

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA DEBIDO A FALLAS MONOFÁSICAS USANDO EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE CÓDIGO ABIERTO MATDYN

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el

Br. Mendoza Ruiz Armando De La Cruz
para optar al título
de Ingeniero Electricista.

Caracas, 2016

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA DEBIDO A FALLAS MONOFÁSICAS USANDO EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE CÓDIGO ABIERTO MATDYN

Tutor Académico: DR. ING. JULIO MOLINA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el
Br. Armando De La Cruz Mendoza Ruiz
para optar al título
de Ingeniero Electricista

Caracas, 2016

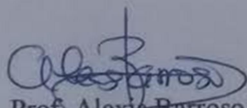
CONSTANCIA DE APROBACIÓN

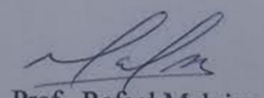
Caracas, 11 de noviembre de 2016

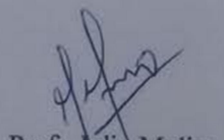
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Armando Mendoza R., titulado:

**“ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE LOS SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA DEBIDO A FALLAS MONOFÁSICAS
USANDO EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE CÓDIGO ABIERTO
MATDYN”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Alexis Barroso
Jurado


Prof. Rafael Malpica
Jurado


Prof. Julio Molina
Prof. Guía

A Dios.

A mis padres.

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Por su ayuda y guía divina para la culminación de este proyecto de vida.

A mi profesor tutor, el Dr. Ing. Julio Molina.

Por su invaluable y desinteresada guía y ayuda durante todo el proceso de la elaboración de este proyecto.

A mis padres.

A mí querida esposa e hijos.

Por su apoyo y motivación.

Mendoza R., Armando

**ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DE LOS
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA DEBIDO A FALLAS
MONOFÁSICAS USANDO EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN
DE CÓDIGO ABIERTO MATDYN**

Tutor Académico: Dr. Ing. Julio Molina. Tesis. Caracas. UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Año 2016. 75 h.

Palabras claves: MatDyn, MatPower, Matlab, Estabilidad Transitoria, Código Abierto, Fallas Asimétricas.

Resumen.- La estabilidad transitoria es la habilidad que tiene un sistema eléctrico de potencia de permanecer en sincronismo luego de ser afectado por una gran perturbación. La perturbación de mayor afectación es la trifásica, pero existen sistemas donde la falla monofásica a tierra tiene gran importancia. Se tiene un software de código abierto escrito en Matlab llamado MatDyn que realiza el análisis de estabilidad transitoria debido a fallas trifásicas. El presente trabajo hace un estudio del programa MatDyn y sus funciones principales, para luego modificarlo y adaptarlo al estudio de la falla monofásica. Se realizan modificaciones a funciones principales del MatDyn y MatPower que es otro programa de código que realiza análisis de flujo de carga, se crea una función nueva para lograr la adecuación de la falla monofásica y se validan los resultados utilizando un software de plataforma privada llamado PowerWorld.

ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	III
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTOS.....	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	

1. ESTABILIDAD TRANSITORIA Y FALLAS ASIMÉTRICAS.....	5
1.1 Consideraciones mecánicas sobre las maquinas sincrónicas.....	5
1.2 La ecuación de oscilación y la potencia de aceleración.....	6
1.3 Estabilidad Transitoria Multimáquinas.....	8
1.4 Ecuación de potencia generada en sistemas multimáquinas.....	8
1.5 Procedimiento para el análisis de estabilidad multimáquina.....	9
1.6 Fallas asimétricas.....	10

CAPÍTULO II

2. ESTRUCTURA DE LOS ELEMENTOS Y MANEJO DE DATOS BAJO EL FORMATO DEL MATDYN PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA.....	12
2.1 Ejecución del programa MatDyn.....	12
2.2 Introducción de Datos en el programa.....	13
2.2.1 Introducción de la información de la topología y condiciones de operación de la red.....	13
2.2.2 Formato de la información dinámica.....	13
2.2.3 Formato de la información de evento.....	16
2.3 Variables de salida obtenidas del MatDyn.....	18
2.4 Breve descripción del proceso de simulación en el programa MatDyn...18	
2.5 Breve descripción de los métodos numéricos utilizados en el MatDyn...19	

2.6 Modelos de los componentes del sistema de potencia utilizados en MatDyn.....	19
2.6.1 Modelos de los generadores sincrónicos.....	19
2.6.2 Modelos de la excitatriz, turbinas y gobernadores.....	19
2.6.3 Modelos de las cargas.....	21

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE UN CASO DE ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEBIDO A FALLA TRIFÁSICA UTILIZANDO EL MATDYN.....	23
3.1 Descripción del sistema de nueve barras.....	23
3.2 Introducción de los datos dinámicos del sistema de nueve barras.....	24
3.3 Introducción de los datos de los eventos del caso de nueve barras.....	25
3.4 Ejecución del programa MatDyn.....	26
3.5 Salidas del programa y resultados.....	26

CAPÍTULO IV

4. IMPLEMENTACIÓN EN MATDYN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA PARA LA FALLA MONOFÁSICA A TIERRA.....	29
4.1 Inclusión de la información de impedancias de secuencia del sistema....	29
4.2 Modificación de la función principal <i>rundyn</i>	30
4.3 Modificación de la función <i>MakeYbus.m</i> del MatPower.....	30
4.4 Modificaciones a los archivos con la información dinámica del MatDyn.....	32
4.5 Modificaciones a los archivos de información de eventos del MatDyn...	33
4.6 Modelos de carga del MatDyn.....	34
4.7 Modificación de la función <i>AugYbus.m</i> del MatDyn para el cálculo de las matrices aumentadas de secuencia.....	34
4.8 Función para obtener las impedancias equivalentes de Thevenin de las redes de secuencia negativa y cero en el punto de falla.....	34

4.9 Lectura de las estructuras o archivos <i>file.m</i> con la información de secuencia.....	36
--	----

CAPÍTULO V

5. IMPLEMENTACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEBIDO A UNA FALLA MONOFASICA A TIERRA USANDO EL MATDYN MODIFICADO.....	39
---	-----------

5.1 Criterio para la determinación de las redes de secuencia de los componentes del sistema.....	39
--	----

5.1.1 Impedancia de secuencia de transformadores.....	39
---	----

5.1.2 Impedancias de secuencias de líneas de transmisión.....	40
---	----

5.1.3 Impedancias de secuencia de los generadores.....	40
--	----

5.2 Introducción de datos en los archivos <i>file.m</i> de secuencia negativa y cero.....	41
---	----

5.3 Introducción de los datos de los eventos bajo estudio.....	42
--	----

5.4 Ejecución y resultados de la falla monofásica en el programa MatDyn modificado.....	43
---	----

CONCLUSIONES.....	47
--------------------------	-----------

RECOMENDACIONES.....	48
-----------------------------	-----------

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	49
--	-----------

APÉNDICES.....	51
-----------------------	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Falla monofásica a tierra en el punto F.....	10
Figura 1.2 Conexión de las redes de secuencia para una falla monofásica a tierra..	11
Figura 2.1 Tabla de datos generales.....	14
Figura 2.2 Tabla de datos para el modelo del generador de 4to orden.....	14
Figura 2.3 Tabla de datos para el modelo clásico del generador.....	14
Figura 2.4 Tabla de datos para el modelo de la excitatriz.....	15
Figura 2.5 Tabla de data del modelo del gobernador.....	16
Figura 2.6 Formato de datos de la matriz <i>event</i>	16
Figura 2.7 Formato de datos de los tipos de eventos disponibles en MatDyn.....	17
Figura 2.8 Formato de datos de la matriz <i>buschange</i>	17
Figura 2.9 Formato de datos de la matriz <i>linechange</i>	17
Figura 2.10 Variables de salida obtenidas del MatDyn.....	18
Figura 2.11 Diagrama de flujo del programa MatDyn.....	19
Figura 2.12 Sistema de excitación IEEE DC1A.....	21
Figura 2.13 Sistema gobernador-velocidad general modelo del IEEE.....	21
Figura 3.1 Sistema de prueba del IEEE de nueve barras.....	23
Figura 3.2 Información de la topología y condiciones de operación del sistema.....	24
Figura 3.3 Datos dinámicos del caso de nueve barras.....	25
Figura 3.4 Datos de los eventos introducidos en la estructura de datos.....	26
Figura 3.5 Resultado del flujo de potencia para el sistema bajo estudio de nueve barras.....	27
Figura 3.6 Ángulo de carga del generador 2 con referencia al 1.....	28
Figura 3.7 Ángulo de carga del generador 3 con referencia al 1.....	28
Figura 4.1 Modelo de elementos de rama utilizado en MatDyn.....	31
Figura 4.2 Modelo del transformador conexión delta - estrella a tierra de secuencia cero para MatDyn modificado.....	32
Figura 4.3 Modelo del transformador conexión estrella a tierra-delta de secuencia cero para MatDyn modificado.....	32

