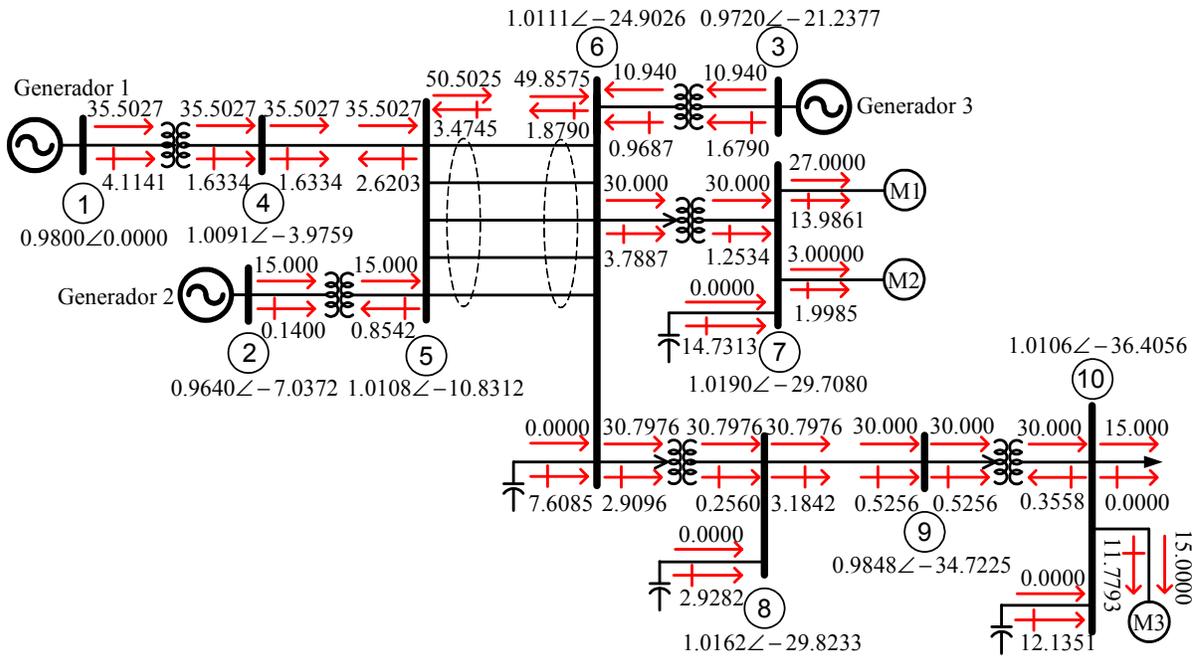


Fig. A.1. Resultados del estudio de flujos de potencia en p.u a 100 MVA empleando el Modelo 1 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10 del sistema de la Fig. 3.1.

A.2.2 Resultados empleando el Modelo 2

En la Fig. A.2 se muestran los resultados del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson del sistema de la Fig. 3.1 empleando el Modelo 2 del motor de inducción para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10. Todos los resultados del estudio están en p.u a una base de 100 MVA.

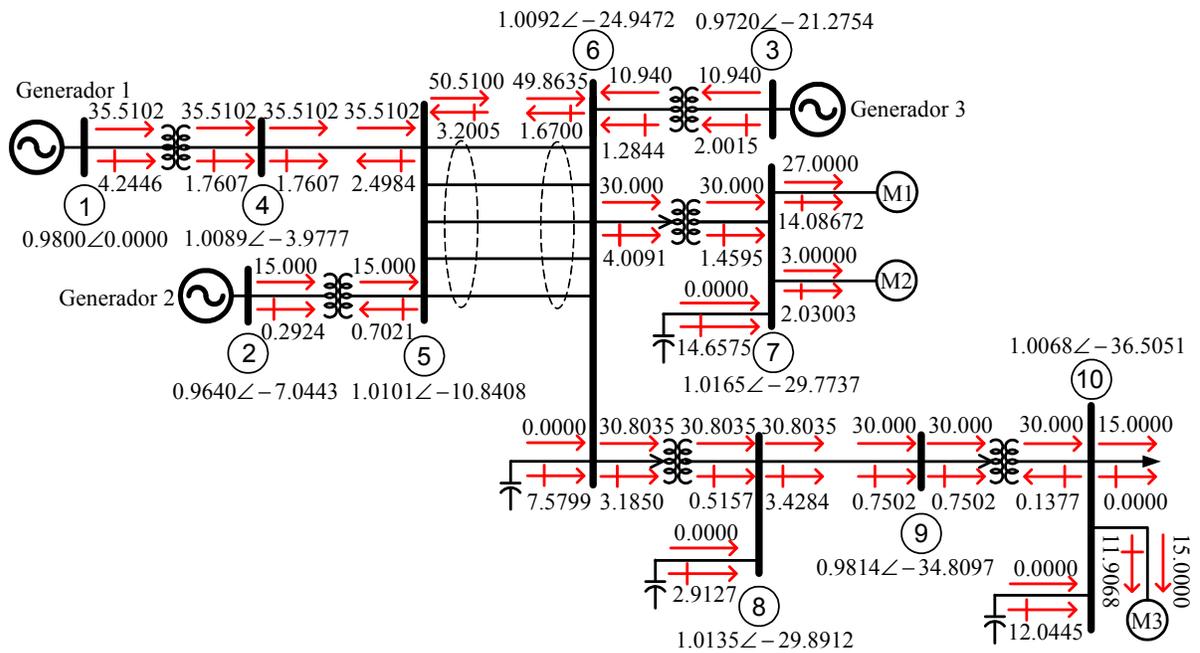


Fig. A.2. Resultados del estudio de flujos de potencia en p.u a 100 MVA empleando el Modelo 2 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10 del sistema de la Fig. 3.1.

A.2.3 Resultados empleando el Modelo 3

En la Fig. A.3 se muestran los resultados del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para el sistema de la Fig. 3.1 empleando el Modelo 3 del motor de inducción, en esta figura además se representan los flujos de potencia internos y voltajes nodales correspondientes al Modelo 3 para los motores conectados a los nodos 7 y 10.

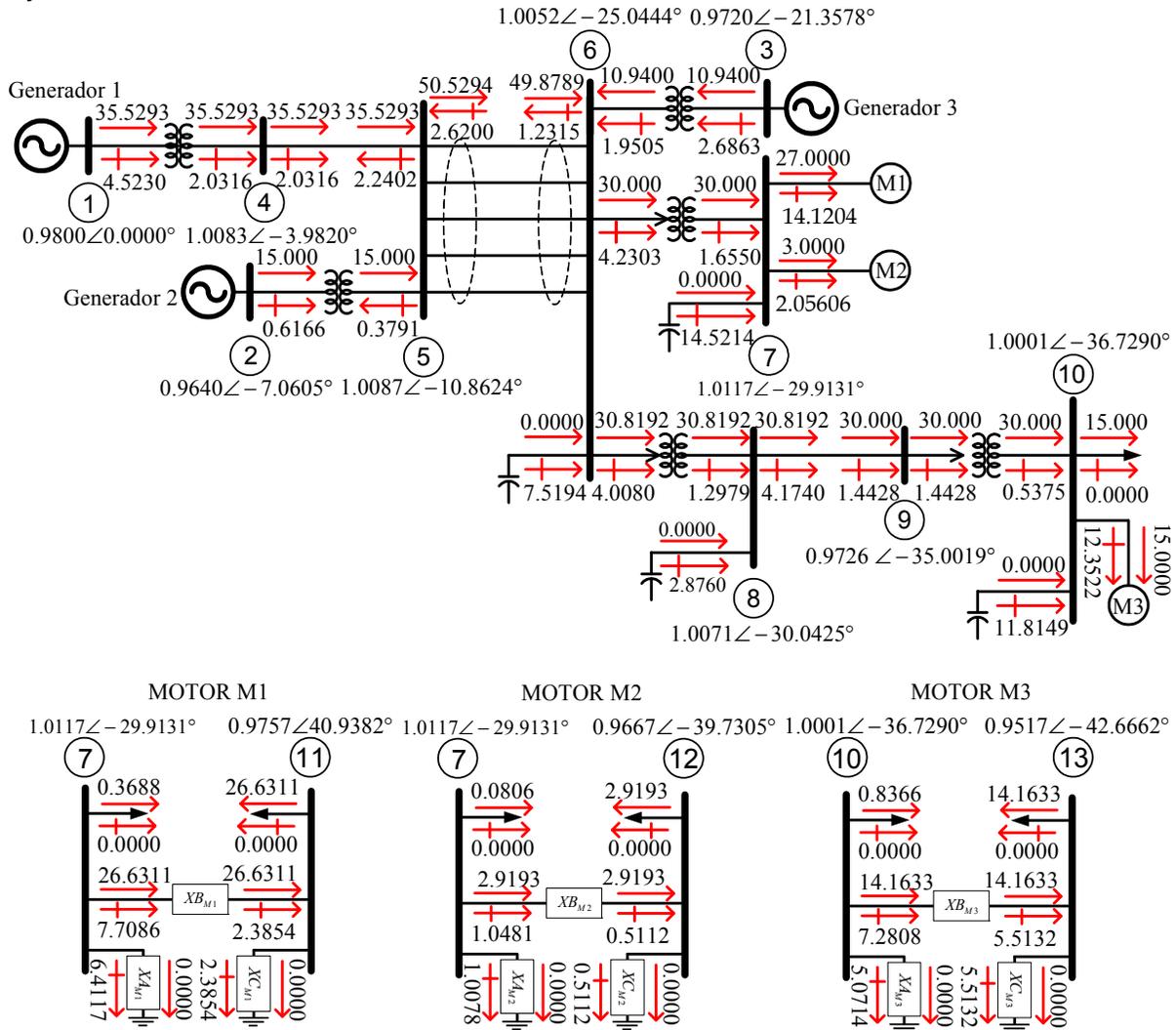


Fig. A.3. Resultados del estudio de flujos de potencia en p.u a 100 MVA empleando el Modelo 3 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10 del sistema de la Fig. 3.1.

A.2.4 Resultados empleando el Modelo 4

La Fig. A.4 muestra los resultados del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para el sistema de prueba mostrado en la Fig. 3.2 utilizando el Modelo 4 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10. Todos los resultados de la Fig. A.4 están en p.u. a 100 MVA base.

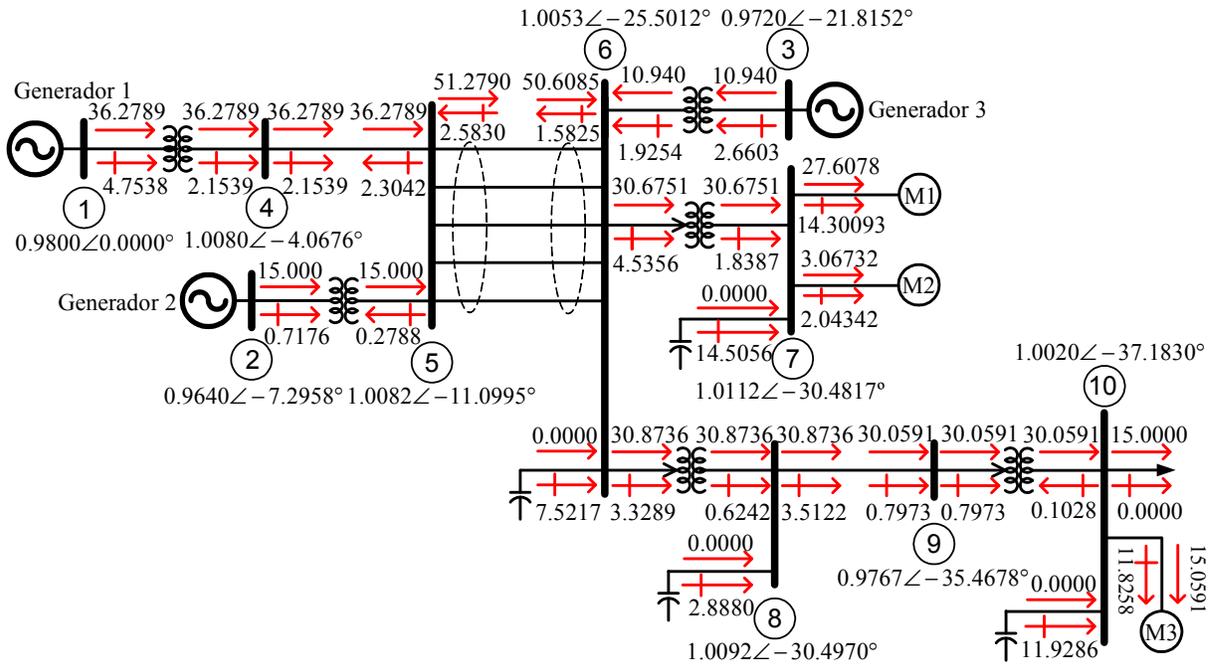


Fig. A.4. Resultados del estudio de flujos de potencia en p.u. a 100 MVA empleando el Modelo 4 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10 del sistema de la Fig. 3.1.

A.2.5 Resultados empleando el Modelo 5

La Fig. A.5 muestra los resultados del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para el sistema de prueba mostrado en la Fig. 3.1 utilizando el Modelo 5 para representar la carga de motores de los nodos 7 y 10. Todos los resultados de la Fig. A.5 están en p.u. a 100 MVA base.

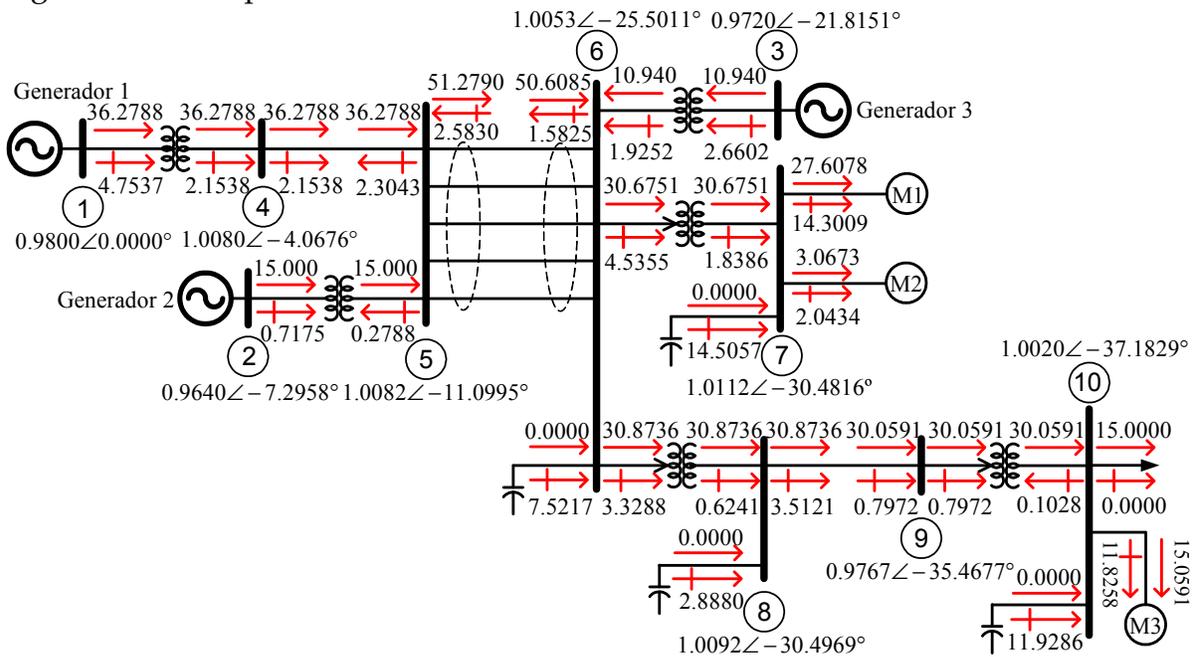


Fig. A.5. Resultados del estudio de flujos de potencia en p.u. a 100 MVA empleando el Modelo 5 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10 del sistema de la Fig. 3.1.

A.2.6 Resultados empleando el Modelo 6

La Fig. A.6 muestra los resultados del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para el sistema de la Fig. 3.1 empleando el Modelo 6 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10. Todos los resultados del estudio están en p.u. a 100 MVA base.

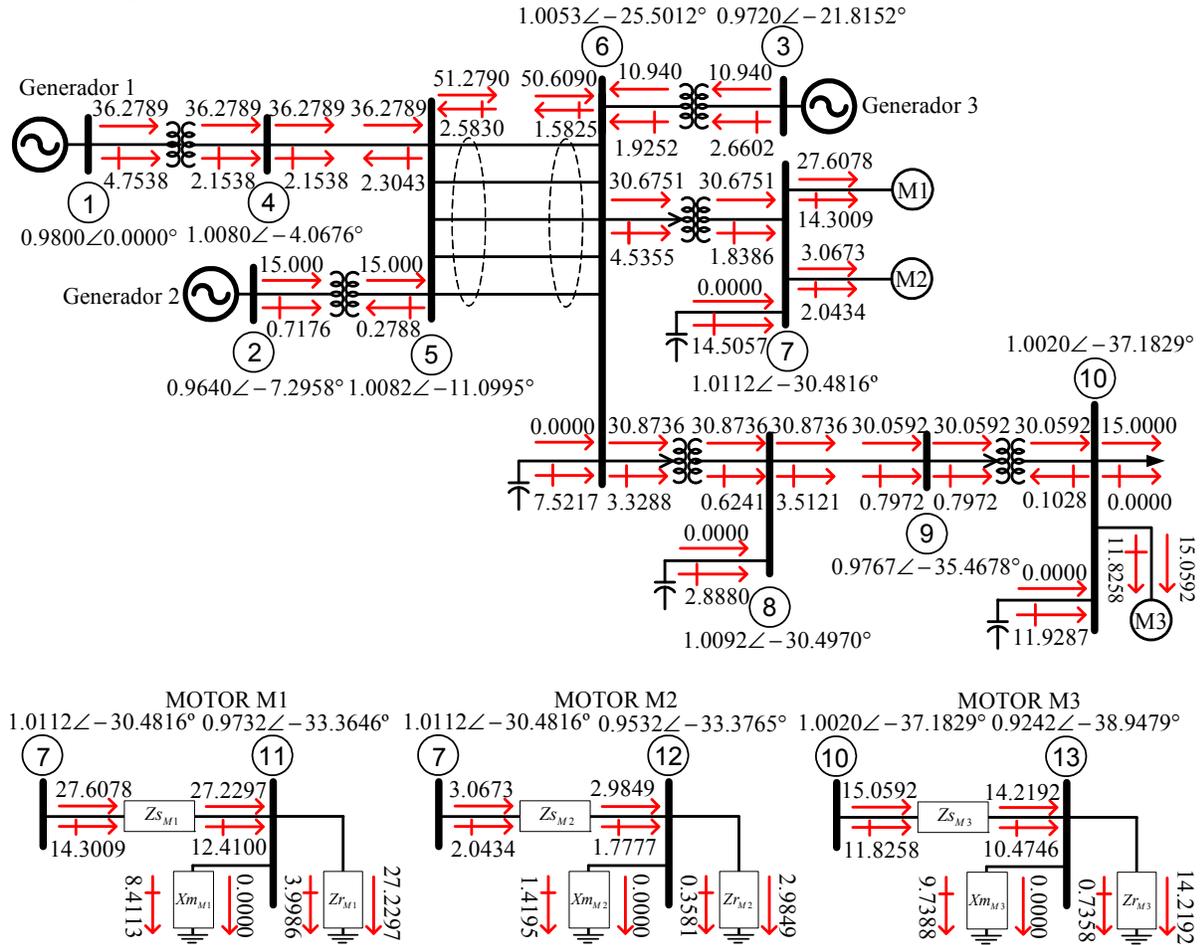


Fig. A.6. Resultados del estudio de flujos de potencia en p.u. a 100 MVA empleando el Modelo 6 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10 del sistema de la Fig. 3.1.

A.2.7 Resultados empleando el Modelo 7

La Fig. A.7 muestra los resultados del estudio de flujos de potencia de Newton-Raphson para el sistema de la Fig. 3.1 empleando el Modelo 7 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10. Como se observa este modelo deducido del modelo dinámico de tercer orden ofrece los mismos resultados que los modelos estáticos 4, 5 y 6, por lo que el utilizar el modelo dinámico de tercer orden para deducirlo no logra mejorar los resultados de los otros modelos estáticos del motor de inducción. Todos los resultados del estudio están en p.u. a 100 MVA base.