Figura 4.4 Archivo <i>casedyn.m</i> modificado para falla monofásica.....	33
Figura 4.5 Archivo <i>caseXevent.m</i> modificado para falla monofásica.....	35
Figura 4.6 Función que calcula Z_{th} a partir de la Y_{bus} aumentada.....	36
Figura 4.7 Conversión de impedancias de serie a paralelo.....	37
Figura 4.5 Carga de datos de secuencia negativa y cero en MatDyn.....	37
Figura 4.6 Lectura de impedancias de secuencia de los generadores.....	38
Figura 4.7 Inclusión del caso 3 y 4 (falla monofásica a tierra y despeje).....	38
Figura 5.1 Archivo de caso de secuencia negativa.....	41
Figura 5.2 Archivo de caso de secuencia cero.....	42
Figura 5.3 Datos de los eventos del sistema bajo estudio.....	43
Figura 5.4 Ángulo de carga del generador 2 con referencia al 1(falla barra 7).....	44
Figura 5.5 Ángulo de carga del generador 3 con referencia al 1(falla barra 7).....	44
Figura 5.6 Cambio en el archivo de evento (falla en barra 8)	45
Figura 5.7 Ángulo del generador 2 con referencia al 1 (falla en barra 8).....	45
Figura 5.8 Ángulo del generador 3 con referencia al 1 (falla en barra 8).....	45

INTRODUCCIÓN

La estabilidad transitoria es la habilidad que tiene un sistema eléctrico de potencia de mantener el sincronismo luego de ser sujeto a una gran perturbación, esta puede ser una falla en el sistema de transmisión o la pérdida de un gran bloque de generación o carga.

Para el análisis de estabilidad existen herramientas computacionales para sus estudios de estabilidad, unas que son de muy alto costo de obtención y adiestramiento (software privativo) y otras que entran en la categoría de *Open Source Software* (*OSS*) de las cuales se tiene acceso total a su código y es posible modificarlo pero que pueden ejecutarse bajo plataformas propietarias o libres. Tal es el caso de MatDyn que es una herramienta *OSS* que puede ejecutarse bajo la plataforma propietario de Matlab o el software libre *Octave*.

MatDyn realiza el estudio de estabilidad transitoria de sistemas eléctricos de potencia debido a fallas trifásicas y se apoya en otro software *OSS* llamado MatPower que realiza el flujo de carga. A ambos programas se les introducen los datos mediante archivos tipo m (*m-files*) y variables tipo estructuras (*structs*). Se muestran varias salidas de las cuales se destacan los ángulos, velocidades de los generadores y tensiones en las distintas barras del sistema bajo estudio.

Este trabajo especial de grado tendrá como objetivo principal utilizar funciones del MatPower y MatDyn, modificarlas y adaptarlas para incorporar la falla monofásica a tierra en los estudios de estabilidad transitoria.

Es sabido, que la falla de mayor afectación es la falla trifásica, mientras que la falla con mayor probabilidad de ocurrencia es la monofásica. Hay sistemas de potencia donde esta última tiene mayor importancia, tal es el caso de parte de la red troncal de sistema eléctrico venezolano [1].

Este trabajo considera ciertos límites o alcances para su desarrollo tomando en cuenta que algunas son impuestas por el programa MatDyn, entre ellas se tienen:

- No se considera la influencia de los controles de tensión y velocidad de los generadores. Se usará un modelo de generador de frecuencia y tensión interna (detrás de la reactancia transitoria) constante.
- Se considera solo el modelo de generador de polos lisos.
- Se utiliza un modelo de carga de impedancia constante.
- Se analiza solo la transitoriedad del ángulo de carga de los generadores.
- No se considera la mutua inductancia de las líneas de transmisión.
- Se usan métodos numéricos tradicionales (Euler modificado y Runge-Kutta) ya implementados en MatDyn.
- Se realiza el análisis sobre una red de 9 nodos tomada de la referencia [2].
- Otras impuestas por el programa MatDyn.

Para alcanzar el objetivo de este trabajo se procede en principio a la descripción de los sistemas eléctricos de potencia utilizados en los estudios de flujo de potencia y estabilidad transitoria implementados bajo el formato de matrices en MatPower y MatDyn. Luego se procede a la estructuración de las matrices de red (Y_{bus}) y la matriz de admitancia aumentada (Y_{bus_aug}) y se señalan las modificaciones necesarias para implementar el estudio de la falla monofásica en MatDyn.

Posteriormente se analiza un caso de estudio de estabilidad transitoria debido a fallas trifásicas con el MatDyn sin modificar, se formulan las modificaciones pertinentes para realizar los estudios de estabilidad transitoria debido a fallas monofásicas. Por último, se analiza un caso de estudio de estabilidad transitoria debido a fallas monofásicas y se validan estas modificaciones con el programa de uso comercial PowerWorld [3].

La estructura de los capítulos del siguiente trabajo especial se resume a continuación:

Capítulo 1: Breve descripción de la teoría de la estabilidad transitoria, se presentan los aspectos mecánicos de los generadores sincrónicos para determinar la ecuación de oscilación, se describe el análisis de la estabilidad transitoria multimáquina y se enumeran los pasos para su resolución. Por último, se describe la falla monofásica a tierra y la conexión de las redes de secuencia.

Capítulo 2: Se explica el funcionamiento del programa de simulación MatDyn, describiendo brevemente su estructura principal y el algoritmo utilizado para su funcionamiento, se describen los modelos utilizados y las salidas que muestra al realizar un análisis de estabilidad transitoria.

Capítulo 3: Se describe el uso práctico del MatDyn, mediante el análisis del caso de estudio de 9 barras del IEEE [2]. Se describe como es la introducción de los datos para cada elemento, los datos dinámicos de los generadores y la forma de introducir los eventos. Por último, se muestran las salidas que genera el programa para cada simulación y se validan con un software PowerWorld.

Capítulo 4: Se muestran las modificaciones al programa principal de MatDyn. En orden secuencial se describen las modificaciones pertinentes realizadas a las funciones para poder incluir el estudio de la falla monofásica a tierra. Se describe el uso y la modificación de la función *MakeYbus.m* del MatPower. Se describe una nueva función para el cálculo de impedancias equivalentes de Thevenin de las redes de secuencia.

Capítulo 5: Se implementa un caso de estudio de estabilidad transitoria debido a una falla monofásica a tierra para el sistema de prueba del IEEE de 9 barras,

se muestra la introducción de datos y los resultados, estos últimos se comparan con el software PowerWorld.

CAPÍTULO I

ESTABILIDAD TRANSITORIA Y FALLAS ASIMÉTRICAS

La generación eléctrica se realiza a través de máquinas síncronas conectadas en paralelo y en diversos nodos de la red eléctrica. Para que estas interconexiones sean efectivas y satisfactorias el sistema debe estar en equilibrio, es decir en sincronismo. Para lograr este objetivo los generadores deben cumplir con los siguientes requisitos: igual magnitud de tensión, tensiones en igual fase y secuencia y por último deben tener la misma frecuencia. Estos requisitos son difíciles de cumplir debido al crecimiento e interconexiones cada vez más complejas de los sistemas eléctricos de potencia y a que están sujetos a diversas perturbaciones que los pueden hacer llegar a extremos de funcionamiento que rozan la inestabilidad.