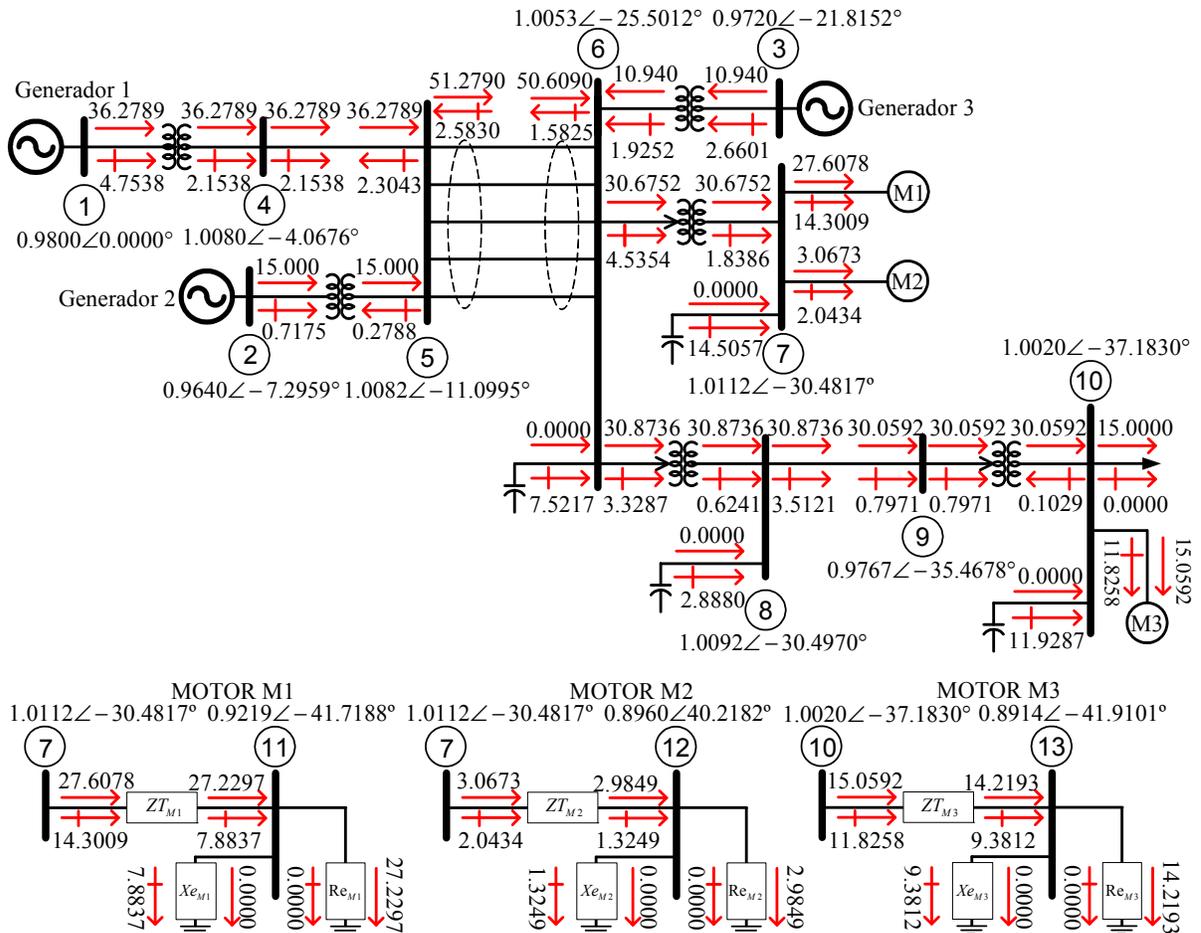


Fig. A.7. Resultados del estudio de flujos de potencia en p.u. a 100 MVA empleando el Modelo 7 para representar la carga de motores de inducción de los nodos 7 y 10 del sistema de la Fig. 3.1.

APÉNDICE B:

DATOS Y ESTADO INICIAL DEL SISTEMA DE PRUEBA CIGRE DE 32 NODOS

B.1. DATOS DEL SISTEMA CIGRE 32-NODOS

El sistema mostrado en la Fig. 3.2 representa una parte del sistema Belga de 380kV y 150kV como se encontraba en los inicios de los años 80's. A continuación se presentan para este sistema (Sistema CIGRE 32-Nodos) los datos de líneas de transmisión (Tabla B.1), datos nodales (Tabla B.2 y B.4), de transformadores (Tabla B.3) y los datos de motores de inducción (Tablas B.5).

TABLA B.1. Datos de líneas del SEP en p.u. a 100 MVA base (Adaptado de [CIGRE, 1995])

Elemento	Nodos Terminales		Impedancia Serie		B/2	Circuito
	Nodo i	Nodo j	R	X		
Línea 1	N1	N4	0.000540	0.00464	0.0567	1
Línea 2	N1	N4	0.000490	0.00522	0.0641	2
Línea 3	N1	N4	0.000490	0.00522	0.0641	3
Línea 4	N1	N2	0.000140	0.00145	0.0162	1
Línea 5	N4	N3	0.000730	0.00772	0.0948	1
Línea 6	N5	N4	0.000460	0.00490	0.0545	1
Línea 7	N5	N4	0.000460	0.00490	0.0545	2
Línea 8	N6	N4	0.000840	0.00708	0.0864	1
Línea 9	N3	N16	0.001260	0.01331	0.1355	1
Línea 10	N102	N101	0.017000	0.06320	0.0115	1
Línea 11	N102	N103	0.001000	0.01140	0.0020	1
Línea 12	N106	N103	0.005500	0.02500	0.0040	1
Línea 13	N104	N103	0.006200	0.03000	0.0050	1
Línea 14	N106	N105	0.008000	0.04300	0.0070	1
Línea 15	N6	N7	0.000840	0.00708	0.0864	1
Línea 16	N6	N8	0.001000	0.01000	0.1220	1
Línea 17	N6	N9	0.000940	0.00995	0.1221	1
Línea 18	N8	N10	0.001500	0.01600	0.2000	1
Línea 19	N9	N10	0.001500	0.01600	0.2000	1
Línea 20	N104	N105	0.006200	0.03000	0.0050	1
Línea 21	N10	N14	0.000870	0.00969	0.1157	1
Línea 22	N13	N10	0.000950	0.01004	0.1181	1
Línea 23	N11	N10	0.000790	0.00838	0.0986	1
Línea 24	N11	N12	0.001260	0.01331	0.1355	1
Línea 25	N15	N14	0.002190	0.02309	0.1443	1

TABLA B.2. Datos nodales del SEP en p.u. a 100 MVA base (Adaptado de [CIGRE, 1995])

Nodo	PG	QG	PL	QL	QSHUNT	VBASE (kV)
Nodo Slack (Compensador)						
N15	-0.648	0.388	0.00	0.00	0.00	380
Nodos PV (Generación)						
N12	0.00	0.0000	3.19	-1.0000	0.00	380
N16	0.001	-0.0054	0.00	0.0000	0.00	380
NG1	8.50	3.4600	0.48	0.4000	0.00	24
NG2	5.00	1.7800	0.54	0.4500	0.00	24
N101	1.75	0.3000	0.00	0.0000	0.75	150
N103	1.50	0.2000	0.00	0.0000	0.00	150
N105	1.75	0.3000	0.00	0.0000	0.75	150
N10	28.00	4.9800	5.80	1.0000	0.00	380
Nodos PQ (Carga)						
N1	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	380
N2	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	380
N3	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	380
N4	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	380
N5	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	380
N6	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	380
N7	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	380
N8	0.00	0.00	2.37	0.7800	0.00	380
N9	0.00	0.00	2.23	0.7300	0.00	380
N11	0.00	0.00	0.98	0.3200	0.00	380
N13	0.00	0.00	6.00	2.0000	0.00	380
N14	0.00	0.00	3.00	0.7500	0.00	380
N102	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.75	150
N104	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.75	150
N106	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	150
N107	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.75	150
N201	0.00	0.00	3.00	1.9985	0.45	70
N202	0.00	0.00	3.00	1.9985	0.45	70
N203	0.00	0.00	3.00	1.9985	0.45	70
N204	0.00	0.00	3.00	1.9985	0.45	70
N205	0.00	0.00	3.00	1.9985	0.45	70
N206	0.00	0.00	3.00	1.9985	0.45	70
N207	0.00	0.00	3.00	1.9985	0.45	70

TABLA B.3. Datos de transformadores del SEP en p.u. a 100 MVA base [CIGRE, 1995].

Elemento	Nodos Terminales		Impedancia Serie		Tap	
	Nodo i	Nodo j	R	X	Mag.	Áng.
T1	N1	G1	0.00023	0.01070	1.081081	0.000
T2	N1	G2	0.00009	0.00758	1.058201	0.000
T3	N101	N3	0.00050	0.04350	1.041666	0.000
T4	N102	N4	0.00080	0.04720	1.054852	0.000
T5	N106	N5	0.00029	0.02229	1.017293	0.000
T6	N107	N2	0.00060	0.04370	1.019367	0.000
T7	N104	N6	0.00028	0.02200	0.989119	0.000
T8	N105	N7	0.00050	0.04350	1.111111	0.000
ULTC1 - ULTC7	N101-N107	N201-N207	0.00060	0.02500	0.970873	0.000

TABLA B.4. Magnitud de voltaje en p.u. de los nodos de Generación y Slack

Nodo	N15	N12	N16	NG1	NG2	N101	N103	N105	N10
Voltaje [p.u]	1.0921	1.09802	1.04026	1.0000	1.0000	1.05253	1.01726	1.0524	1.08421

TABLA B.5. Parámetros de los motores de inducción (Adaptado de [Taylor, 1994])

Motor	P	H	Rs	Xs	Xm	Rr	Xr	s ₀
Datos a la base del motor (500 MVA)								
M1-M7	300 MW	0.7	0.031	0.1	3.2	0.018	0.18	0.011998
Datos a la base del sistema (100 MVA)								
M1-M7	3	3.5	0.0062	0.02	0.64	0.0036	0.036	0.011998

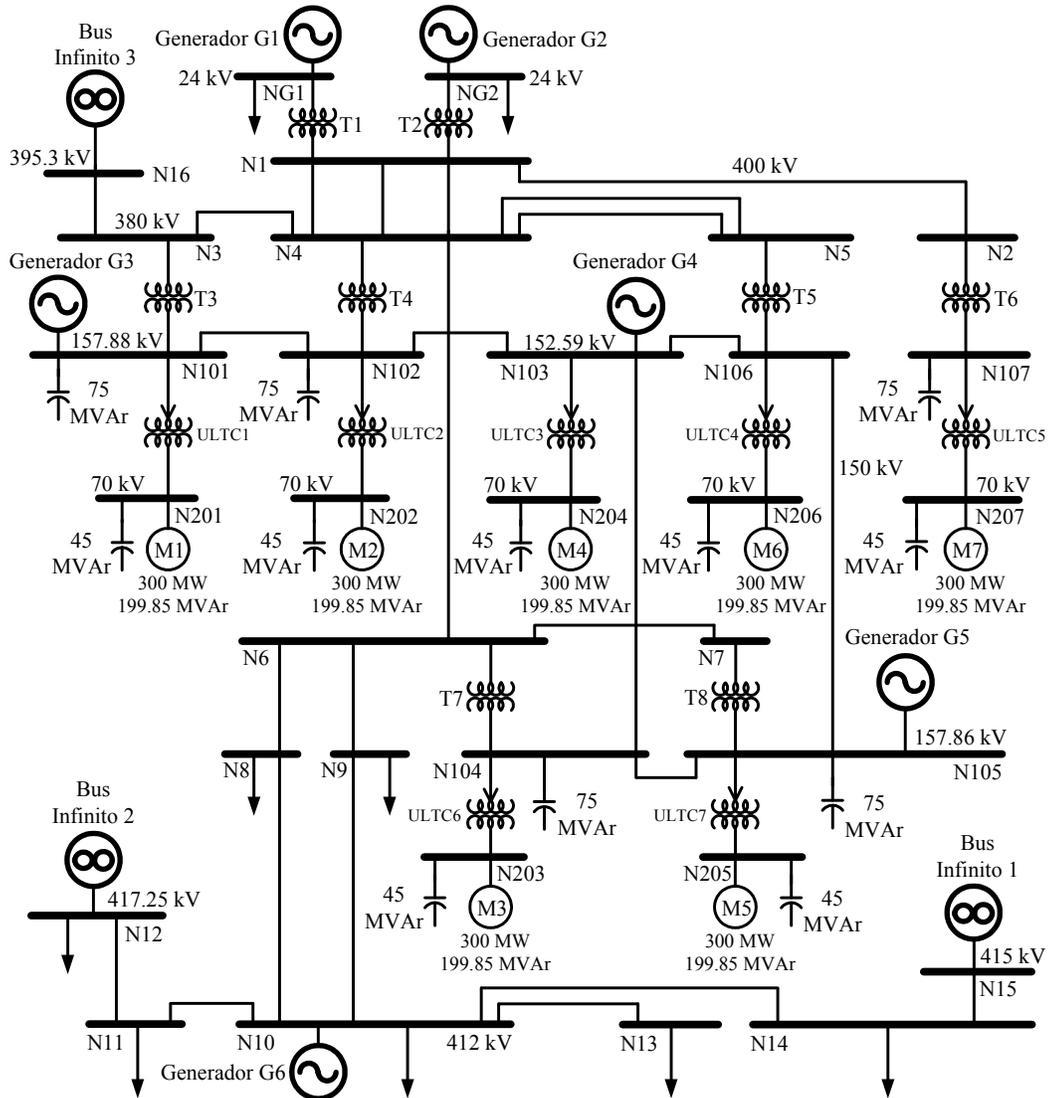


Fig. 3.2. Diagrama unifilar del sistema de prueba CIGRE 32-NODOS (Adaptado de [CIGRE, 1995]).

B.2 CONDICION INICIAL DEL SISTEMA CIGRE 32-NODOS EMPLEANDO LOS DIFERENTES MODELOS ESTATICOS DEL MOTOR DE INDUCCION EN EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA

B.2.1 Resultados empleando el Modelo Estático 1

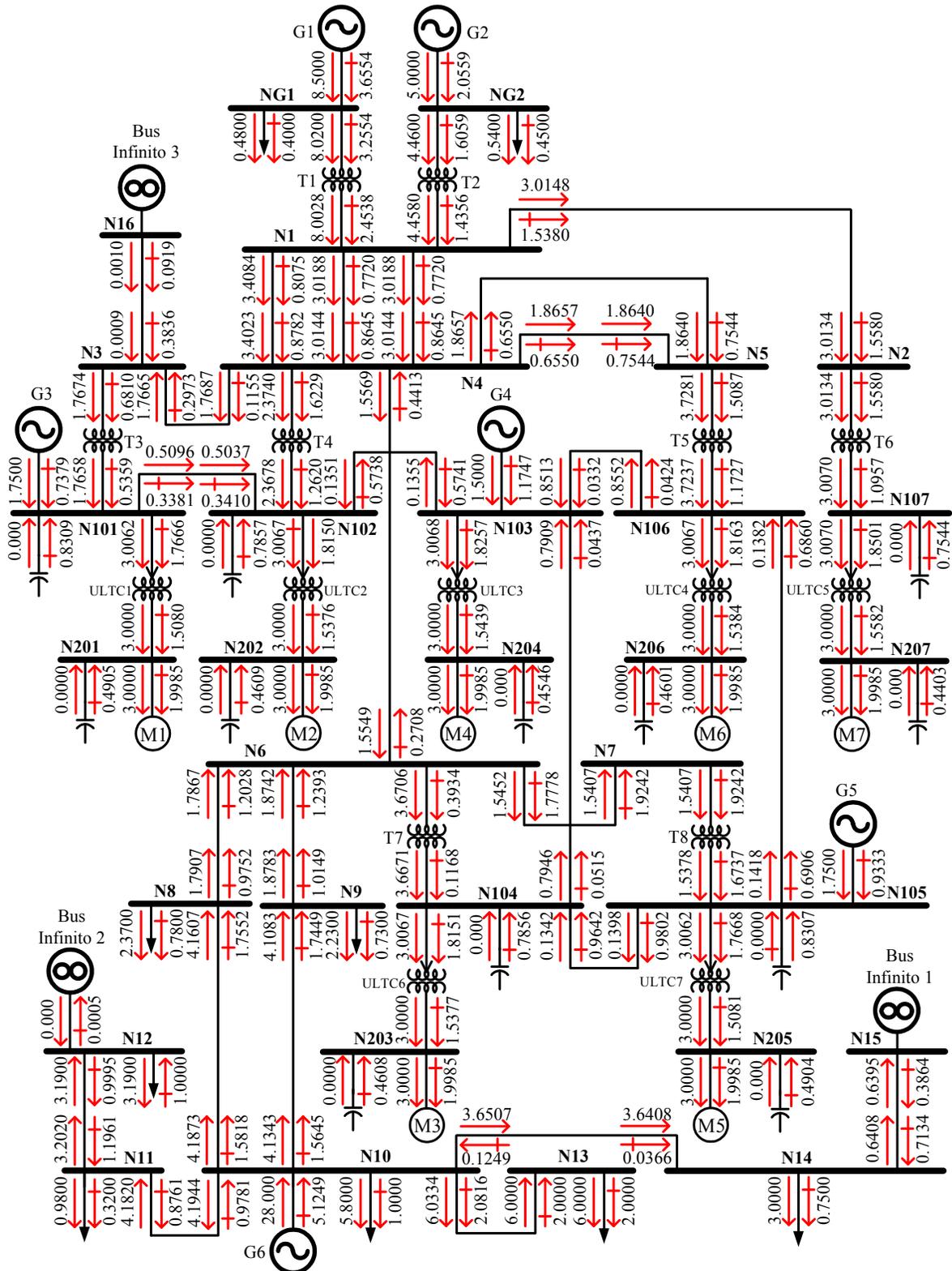


Fig. B.1. Resultados del estudio de flujos de potencia en p.u. a 100 MVA empleando el Modelo 1 para representar la carga de motores de inducción del sistema de la Fig. 3.2, el resto de la carga del sistema se ha representado con una característica de potencia constante.