Cuando existe una perturbación se pierde transitoriamente el balance de estado estable entre la energía de entrada y salida del generador síncrono. La diferencia es suplida o almacenada por el rotor en forma de energía cinética lo cual hace que se acelere o desacelere alejándose de la velocidad de sincronismo y variando en ambos casos el ángulo de carga del generador. En conclusión se define la estabilidad transitoria como la habilidad de un sistema eléctrico de potencia de mantener el sincronismo cuando es sujeto a una gran perturbación y se define una gran perturbación como una falla en el sistema de transmisión, la pérdida de un gran bloque de generación o carga o la conexión o reconexión de una línea de transmisión.

1.1 Consideraciones mecánicas sobre las máquinas síncronas

En el análisis de estabilidad transitoria es necesario realizar consideraciones mecánicas sobre las máquinas síncronas. De allí se tiene, que la energía cinética de un cuerpo en rotación se expresa como:

$$E.C = \frac{1}{2} I \omega^2 \text{ [J]} \quad (1.1)$$

donde ω es la velocidad angular e I es el momento de inercia.

El momento angular se define como:

$$M = I. \omega \quad \text{[MJ/s]} \quad (1.2)$$

La constante de inercia se define como:

$$H = \frac{\text{Energía almacenada en MJ}}{\text{MVA nominal}} = \frac{\text{MJ}}{G} = \frac{EC}{G} \quad (1.3)$$

donde G es la potencia nominal de maquina expresado en MVA.

Combinando (1.1) y (1.2) llegamos a que:

$$M = \frac{2G}{\omega} = \frac{GH}{180f} \text{ [grados eléctricos]} \quad (1.4)$$

y en valores por unidad con G como base nos queda:

$$M = \frac{2H}{\omega} = \frac{H}{180f} \quad (1.5)$$

1.2 La ecuación de oscilación y la potencia de aceleración

En estado transitorio una maquina sincrónica conectada a una barra infinita suministra una potencia P_e dada por:

$$P_e = \frac{|Ei'| |V|}{Xd'} \sin \delta \quad (1.6)$$

Donde E_i' es el voltaje detrás de la reactancia transitoria de la máquina. Cuando ocurre una perturbación cambia el requerimiento de potencia de cada componente y el rotor de la maquina deben reorientarse para ajustarse a las nuevas condiciones. La ecuación que caracteriza la reposición del rotor de la maquina durante la perturbación es la llamada ecuación de oscilación.

Antes de enunciar la ecuación de oscilación se tiene que la relación entre la aceleración angular α y el ángulo de carga del generador δ está dada por:

$$\alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (1.7)$$

Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación de oscilación:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_m - \frac{|E_i'| |V|}{x_d'} \sin \delta \quad (1.8)$$

que en función de la constante de inercia H :

$$\frac{2.H}{\omega} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - \frac{|E_i'| |V|}{x_d'} \sin \delta \quad (1.9)$$

donde P_m es la potencia mecánica.

La ecuación anterior caracteriza la reposición del rotor de la máquina sincrónica, la misma es una ecuación diferencial trascendental de segundo orden cuya solución representa el ángulo de carga δ en función del tiempo. Esta ecuación debe ser resuelta por métodos numéricos, siendo los métodos más usados el *Euler* modificado y *Runge Kutta*.

1.3 Estabilidad Transitoria Multimáquinas

En un sistema de dos máquinas se tienen dos ecuaciones de oscilación, una para cada máquina. El ángulo de carga entre las dos máquinas depende de los ángulos internos de cada máquina y el ángulo del marco de referencia rotatorio. Un sistema de varias máquinas es mucho más complejo. Hay que analizar la oscilación del ángulo de carga de cada una de las máquinas con respecto a un marco de referencia angular preestablecido. Generalmente esa referencia angular es otro generador, seleccionándose al que este más lejos de la perturbación, que tenga mayor constante de inercia y que tenga la menor carga (menor ángulo inicial). Lo importante en este caso es observar la estabilidad de cada generador con respecto a la referencia. Si el ángulo de carga de uno de los generadores es inestable, se considera que el sistema es inestable.

El problema de análisis de estabilidad multimáquinas consiste en reducir el sistema de potencia a un equivalente donde el número de nodos del sistema reducido sea igual al número de generadores, seleccionar a uno de ellos como referencia y conseguir las ecuaciones de oscilación durante la falla y después de la falla para los demás generadores con respecto a esa referencia y trazar las curvas de los ángulos de carga para cada uno.

1.4 Ecuación de potencia generada en sistemas multimáquinas

La corriente que entra al nodo i en un sistema de n barras es:

$$I_i = Y_{i1}E_1 + Y_{i2}E_2 + Y_{i3}E_3 + \cdots + Y_{in}E_n = \sum_{m=1}^n Y_{im}E_m \quad (1.10)$$

donde

$$Y_{im} = |Y_{im}| \angle \theta_{im} \quad (1.11)$$

$$E_m = |E_m| \angle \delta_m \quad (1.12)$$

La potencia aparente en el nodo i :

$$S_i = P_i + jQ_i = E_i I_i^* = E_i \sum_{m=1}^n Y_{im}^* E_m^* \quad (1.13)$$

y se obtiene la potencia activa como:

$$P_{ei} = \text{Re}[\sum_{m=1}^n |E_i| |E_m| |Y_{im}| \angle (\delta_i - \delta_m - \theta_{im})] \quad (1.14)$$

1.5 Procedimiento para el análisis de estabilidad multimáquina

Se toma en cuenta un generador como referencia y se ejecutan los siguientes pasos:

1. Resolver un flujo de carga para conocer el estado inicial del sistema, lo cual permite calcular:
 - 1.1 La magnitud y ángulo de tensión en cada una de las barras.
 - 1.2 La corriente de cada generador.
 - 1.3 La magnitud y ángulo de la tensión detrás de la reactancia de cada generador.
 - 1.4 La potencia eléctrica en cada barra.
 - 1.5 La potencia mecánica de cada generador.
 - 1.6 La admitancia de carga.
2. Conseguir la matriz de admitancia de barra Y_{bus} durante la falla incluyendo la impedancia de los generadores y las cargas, esto se denomina la matriz de admitancia de barra Y_{bus_aug} .

3. Reducir la matriz Y_{bus_aug} a una que contenga solamente los nodos agregados en el punto anterior.
4. Conseguir la ecuación de oscilación para cada generador.
5. Repetir los puntos 2, 3 y 4 después de limpiar la falla o cualquier otro cambio de estado.
6. Resolver las ecuaciones de oscilación por algún método numérico.

1.6 Estudio de la falla asimétrica monofásica

No es objetivo del presente trabajo desarrollar por completo la teoría de las fallas asimétricas y componentes simétricas, se ilustra solo la falla monofásica a tierra ya que es de interés en este trabajo.

En la figura 1.1 se muestra una falla monofásica a tierra en el punto F

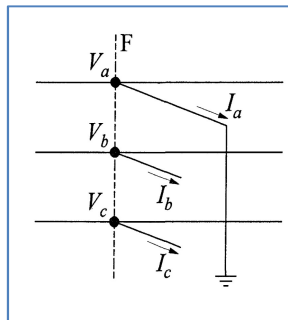


Figura 1.1 Falla monofásica a tierra en el punto F.

De la figura 1.1 obtenemos las condiciones fronteras para esta falla en particular:

$$V_a = 0, \quad I_b = I_c = 0 \quad (1.15)$$

El estudio de las fallas asimétricas requiere el uso de las redes de secuencia y en el caso particular de una falla monofásica a tierra, se deben conectar estas redes en serie en el punto de falla como muestra la figura 1.2.

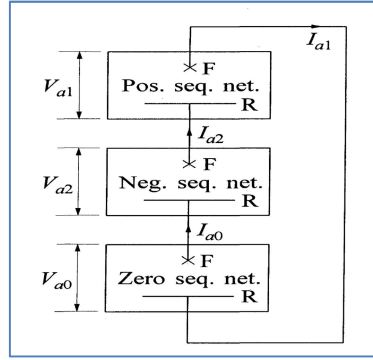


Figura 1.2 Conexión de la redes de secuencia para una falla monofásica a tierra

De la figura 1.2, se tiene que en el punto de falla:

$$V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = V_a = 0 \quad (1.16)$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{I_a}{3} \quad (1.17)$$

En conclusión en el punto de falla se suman los equivalentes de Thevenin de las redes de secuencia negativa y cero para luego añadirlas a la red de secuencia positiva, de allí se obtiene un circuito equivalente a analizar.

CAPÍTULO II

ESTRUCTURA DE LOS ELEMENTOS Y MANEJO DE DATOS BAJO EL FORMATO DEL MATDYN PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

El MatDyn es un programa de código abierto (*OSS*), escrito en Matlab, pero que también puede ejecutarse usando el programa de software libre Octave, que realiza análisis dinámico de sistemas eléctricos de potencia y está inspirado en el MatPower que es otro *OSS* que realiza análisis de flujo de carga convencional y óptimo. Para conseguir las condiciones de estado estable de un sistema, el MatDyn recurre al MatPower, por lo tanto, es un requisito la instalación de este último para el funcionamiento del MatDyn. En este capítulo se ilustra la estructura de funcionamiento del MatDyn, comenzando con los requisitos de ejecución del programa, la carga de los datos, el algoritmo de funcionamiento, los métodos numéricos utilizados y el modelado de los diferentes componentes.

2.1 Ejecución del programa MatDyn

Las simulaciones dinámicas son ejecutadas llamando a la función *rundyn.m* que se muestra a continuación:

```
[Angles,Speeds,Eq_tr,Ed_tr,Efg,PM,Voltages,Stepsize,Errest,Time]=rundyn(PFFUN  
,DYNFUN,EVFUN,OPTIONS);
```

El archivo PFFUN contiene la información de la topología de la red y las condiciones de operación del sistema de potencia, *DYNFUN* y *EVFUN* son archivos tipo *file.m* o variables tipo estructura con la información dinámica y la especificación de los eventos transitorios respectivamente. El parámetro *OPTION* es opcional y se refiere a las opciones del proceso de simulación, tales como la selección del método numérico de resolución de las ecuaciones diferenciales, la tolerancia, etc. En caso de ausencia de este parámetro se usan las opciones por defecto preestablecidas en MatDyn, es decir el método de Runge Kutta.

2.2 Introducción de datos en el programa.

2.2.1 Introducción de la información de la topología y condiciones de operación de la red.

MatDyn utiliza el mismo formato del MatPower para introducir y ejecutar un flujo de potencia previo al análisis dinámico y así determinar sus condiciones iniciales. La información de entrada es especificada en un archivo tipo *file.m* o una variable tipo estructura. El archivo *PFFUN* define una variable tipo estructura denominada *mpc* “*MatPower case*” la cual está compuesta por cinco campos: “*system MVA base*”, “*bus data*”, “*branch data*”, “*generator data*” y “*generator cost data*”.

2.2.2 Formato de la información dinámica.

La información dinámica consta de los datos generales de simulación, datos del generador, datos de la excitación y los datos del gobernador. En el archivo *DYNFUN* tipo *file.m* consta de las matrices *gen*, *exc*, *gov* y los escalares *freq*, *stepsize* y *stoptime*. Alternativamente estos datos se pueden definir por una estructura de la siguiente forma:

```
DYNFUN=struct('gen',gen,'exc',exc,'gov',gov,'freq',freq,'stepsize',stepsize,'stoptime',stoptime);
```

Los datos generales consisten en la frecuencia del sistema, el paso de integración del algoritmo y el tiempo de parada. En la figura 2.1 se muestra la tabla de los datos generales, todos son escalares:

freq	network frequency [Hz]
stepsize	stepsize of the integration algorithm [s]
stoptime	stoptime of the simulation [s]

Figura 2.1 Tabla de datos generales dentro del archivo de información dinámica.

Para los datos del generador se define la matriz llamada *gen*. Esta matriz tiene tantas filas como generadores existen mientras que las columnas representan características propias del modelo del generador a utilizar. MatDyn maneja dos modelos de generadores, un modelo de cuarto orden y un modelo clásico, cuyas características se muestran en las figuras 2.2 y 2.3 respectivamente.

4th order model	
1	<i>genmodel</i> , generator model
2	<i>excmodel</i> , exciter model
3	<i>govmodel</i> , governor model
4	H , inertia constant (p.u.)
5	D , damping constant (p.u.)
6	x_d , d-axis reactance (p.u.)
7	x_q , q-axis reactance (p.u.)
8	x'_d , d-axis transient reactance (p.u.)
9	x'_q , q-axis transient reactance (p.u.)
10	T'_d , d-axis time constant (s)
11	T'_q , q-axis time constant (s)

Figura 2.2 Tabla de datos para el modelo del generador de 4^{to} orden

classical model	
1	<i>genmodel</i> , generator model
2	<i>excmodel</i> , exciter model
3	<i>govmodel</i> , governor model
4	H , inertia constant (p.u.)
5	D , damping constant (p.u.)
6	x , reactance (p.u.)
7	x' , transient reactance (p.u.)

Figura 2.3 Tabla de datos para el modelo clásico del generador

Los datos de la excitatriz son definidos en la matriz *exc*. Esta matriz tiene tantas filas como generadores existen y las columnas representan características propias del modelo de la excitación. MatDyn define dos modelos, un primer modelo que es de excitación constante y un segundo modelo que corresponde al modelo de excitatriz IEEE DC1A. En la figura 2.4 se muestran los atributos del modelo *IEEE*

DC1A. Si toma una excitación constante, sólo se especifica el número del generador y los otros atributos se dejan en cero.

Table 4: Exciter data format	
IEEE DC1A model	
1	gen , number of the generator
2	K_a , amplifier gain
3	T_a , amplifier time constant
4	K_e , exciter gain
5	T_e , exciter time constant
6	K_f , stabilizer gain
7	T_f , stabilizer time constant
8	A_{ex} , parameter saturation function
9	B_{ex} , parameter saturation function
10	U_{rmin} , lower voltage limit
11	U_{rmax} , upper voltage limit

Figura 2.4 Tabla de datos para el modelo de la excitatriz *IEEE DC1A*

Por último, los datos del gobernador y la turbina son definidos en la matriz *gov*. Esta matriz tiene tantas filas como generadores existen y las columnas representan características propias del gobernador. Existen dos modelos de gobernadores, un primer modelo que considera que la turbina es movida por una potencia mecánica constante y un segundo modelo que corresponde al sistema gobernador de velocidad del IEEE. En la figura 2.5 se muestran los parámetros de un sistema gobernador de velocidad general del IEEE. Si se usa un gobernador de potencia constante sólo se debe especificar el número del generador, es decir el atributo 1 y los otros valores se colocan en cero.

General IEEE governor model	
1	gen , number of the generator
2	K , droop
3	T_1 , time constant
4	T_2 , time constant
5	T_3 , servo motor time constant
6	P_{up} , upper ramp limit
7	P_{down} , lower ramp limit
8	P_{max} , maximal turbine output
9	P_{min} , minimal turbine output

Figura 2.5 Tabla de datos del gobernador modelo IEEE

2.2.3 Formato de la información de los eventos

El archivo de datos de los eventos *EVFUN* define tres matrices: *event*, *buschange*, y *linechange*, que también puede ser introducida como un archivo tipo estructura definida como sigue:

$$EVFUN = \text{struct}('event', event, 'buschange', buschange, 'linechange', linechange)$$

La matriz *event* contiene todos los eventos que toman lugar durante la simulación. La primera columna define el instante de tiempo del evento, la segunda el tipo de evento, en la figura 2.6 se muestra el formato:

Event data format	
1	$time$, instant of change (s)
2	$eventtype$

Figura 2.6 Formato de datos de la matriz *event*

La figura 2.7 muestra los tipos de eventos disponibles en MatDyn. En el caso que la matriz de evento este vacía se obtiene la solución de estado estable o estacionario del sistema.