B.2.4 Resultados empleando los Modelos Estáticos 4-7

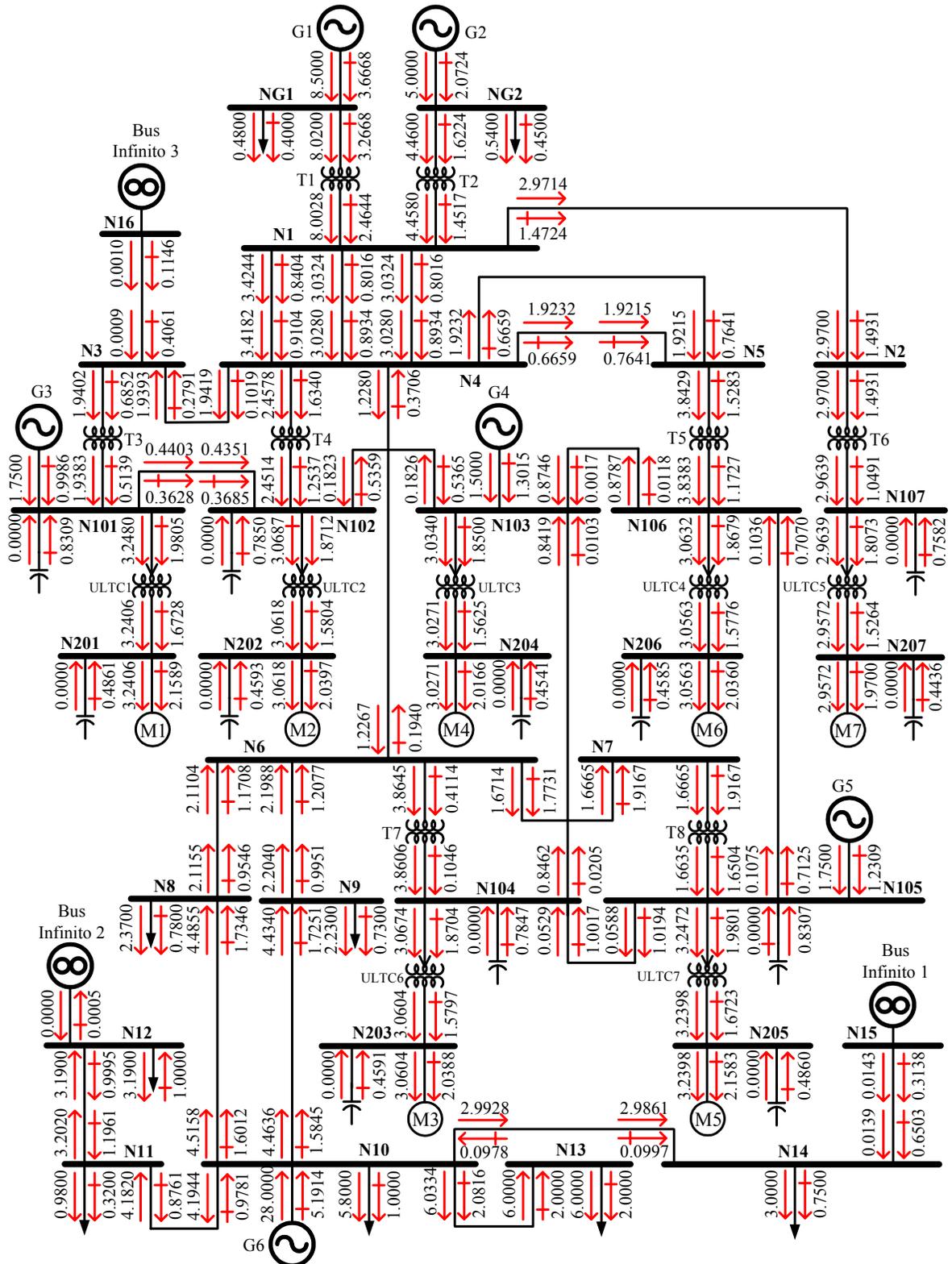


Fig. B.4. Resultados del estudio de flujos de potencia en p.u. a 100 MVA empleando los Modelos 4-7 para representar la carga de motores de inducción del sistema de la Fig. 3.2, el resto de la carga del sistema se ha representado con una característica de potencia constante.

B.2.5 Resultados de los Voltajes Nodales del sistema CIGRE 32-Nodos al emplear todos los modelos estáticos del motor de inducción.

Debido a que en las Figs. B.1-B.4 no hubo espacio suficiente para incluir los resultados de los voltajes nodales, en la Tabla B.6 se muestran estos resultados correspondientes a dichas figuras.

TABLA B.6. Resultados de voltajes nodales para las Figs. B.1-B.4

Nodo	Voltaje Nodal [p.u.]							
	Fig. B.1 (Modelo Estático 1)		Fig. B.2 (Modelo Estático 2)		Fig. B.3 (Modelo Estático 3)		Fig. B.4 (Modelos Estáticos 4-7)	
	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo
N15	1.092100	0.0000	1.092100	0.0000	1.092100	0.0000	1.092100	0.0000
N12	1.098020	-1.3429	1.098020	-1.3439	1.098020	-1.3446	1.098020	-2.3958
N16	1.040260	-1.7337	1.040260	-1.7357	1.040260	-1.7376	1.040260	-3.4221
NG1	1.000000	4.8534	1.000000	4.8514	1.000000	4.8523	1.000000	3.2423
NG2	1.000000	1.7596	1.000000	1.7577	1.000000	1.7580	1.000000	0.1481
N101	1.052530	-5.9065	1.052530	-5.9103	1.052530	-5.9147	1.052530	-8.0067
N103	1.017260	-7.1858	1.017260	-7.1902	1.017260	-7.1963	1.017260	-9.0036
N105	1.052400	-5.9953	1.052400	-5.9990	1.052400	-6.0040	1.052400	-7.8587
N10	1.084210	2.5036	1.084210	2.5026	1.084210	2.5020	1.084210	1.4508
N1	1.045501	-0.1929	1.045533	-0.1948	1.045331	-0.1947	1.045369	-1.8045
N2	1.042947	-0.4112	1.043015	-0.4132	1.042751	-0.4129	1.042911	-2.0200
N3	1.037207	-1.7184	1.037207	-1.7204	1.037094	-1.7217	1.036916	-3.4053
N4	1.039985	-1.0016	1.039987	-1.0033	1.039790	-1.0035	1.039699	-2.6165
N5	1.035831	-1.4704	1.035811	-1.4719	1.035591	-1.4720	1.035469	-3.1003
N6	1.041153	-1.6004	1.041115	-1.6017	1.040952	-1.6023	1.040630	-3.0892
N7	1.027219	-2.1022	1.027186	-2.1039	1.027043	-2.1053	1.026628	-3.6398
N8	1.053274	-0.7228	1.053251	-0.7240	1.053150	-0.7246	1.052816	-2.0398
N9	1.053559	-0.6806	1.053536	-0.6818	1.053434	-0.6824	1.053090	-1.9982
N11	1.088320	0.7635	1.088320	0.7625	1.088320	0.7619	1.088320	-0.2893
N13	1.059735	-0.4132	1.059735	-0.4142	1.059735	-0.4148	1.059735	-1.4660
N14	1.081673	0.7755	1.081673	0.7748	1.081673	0.7744	1.081797	0.0356
N102	1.023540	-7.3023	1.023340	-7.3053	1.023004	-7.3091	1.023073	-9.1476
N104	1.023477	-5.8932	1.023247	-5.8949	1.0228500	-5.8966	1.022844	-7.6144
N106	1.022787	-6.0225	1.022567	-6.0244	1.022127	-6.0258	1.022154	-7.7979
N107	1.002940	-7.7311	1.004105	-7.7248	1.001945	-7.7409	1.005450	-9.2177
N201	1.044029	-9.6598	1.041869	-9.6687	1.040984	-9.6751	1.039345	-12.0784
N202	1.012019	-11.2833	1.011229	-11.2895	1.009995	-11.2982	1.010258	-13.2193
N203	1.011950	-9.8747	1.011131	-9.8799	1.009833	-9.8870	1.010031	-11.6861
N204	1.005068	-11.2190	1.004824	-11.2241	1.003945	-11.2325	1.004517	-13.0753
N205	1.043885	-9.7495	1.041733	-9.7584	1.040848	-9.7654	1.039217	-11.9304
N206	1.011187	-10.0097	1.010415	-10.0149	1.009072	-10.0221	1.009350	-11.8696
N207	0.989191	-11.8873	0.990935	-11.8694	0.987776	-11.9065	0.992855	-13.2894

APÉNDICE C:

DATOS DINÁMICOS DEL SISTEMA DE PRUEBA TAYLOR DE 10 NODOS

C. 1. DATOS DINÁMICOS DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS

A continuación se presentan los datos dinámicos del sistema Taylor 10-Nodos, utilizados para las simulaciones de las fallas trifásicas aplicadas al sistema de la Fig. 3.1 en el Capítulo 4. Los generadores tienen un sistema de excitación estático con estabilizador de potencia. El generador 1 es un equivalente de un gran sistema remoto. La constante de inercia, H , para los generadores 2 y 3 es de 51.04s y 37.12s respectivamente. La constante de inercia del generador 1 es muy grande, modelando el equivalente mecánico de un gran sistema. La Tabla C.1 muestra los datos dinámicos de los generadores.

TABLA C.1. Parámetros de las máquinas síncronas del sistema Taylor 10-Nodos

Parámetros	Generador 1	Generador 2	Generador 3
H	9999.99	51.0400	37.1200
D	0.00000	102.000	74.2400
R_a	0.00009	0.00021	0.00029
X_d	0.04220	0.09590	0.13187
X_q	0.04040	0.09181	0.12625
X'_d	0.00001	0.01272	0.01750
T'_{d0}	0.08400	0.19090	0.26250
X'_q	0.00980	0.02227	0.03062
T'_{q0}	0.01130	0.02568	0.03531
X''_d	0.00430	0.00977	0.01343
T''_{d0}	0.00064	0.00145	0.00200
X''_q	0.00430	0.00977	0.01343
T''_{q0}	0.00124	0.00281	0.00387

Para el modelo del control de voltaje se considera un sistema de excitación estático con un estabilizador de sistemas de potencia como se muestra en la Fig. C.1. En el sistema de excitación se utiliza una ganancia alta, sin retroalimentación derivada o reducción de la ganancia transitoria. T_R representa la constante de tiempo del

transductor del voltaje terminal. Los datos para el sistema de excitación son mostrados en la Tabla C.2.

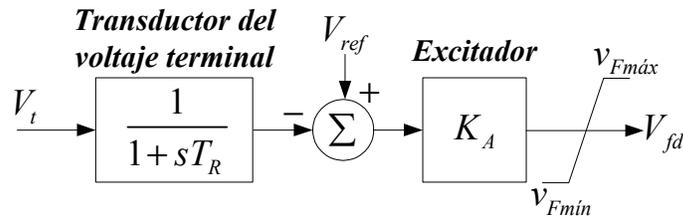


Fig. C.1. Sistema de excitación de los generadores del sistema Taylor 10-Nodos (adaptado de [Kundur, 1994, Ruiz, 1996])

TABLA C.2. Parámetros del control de voltaje de los generadores del sistema Taylor 10-Nodos (adaptado de [Ruiz, 1996]).

Parámetros	Generador 2	Generador 3
K_A	400	400
T_R	0.02s	0.02s

Para representar la carga de motores de inducción en las simulaciones dinámicas del sistema, fue utilizando su modelo dinámico de tercer en el marco de referencia que gira con una velocidad constante igual a la velocidad síncrona, su conexión con la red se representa utilizando un modelo equivalente de Norton. Una descripción detallada de este modelo se encuentra en la referencia [Ruiz, 1996].

APÉNDICE D:

ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS CON EL PROGRAMA PSS/E-29.5.0®

D. 1. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA EN EL PROGRAMA PSS/E®

En la Fig. D.1, se muestra la ventana principal del programa PSS/E®. Para realizar el estudio de flujos de potencia del sistema se realizan los siguientes pasos:

- 1) Primero se debe abrir el archivo de entrada de datos del sistema, para esto desplegamos el menú "File", el cual se encuentra en la parte superior izquierda de la ventana principal del programa (ver Fig. D.1).