Event types	
1	change bus parameters
2	change line parameters

Figura 2.7 Formato de datos de los tipos de eventos disponibles en MatDyn

Los parámetros que modelan una barra del sistema (bus) pueden cambiar durante la simulación los cuales se especifican en la matriz *buschange* que se muestra en la figura 2.8. Al cambiar atributos convenientes de los buses se puede simular la aplicación y despeje de fallas en los buses.

Buschange data format	
1	<i>time</i> , instant of change (s)
2	<i>bus</i> , bus number
3	<i>parameter</i> , bus parameter to change
4	<i>newvalue</i> , new parameter value

Figura 2.8 Formato de datos de la matriz *buschange* del archivo de eventos

Igualmente los parámetros que modelan las líneas de transmisión o transformadores del sistema también pueden cambiar durante la simulación, la estructura se muestra en la figura 2.9. MatDyn se vale de estos cambios para simular la apertura o cierre de líneas o transformadores durante la simulación.

Linechange data format	
1	<i>time</i> , instant of change (s)
2	<i>line</i> , line number
3	<i>parameter</i> , line parameter to change
4	<i>newvalue</i> , new parameter value

Figura 2.9 Formato de datos de la matriz *linechange* del archivo de eventos

2.3 Variables de salida obtenidas del MatDyn

A partir del MatDyn se obtiene como salidas las variables mostradas en la figura 2.10:

Angles	Generator angles in degrees
Speeds	Generator speeds/synchronous speed
Eq_tr	Q-axis component of the voltage behind transient reactance in p.u.
Ed_tr	D-axis component of the voltage behind transient reactance in p.u.
Efd	Excitation voltage in p.u.
PM	Mechanical output power of the turbine in p.u.
Voltages	Network voltages $U\angle\delta$ in p.u. and radians
Stepsize	Step size of the integration
Errest	Estimation of the error (Only defined for the adaptive step size methods, Runge-Kutta Fehlberg and Higham and Hall. Set to zero for Modified Euler and standard Runge-Kutta methods.)
Time	Vector of time steps in seconds

Figura 2.10 Variables de salida obtenidas del MatDyn

2.4 Breve descripción del proceso de simulación en el programa MatDyn

El sistema de potencia en MatDyn está representado por el conjunto de ecuaciones diferenciales-algebraicas que se muestran a continuación:

$$\dot{X} = F(X, Y, P) \quad (2.1)$$

$$0 = G(X, Y, P) \quad (2.2)$$

donde X son variables de estado, Y son variables algebraicas y P son parámetros. En MatDyn el conjunto de ecuaciones diferenciales F pertenece a las ecuaciones dinámicas de los generadores, excitatrices y gobernadores mientras que las ecuaciones algebraicas G contienen las ecuaciones del flujo de potencia y las ecuaciones de las corrientes del estator de los generadores.

El diagrama de flujo resumido del MatDyn es representado esquemáticamente en la figura 2.11.

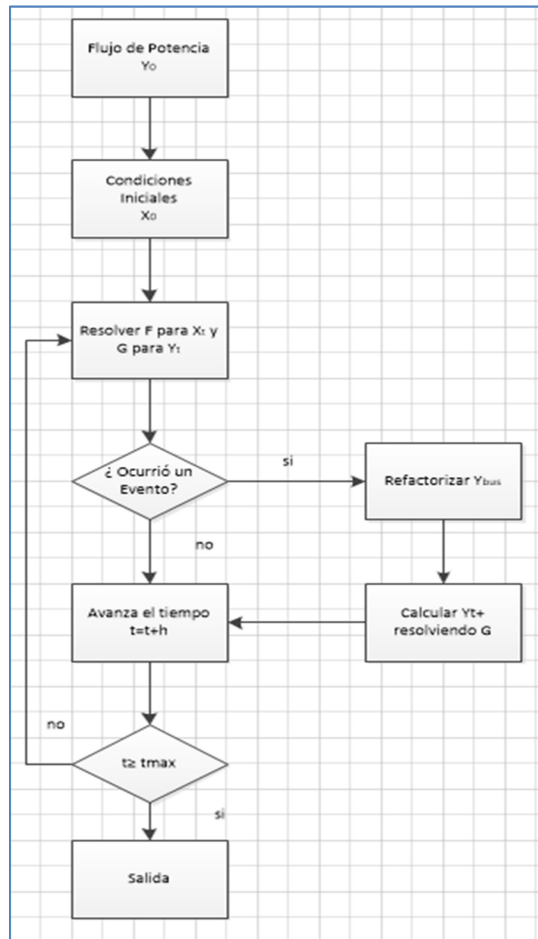


Figura 2.11 Diagrama de flujo resumido del programa MatDyn

MatDyn utiliza el MatPower para obtener la solución al flujo de potencia, luego determina y factoriza la matriz de admitancia Y_{bus_aug} , así como las condiciones iniciales de los generadores, excitatrices, y gobernadores también son obtenidas. Cuando el sistema establece las condiciones de estado estable el lazo principal se inicia. El conjunto de ecuaciones diferenciales F es integrado, y el conjunto de ecuaciones algebraicas G resuelto. Si un evento ocurre, la matriz de admitancia Y_{bus_aug} es refactorizada y las ecuaciones algebraicas G , que consisten de las ecuaciones de la red y las ecuaciones de corriente del estator, son recompuestas. Por último, las variables de interés son almacenadas y el tiempo es incrementado en un Δt hasta llegar al fin de la simulación.

2.5 Breve descripción de los métodos numéricos utilizados en el MatDyn

Aunque las ecuaciones diferenciales-algebraicas del sistema pueden ser resueltas simultáneamente, el MatDyn utiliza un esquema particionado, es decir primero resuelve las ecuaciones diferenciales y luego las algebraicas, esto para darle más legibilidad al código. Para resolver las ecuaciones diferenciales MatDyn cuenta con varios métodos, de los cuales destacan el Euler Modificado, Runge-Kutta y Runge-Kutta Fehlberg.

El grueso de las ecuaciones algebraicas pertenece al flujo de potencia. Después de cada evento Δt de integración de las ecuaciones diferenciales, las ecuaciones de red del sistema tienen que ser resueltas. Esto conduce a un gran esfuerzo computacional que es reducido sustancialmente al considerar solo el modelo de los generadores de polos lisos y a las cargas como admitancias constantes.

2.6 Modelos de los componentes del sistema de potencia utilizados en MatDyn.

2.6.1 Modelos de los generadores sincrónicos.

MatDyn utiliza dos modelos para generadores, el primero es el bien conocido modelo clásico del generador y el otro es el modelo del generador de cuarto orden. Para el modelo de cuarto orden los arrollados amortiguadores son ignorados pero el amortiguamiento puede ser tomado en cuenta incrementando la constante de amortiguamiento D.

2.6.2 Modelos de la excitatriz, turbinas y gobernadores

El modelo de excitación *IEEE DC1A* cuya constante de tiempo T_r del regulador es considerada cero, se muestra en la figura 2.12.

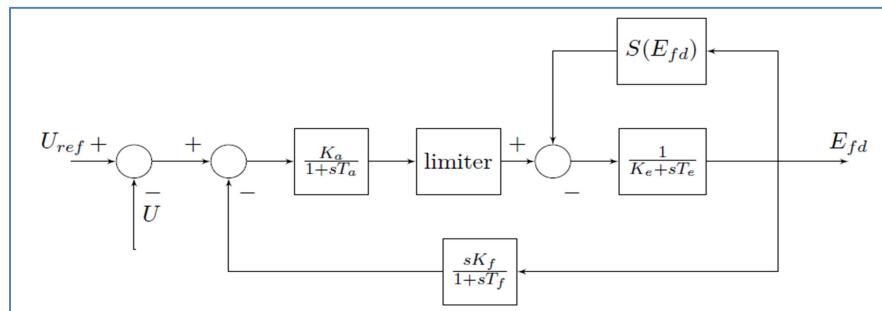


Figura 2.12 Sistema de excitación IEEE DC1A.