Desplegar el menú "File"

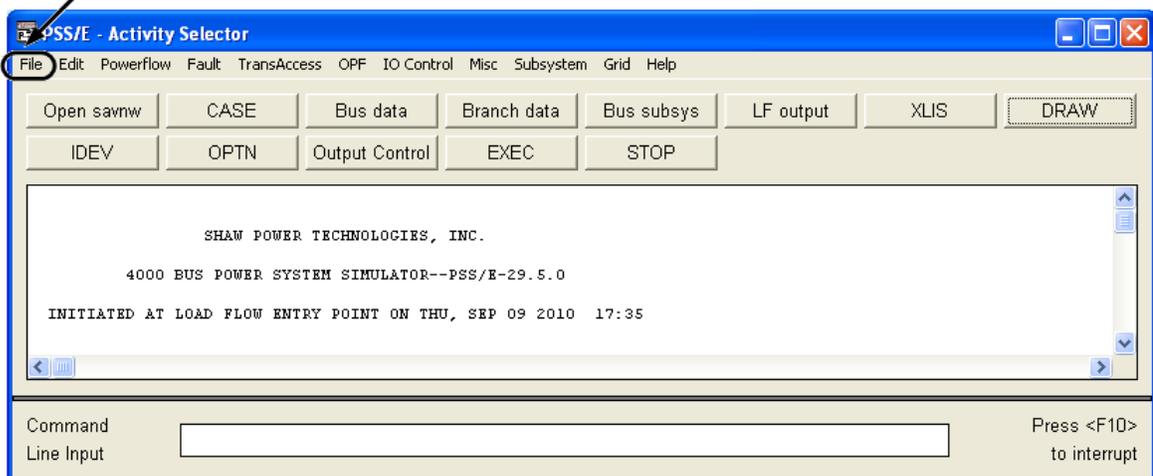


Fig. D.1. Ventana principal del programa PSS/E.

Después seleccionamos "Input", luego "Read Powerflow data" (ver Fig. 2). Al realizar lo anterior se abre la ventana mostrada en la Fig. D.3., en esta ventana debemos seleccionar la ubicación del archivo de entrada de datos del sistema, damos clic en "Select..." y buscamos el archivo de entrada de datos, para este ejemplo

utilizaremos el archivo llamado “MOD1PSSE.RAW” el cual se encuentra en el escritorio (del entorno de Windows XP), como se muestra en la Fig. D.4.

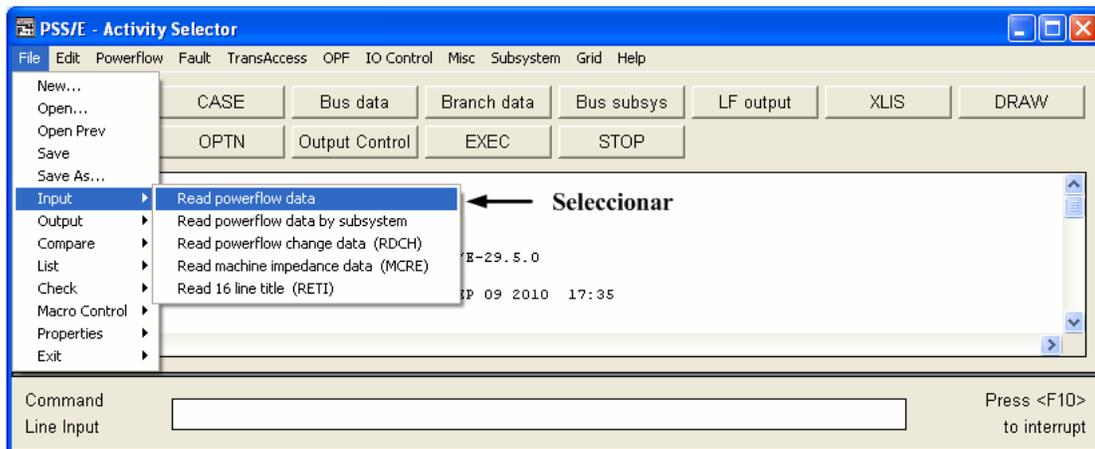


Fig. D.2. Procedimiento inicial para abrir el archivo de entrada de datos del sistema.

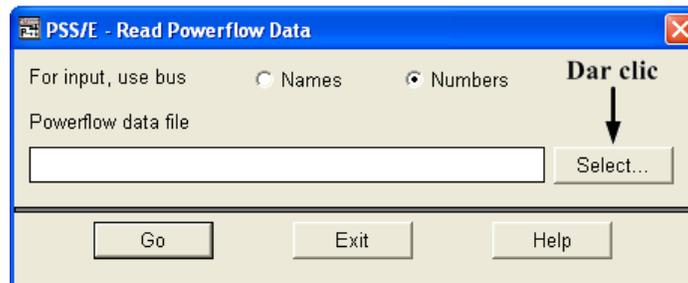


Fig. D.3. Buscando el archivo de entrada de datos del sistema.

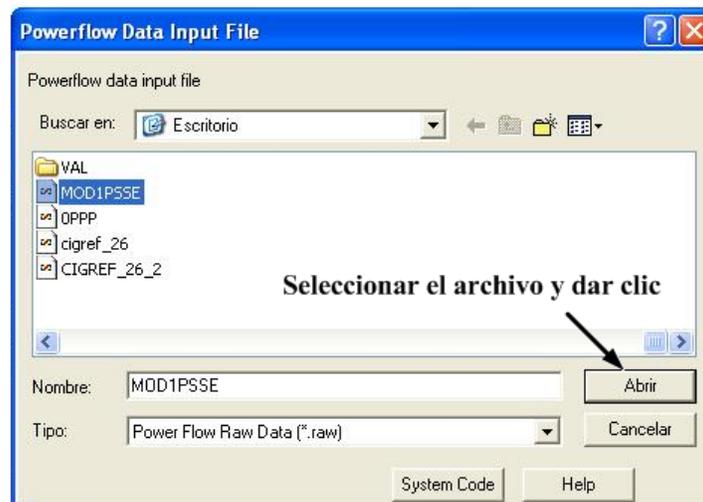
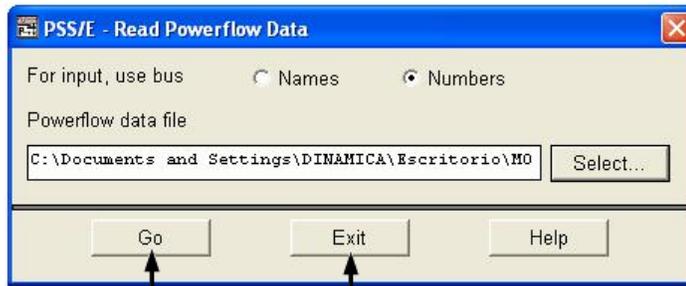


Fig. D.4. Seleccionando el archivo “MOD1PSSE”.

Después de seleccionar el archivo de entrada de datos y dar clic en abrir (Fig. D.4) se presenta la ventana mostrada en la Fig. D.5. A continuación damos clic en “Go” para terminar de cargar el archivo de entrada de datos del sistema al programa PSS/E® y luego en “Exit”.



Dar clic → Después en “Exit”

Fig. D.5. Seleccionando el archivo “MOD1PSSE”.

- 2) Ya que el archivo de entrada de datos ha sido cargado, debemos crear el archivo de salida del estudio de flujos de potencia, para esto damos clic en “Output Control” (Ver Fig. D.6)

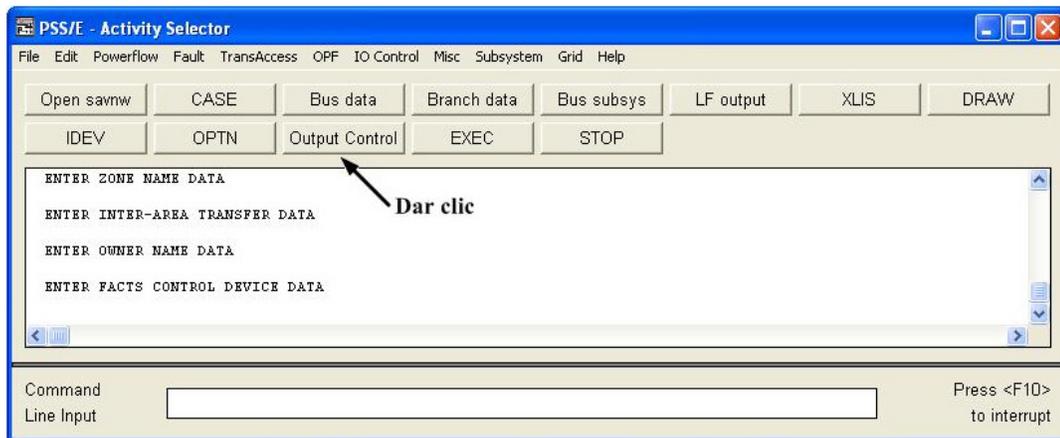


Fig. D.6. Primer paso para crear el archivo de salida para el estudio de flujos de potencia.

Después de realizar el paso anterior se despliega la siguiente ventana (en la cual debemos dar clic en “Select...”):

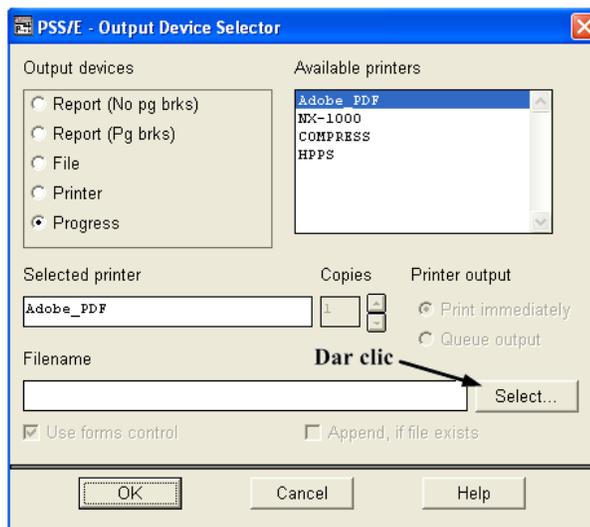


Fig. D.7. Selección de la ubicación para el archivo de salida del estudio de flujos de potencia.

A continuación se muestra una segunda ventana (Fig. D.8) en la que debemos especificar la ubicación para el archivo de salida y escribir el nombre que tendrá, para este ejemplo llamaremos al archivo de salida “MOD1SALIDA.DAT” (no es necesario escribir .DAT en el nombre del archivo, ya que por defecto el programa le asigna esta extensión al archivo de salida). Después de escribir el nombre del archivo de salida, damos clic en abrir (Ver. Fig. D.8).

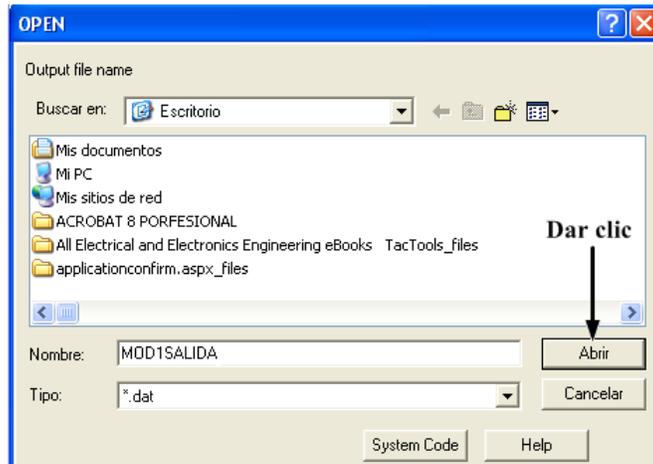


Fig. D.8. Creando el archivo de salida del estudio de flujos de potencia.

Nos aparece una última venta (Fig. D.9) en la creación del archivo de salida, en la cual debemos dar clic en “OK”:

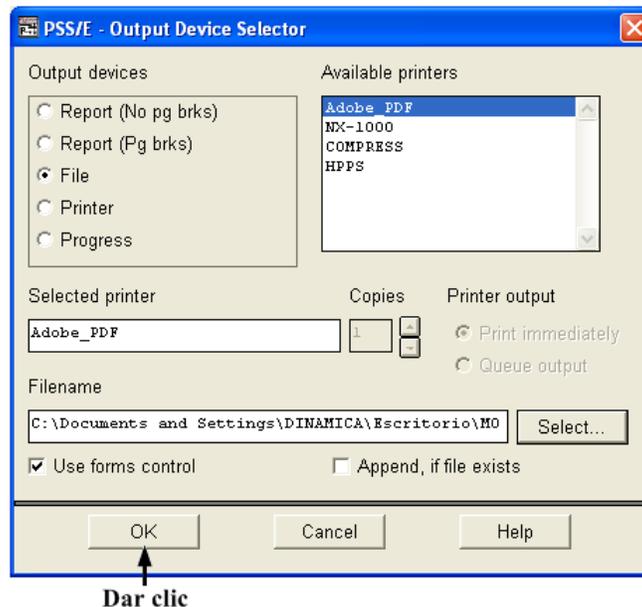


Fig. D.9. Confirmando la creación del archivo de salida del estudio de flujos de potencia.

3) Ya que se ha cargado el archivo de entrada de datos y que se ha creado el archivo de salida, el siguiente paso es realizar el estudio de flujos de potencia, para lo cual, en la ventana principal del programa damos clic en “Powerflow”,

después en “Solution” y luego en “Newton Solutions (NSOL/FNSL/FDNS)”, este procedimiento se muestra en la Fig. D.10.

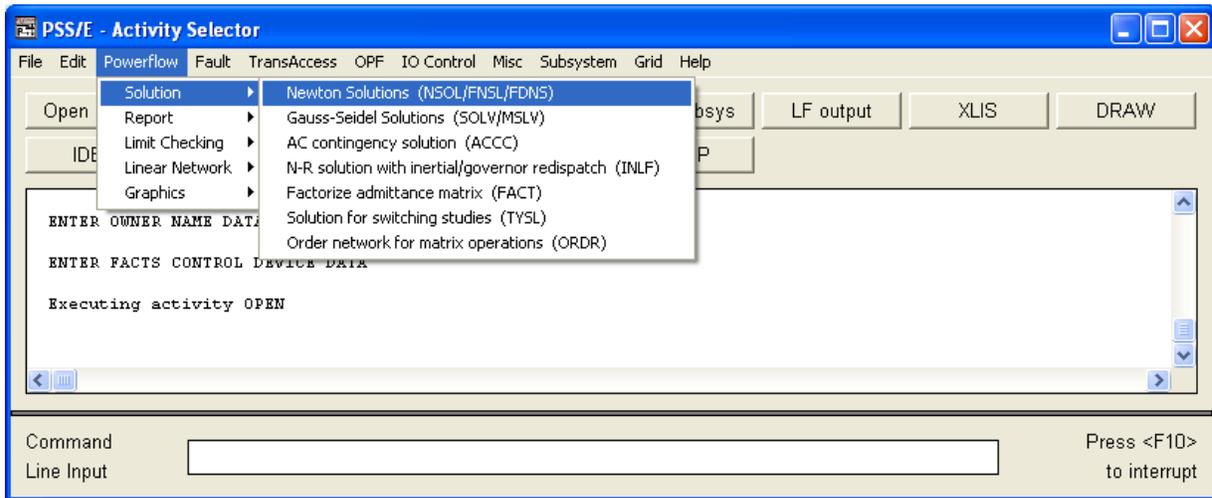


Fig. D.10. Procedimiento inicial para la realización del estudio de flujos de potencia.

Después de realizar lo anterior se muestra la siguiente ventana (Fig. D.11) en la que debemos elegir el método de solución a emplear, en este ejemplo utilizaremos el método: “Full Newton-Raphson”.

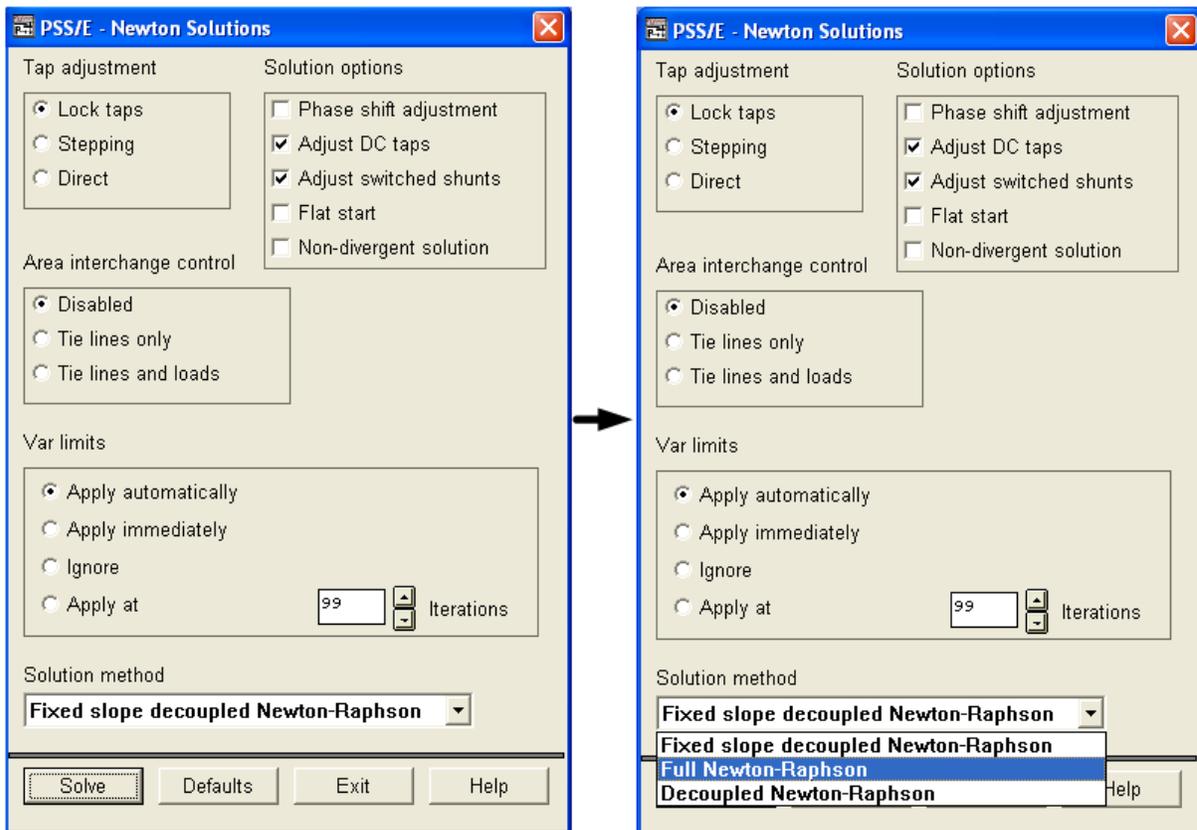


Fig. D.11. Selección del método a utilizar para realizar el estudio de flujos de potencia.

Después de seleccionar el método a utilizar, damos clic en “Solve” (como se muestra en la Fig. D.12) para realizar finalmente el estudio de flujos de potencia del sistema.