El gobernador puede ser representado por el modelo general de la IEEE para sistemas velocidad-gobernador de turbinas de vapor. Con la selección apropiada de los parámetros este modelo puede ser usado para representar turbinas hidráulicas, el mismo se muestra en la figura 2.13

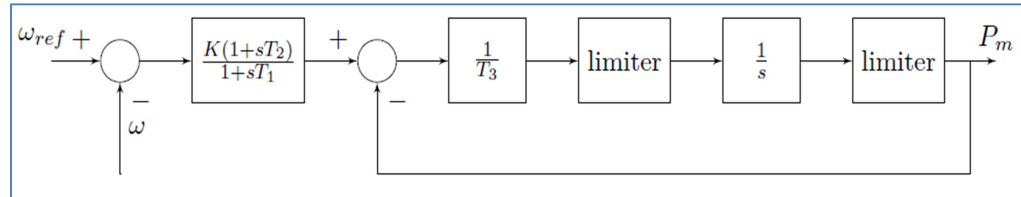


Figura 2.13 Sistema gobernador-velocidad general de la IEEE.

2.6.3 Modelos de las cargas

En los estudios de flujo de potencia y estabilidad es común representar las cargas como bloques de potencia colocados en barras específicas del sistema, los modelos tradicionalmente se clasifican en dos amplias categorías: modelo dinámico y modelo estático [6].

En el modelo dinámico las respuestas de tensión y frecuencia son muy rápidas y está fuera del alcance de este trabajo, por otra parte, el modelo estático es el usado por el MatDyn.

En el modelo estático las cargas se representan por funciones algebraicas polinomiales dependientes de la tensión. Las ecuaciones 2.3 y 2.4 representan este modelo:

$$P = P_0[p_1V^2 + p_2V + p_3] \quad (2.3)$$

$$Q = Q_0[q_1V^2 + q_2V + q_3] \quad (2.4)$$

Este modelo es comúnmente referido como el modelo *ZIP* donde se puede representar a la carga solo como de impedancia constante (*Z*), corriente constante (*I*) y potencia constante (*P*). También se puede modelar una combinación al colocar valores apropiados a los parámetros *p* y *q*. MatDyn utiliza un modelo de impedancia constante, por lo tanto en las ecuaciones anteriores los parámetros p_1 y q_1 son iguales a 1 y los otros se igualan a cero.

CAPITULO III

ANÁLISIS DE UN CASO DE ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEBIDO A FALLA TRIFÁSICA UTILIZANDO EL MATDYN

En este capítulo se muestra el uso del MatDyn mediante el análisis de estabilidad transitoria de un sistema de prueba de nueve barras [2]. También servirá para ilustrar la forma de introducir los datos y observar las variables de salida que muestra el programa original al ser ejecutado.

3.1 Descripción del sistema de nueve barras del *IEEE*

En la figura 3.1 se muestra la topología del sistema de prueba de nueve barras de la IEEE [2] que se analiza. El evento que se considera es una falla trifásica cercana a la barra 7 sobre la línea 5-7. Esta línea es desconectada en ambos extremos para eliminar la falla, esto ocurre a los cinco ciclos o aproximadamente a 0.083 segundos después del inicio de la falla trifásica. Los datos del sistema de transmisión se describen en el apéndice 2.

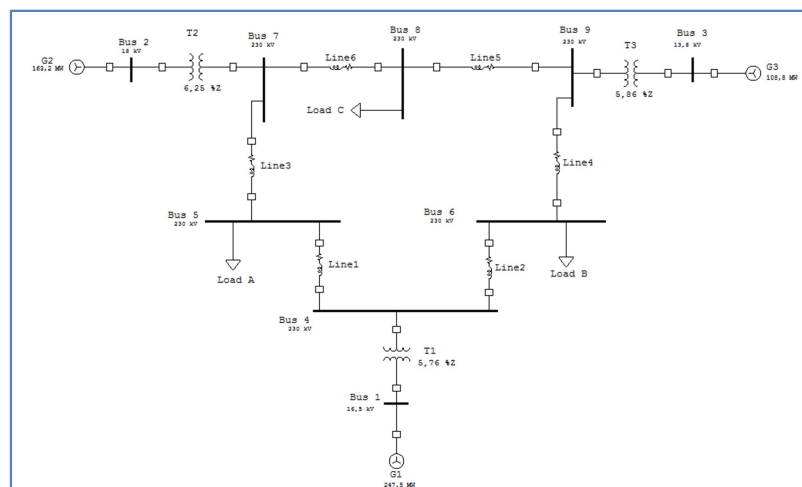


Figura 3.1 Sistema de prueba de nueve barras del IEEE.

Para ejecutar una simulación dinámica en MatDyn, tres archivos tipo *file.m* o tipo estructura deben ser introducidos: la información de la topología y condiciones de operación antes de la perturbación, la información dinámica de los generadores y la información del (o los) eventos.

Consultado el manual del MatPower [4], los datos de la topología y condiciones de operación de la red son introducidos en el archivo tipo *case9.m* (figura 3.2) y a partir de éste se ejecuta el flujo de potencia.

```
%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
mpc.bus = [
1 3 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;
2 2 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;
3 2 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;
4 1 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;
5 1 125 50 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;
6 1 90 30 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;
7 1 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;
8 1 100 35 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;
9 1 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;
];

%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2 Qc1m
mpc.gen = [
1 0 0 300 -300 1.04 100 1 250 10 0 0 0 0 0 0 0;
2 163 0 300 -300 1.025 100 1 300 10 0 0 0 0 0 0 0;
3 85 0 300 -300 1.025 100 1 270 10 0 0 0 0 0 0 0;
];

%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status
mpc.branch = [
1 4 0 0.0576 0 250 250 250 0 0 1 -360 360;
4 6 0.017 0.092 0.158 250 250 250 0 0 1 -360 360;
6 9 0.039 0.17 0.358 150 150 150 0 0 1 -360 360;
3 9 0 0.0586 0 300 300 300 0 0 1 -360 360;
8 9 0.0119 0.1008 0.209 150 150 150 0 0 1 -360 360;
7 8 0.0085 0.072 0.149 250 250 250 0 0 1 -360 360;
2 7 0 0.0625 0 250 250 250 0 0 1 -360 360;
5 7 0.032 0.161 0.306 250 250 250 0 0 1 -360 360;
4 5 0.01 0.085 0.176 250 250 250 0 0 1 -360 360;
];
```

Figura 3.2 Información de la topología y condiciones de operación del sistema del caso de nueve barras del IEEE.

3.2 Introducción de los datos dinámicos del sistema de nueve barras.

Similarmente a la introducción de los datos del sistema, la información dinámica se carga en el archivo *case9dyn.m* el cual contiene los datos referentes a los valores de impedancias y constantes de tiempo de los generadores e información

general, tal como el tiempo de simulación y el tamaño del paso Δt para el método numérico. En la figura 3.3 se muestra los datos dinámicos introducidos (tabla II.4.del apéndice II).

```
%% General data
freq = 60;
stepsize = 0.001;
stoptime = 3;

%% Generator data
% [ genmodel excmodel govmodel H D x x'=xsec1
gen=[1 1 1 23.64 0 0.0608 0.0608 0 0 0
     1 1 1 6.40 0 0.1198 0.1198 0 0 0
     1 1 1 3.01 0 0.1813 0.1813 0 0 0

%% Exciter data
% [gen Ka Ta Ke Te Kf Tf Aex Bex Ur_min Ur_max]
exc=[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
     2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
     3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];

%% Governor data
% [gen K T1 T2 T3 Pup Pdown Pmax Pmin]
gov=[1 0 0 0 0 0 0 0 0;
     2 0 0 0 0 0 0 0 0;
     3 0 0 0 0 0 0 0 0];
```

Figura 3.3 Datos dinámicos del caso de nueve barras.