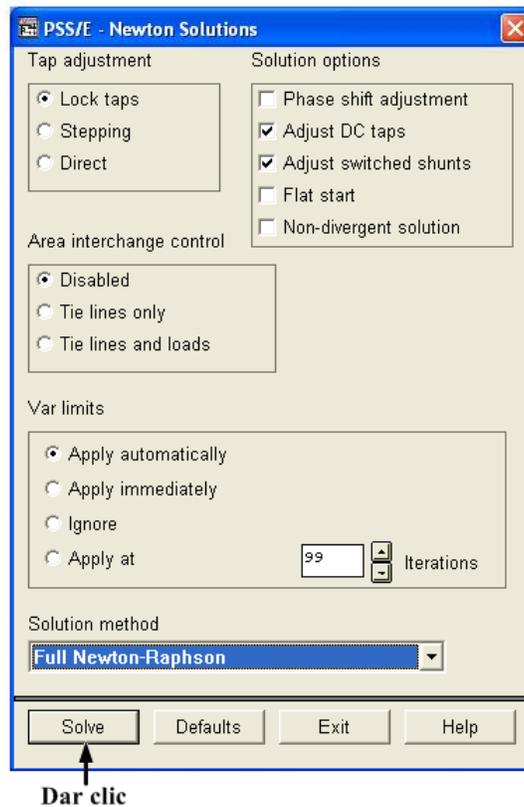


Fig. D.12. Solución del estudio de flujos de potencia del sistema

4) Después de realizar el estudio de flujos de potencia del sistema, el siguiente paso es la impresión de los resultados, para lo cual damos clic en “LF Output” en la ventana principal del programa (Fig. D.13):

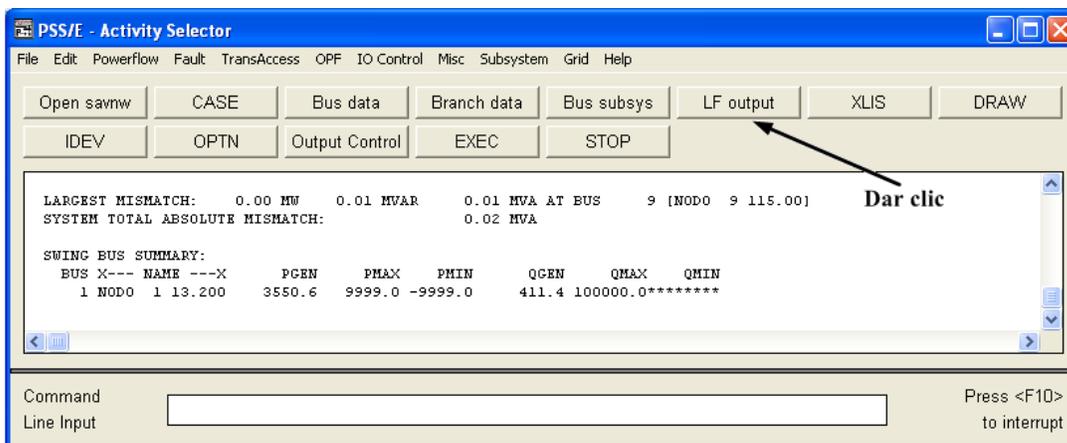


Fig. D.13. Primer paso en la impresión de los resultados.

Como resultado de lo anterior se abre la ventana que se muestra en la Fig. D.14, en la cual damos clic en “Go” y después en “Exit”. Con esto, los resultados han sido enviados a imprimirse en el archivo de salida que fue creado anteriormente (“MOD1SALIDA.DAT”)

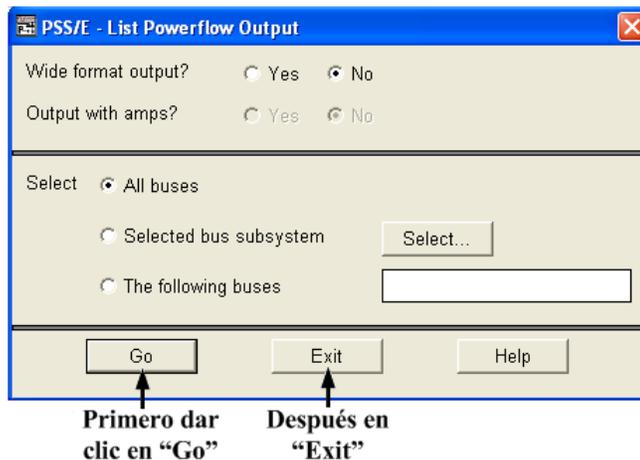


Fig. D.14. Segundo paso en la impresión de los resultados.

5) Por último para abrir el archivo de salida, debemos abandonar la sesión en el programa, por lo que debemos dar clic en “Stop” (Fig. D.15) y después clic en “OK” para confirmar la salida del mismo (Fig. D.16)

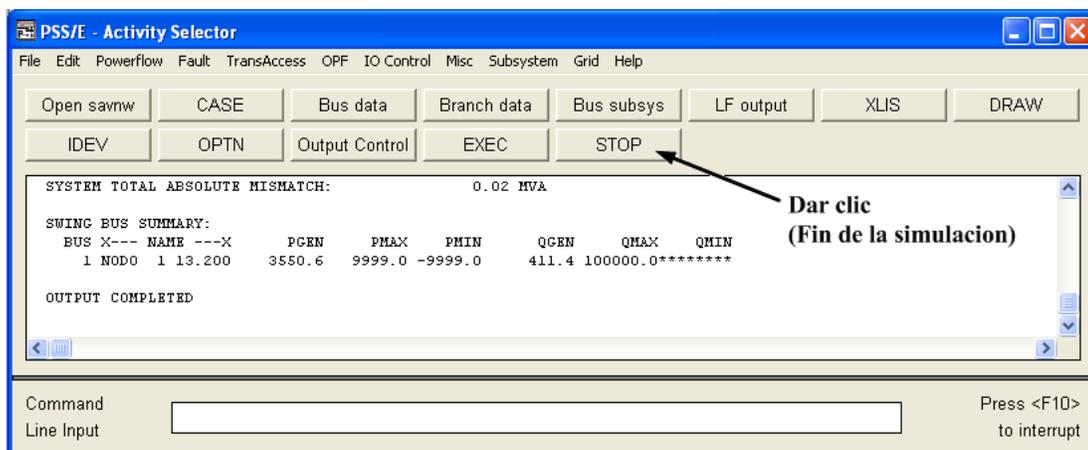


Fig. D.15. Abandonando la sesión en el PSS/E®.

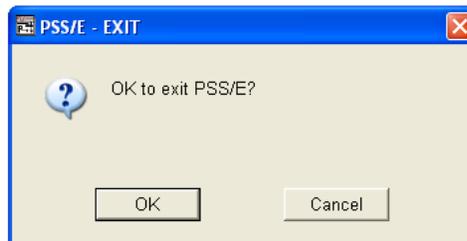


Fig. D.16. Confirmando el abandono de la sesión en el PSS/E®.

6) Después de terminar este procedimiento, ya es posible abrir el archivo de salida (“MOD1SALIDA.DAT”) de datos del estudio de flujos de potencia.

D. 2. ARCHIVOS DE ENTRADA DE DATOS PARA EL PROGRAMA PSS/E® DEL SISTEMA TAYLOR 10-NODOS, PARA LOS MODELOS ESTATICOS DEL MOTOR QUE SOLO MODIFICAN EL ARCHIVO DE ENTRADA DE DATOS DEL SISTEMA

D.2.1 Archivo de entrada de datos utilizando el modelo estático 1

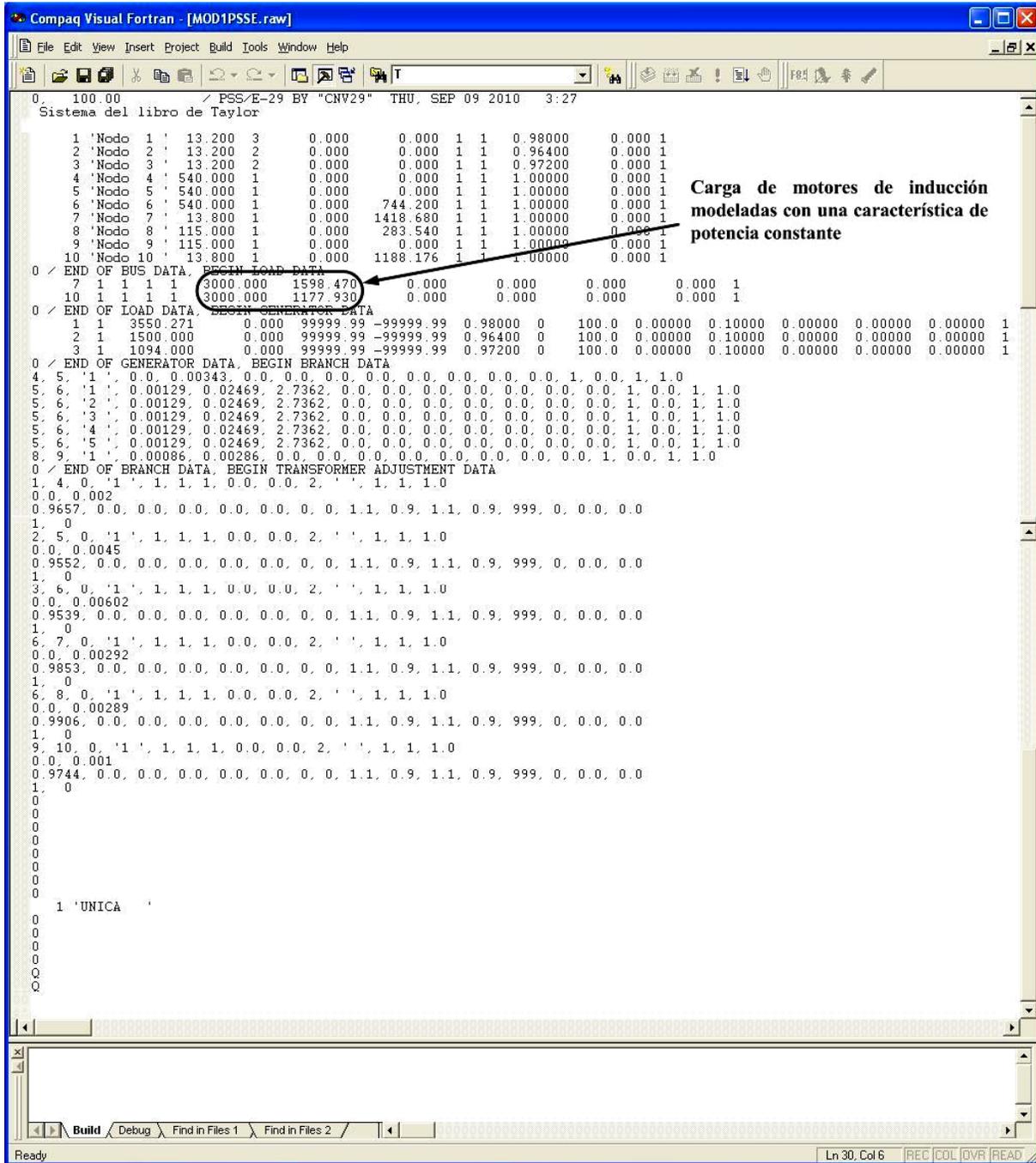


Fig. D.17. Archivo de entrada de datos del sistema Taylor 10-Nodos para el programa PSS/E® utilizando el modelo estático 1 para representar la carga de motores de inducción del sistema.