3.3 Introducción de los datos de los eventos del caso de nueve barras

Este archivo, como se menciona en el capítulo anterior, está definido por tres matrices: *event*, *buschange* y *linechange*. La matriz *event* define el instante de tiempo cuando ocurre la falla (o evento) y su tipo. Dependiendo si es un cambio en una barra (*buschange*) o un cambio en una línea (*linechange*) los valores y atributos de estas dos siguientes matrices son tomados en cuenta. En la figura 3.4 se muestra el archivo *case9event.m* en donde se establecen los eventos en el sistema bajo estudio para una falla trifásica.

```

%%
% event = [time type]
event=[0.2      1;
       0.283   1;
       0.283   2];

% buschange = [time bus(row) attribute(col) new_value]
buschange = [0.2    2    5   -1e10;
             0.283  2    5    0];

% linechange = [time line(row) attribute(col) new_value]
linechange = [0.283 8 11 0];

```

Figura 3.4 Datos de los eventos introducidos en la estructura de datos.

3.4 Ejecución del programa MatDyn

Luego de introducir todos los datos referentes al sistema de potencia y a la ubicación, instante y característica(s) del (de los) evento(s) se introducen en la ventana principal del Matlab la siguiente instrucción:

$$\text{rundyn('case9','case9dyn','case9event')}$$

Esta función ejecuta el análisis de estabilidad transitoria con las características introducidas en los diferentes archivos *file.m* o estructuras descritas en los párrafos anteriores. Si se requiere de algún cambio en los parámetros del sistema o en las características del evento, en estas estructuras, se pueden realizar las modificaciones y ejecutarse nuevamente.

3.5 Variables de salida del programa y resultados

MatDyn trabaja en conjunto con el MatPower y son visibles las salidas de ambos programas al ejecutar un análisis de estabilidad transitoria. Por lo tanto, lo que se muestra inicialmente como salida es el resultado del flujo de potencia, este se muestra en la figura 3.5.

Bus Data									
Bus #	Voltage		Generation		Load				
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)			
1	1.040	0.000*	71.64	27.05	-	-			
2	1.025	9.280	163.00	6.65	-	-			
3	1.025	4.665	85.00	-10.86	-	-			
4	1.026	-2.217	-	-	-	-			
5	0.996	-3.989	-	-	125.00	50.00			
6	1.013	-3.687	-	-	90.00	30.00			
7	1.026	3.720	-	-	-	-			
8	1.016	0.728	-	-	100.00	35.00			
9	1.032	1.967	-	-	-	-			
Total:			319.64	22.84	315.00	115.00			

Branch Data									
Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss ($I^2 * Z$)		
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	
1	1	4	71.64	27.05	-71.64	-23.92	-0.000		3.12
2	4	6	30.70	1.03	-30.54	-16.54	0.166		0.90
3	6	9	-59.46	-13.46	60.82	-18.07	1.354		5.90
4	3	9	85.00	-10.86	-85.00	14.96	0.000		4.10
5	8	9	-24.10	-24.30	24.18	3.12	0.088		0.75
6	7	8	76.38	-0.80	-75.90	-10.70	0.475		4.03
7	2	7	163.00	6.65	-163.00	9.18	-0.000		15.83
8	5	7	-84.32	-11.31	86.62	-8.38	2.300		11.57
9	4	5	40.94	22.89	-40.68	-38.69	0.258		2.19

> Power flow converged

Figura 3.5 Resultado del flujo de potencia para el sistema bajo estudio de nueve barras.

Luego se observan las gráficas de las variables más importantes del estudio de estabilidad transitoria. Las de mayor interés son los ángulos de carga, velocidades de los generadores y las tensiones en cada una de las barras del sistema, todas ellas en función del tiempo. En las figura 3.6 y 3.7 se muestran los comportamientos angulares de los generadores 2 y 3 referenciados con respecto al generador 1. Sobre la misma gráfica se muestran los resultados obtenidos por un software PowerWorld [3], para validar resultados.

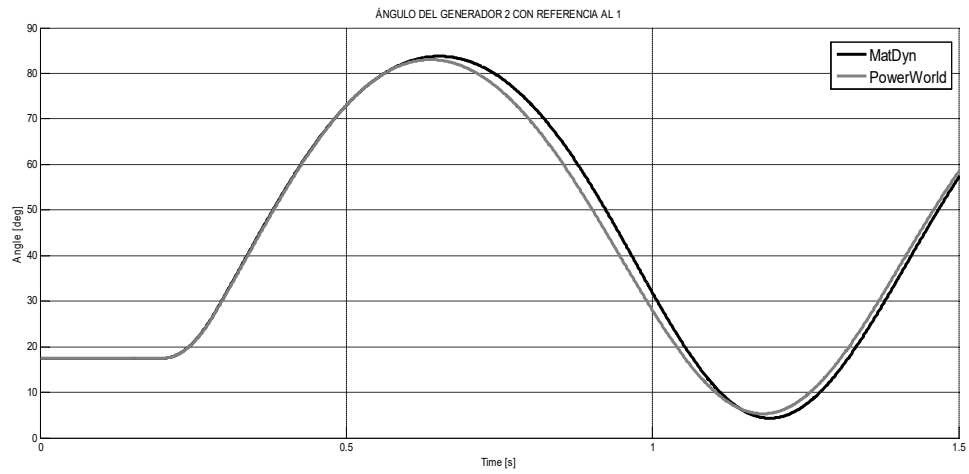


Figura 3.6 Ángulo de carga del generador 2 con referencia al 1.

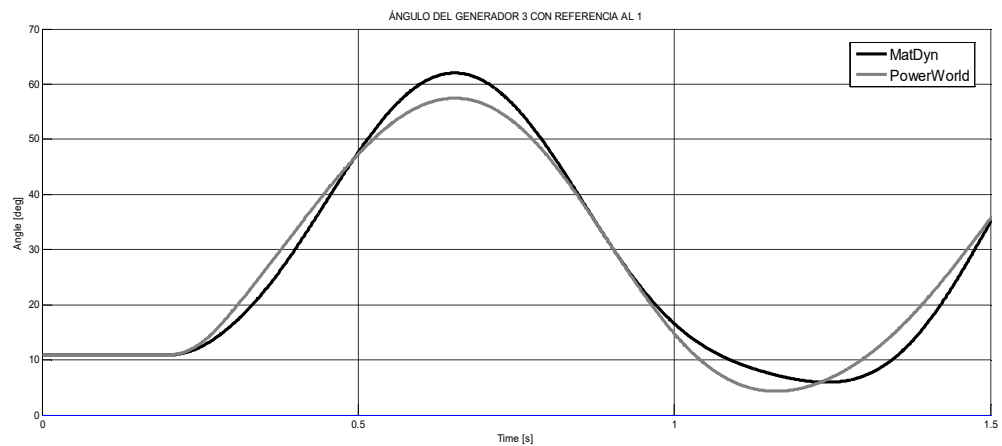


Figura 3.7 Ángulo de carga del generador 3 con referencia al 1.

Se puede observar un comportamiento muy similar en ambos resultados, las diferencias pueden ser atribuidas a varios factores; Entre ellos la forma de resolución de las ecuaciones diferenciales, los modelos de los generadores y sus controles, que en el software PowerWorld son más detallados.

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN EN MATDYN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA PARA LA FALLA MONOFÁSICA A TIERRA

MatDyn realiza el análisis de estabilidad transitoria debido a fallas trifásicas y se basa en la estructura del MatPower para obtener las condiciones iniciales del sistema antes de presentarse algún evento, que puede ser un cambio en una barra o un cambio en una línea (o transformador). En este capítulo se describen las modificaciones realizadas al MatDyn para la inclusión de la falla monofásica a tierra dentro de sus eventos disponibles.

Para incluir la falla monofásica sin cambiar significativamente la estructura y legibilidad del programa original, se crean dos estructuras de datos o archivos *file.m* con la información de las impedancias de secuencia del sistema, (secuencia cero y negativa), se hacen cambios en el numero de los parámetros de entrada de la función principal del programa *rundyn.m*, se utiliza la función del MatPower llamada *MakeYbus.m*, se modifica esta función para adecuarla al cálculo de las matrices de admitancias de secuencia cero y negativa, se agregan líneas de código al programa principal y se crea una función que determina las impedancias equivalentes de Thevenin. Por último, se adecuan estas impedancias equivalentes y se agregan a la red de secuencia positiva para el estudio de la estabilidad transitoria.

4.1 Inclusión de la información de impedancias de secuencia del sistema

En MatDyn original un archivo tipo *file.m* da la información de todos los elementos del sistema de transmisión de potencia, tales como líneas, transformadores, elementos shunt y cargas. Toda esta información es de secuencia positiva y corresponde al archivo '*case9.m*', por ejemplo. Aquí se incluye la primera

modificación, añadir dos archivos *file.m* que incluyan la información de secuencia. En nuestro caso se usan '*caseXbarrasSec2*' y '*caseXbarrasSec0*' para denotar los nombres de los archivos de secuencia negativa y cero respectivamente. Para el caso de secuencia cero se da información adicional que incluye el tipo de conexión de los transformadores, delta-estrella a tierra o viceversa.

4.2 Modificación de la función principal *rundyn*.

La función principal del MatDyn lo representa la función de nombre *rundyn* cuyo encabezado se muestra a continuación:

rundyn(*casefile_pf*, *casefile_dyn*, *casefile_ev*, *mdopt*)

Por lo tanto, se cambia el nombre de la función a *rundynmodf* y luego se agregan dos estructuras con los parámetros de entrada de secuencia negativa y cero del sistema a estudiar, esto se muestra como:

rundynmodf(*casefile_pf*, *casefile_dyn*, *casefile_ev*, *casefilesec0*, *casefilesec2*, *mdopt*)

Para esta nueva función se debe cambiar un indicador interno al programa que contabiliza las variables de entrada de la función (*nargin*), de 4 a 6. Cabe mencionar que el programa y sus modificaciones son mostrados en el apéndice III.

4.3 Modificación de la función *MakeYbus.m* del MatPower.

La función *MakeYbus.m* original del MatPower toma como argumento de entrada valores extraídos del archivo '*caseXbarras.m*' descrito en el apartado anterior. Con la información obtenida de éste archivo se crea un modelo para cada elemento de rama. Este modelo es un cuadripolo tanto para transformadores como líneas, el cual es mostrado en la figura 4.1.

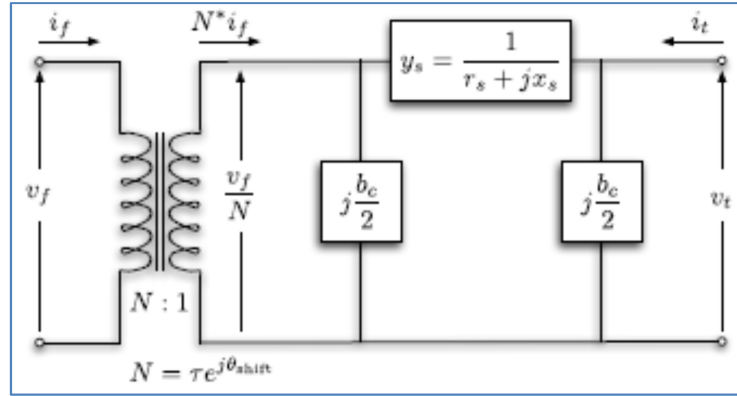


Figura 4.1 Modelo de elementos de rama utilizado en MatDyn

Las ecuaciones que caracterizan éste cuadripolo son las siguientes:

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} \left(y_s + j\frac{b_c}{2}\right)\frac{1}{\tau^2} & -y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ -y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} & \left(y_s + j\frac{b_c}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Por cada transformador o línea se crea una matriz de Y_{br} , que mediante un algoritmo se combina con las cargas y elementos shunt del sistema para crear la matriz Y_{bus} , todo esto lo realiza la función *MakeYbus.m* del MatPower.

La función *MakeYbus.m* no necesita modificarse para calcular las matrices de red Y_{bus} de secuencia positiva y negativa, solo debe tomar la información de los archivos de casos *caseXbarras.m* y *caseXbarrasSec2.m* respectivamente. Para el caso de la matriz Y_{bus} de secuencia cero, la función original debe modificarse ya que no toma en cuenta la conexión de los transformadores. El primer cambio que se introduce, es en el archivo de caso de secuencia cero '*caseXbarrasSec0*'. Este incluye el tipo de conexión de los transformadores del sistema, en nuestra modificación se incluyeron solo la conexión delta-estrella a tierra.

El segundo consiste en modificar la matriz del cuadripolo que representa a los transformadores en secuencia cero en la función *MakeYbus.m*.

Para el caso estrella a tierra a delta

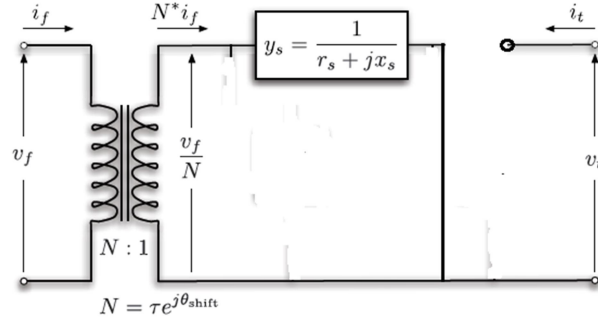


Figura 4.2 Modelo del transformador conexión estrella a tierra-delta en secuencia cero para MatDyn modificado

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} (y_s) \frac{1}{\tau^2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Para el caso delta a estrella a tierra

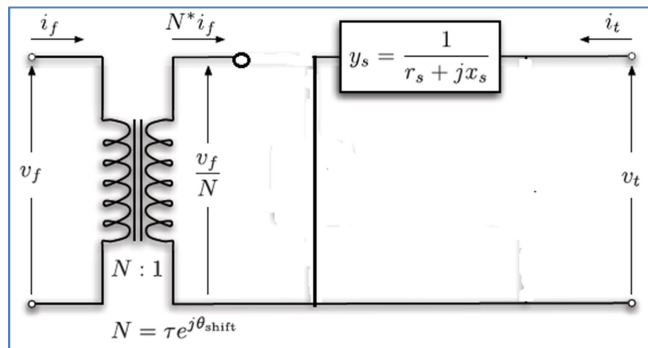


Figura 4.3 Modelo del transformador conexión delta – estrella a tierra en secuencia cero para MatDyn modificado

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & (y_s) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Los restantes elementos del sistema de potencia en secuencia cero tienen su matriz del cuadripolo igual a la ecuación (4.1), y se genera la nueva función *MakeYbusSec0.m*.

4.4 Modificaciones a los archivos con la información dinámica del MatDyn

La información dinámica de los generadores en el *MatDyn* se encuentran en el archivo *casedyn.m*. Al cual se agregan varias columnas o atributos: dos para la información de impedancia de secuencia (negativa y cero) de los generadores, una para indicar el tipo de conexión del estator y una para el valor de la impedancia de neutro cuando la conexión es en estrella. En nuestro estudio solo se incluye el generador en conexión estrella sólidamente a tierra. En la figura 4.2 se muestra el archivo *casedyn.m* modificado.

```
% [genmodel excmodel govmodel H D xd xq xd_tr xq_tr Td_tr Tq_tr ]
% [ genmodel excmodel govmodel H D x x'=xsec1 xsec0 xsec2 tipo de conexion Zn ]

gen=[1 1 1 23.64 0 0.0608 0.0608 0 0 0 0 0.0404 0.0808 0 0;
     1 1 1 6.40 0 0.1198 0.1198 0 0 0 0 0.1042 0.0521 0 0;
     1 1 1 3.01 0 0.1813 0.1813 0 0 0 0 0.1563 0.0781 0 0];
```

Figura 4.4 Archivo *casedyn* modificado para falla monofásica.

4.5 Modificaciones a los archivos de información de eventos del MatDyn

La información de los eventos se encuentra en el archivo *caseXevent.m*. Para el evento tipo falla monofásica se deben agregar al tipo de evento los siguientes opciones: la 3 que define una falla monofásica a tierra y la 4 que define su despeje, esto se toma en cuenta en la matriz *event*. Por otro lado, la matriz *buschange* se

modifica al agregarle dos columnas, esto debido a que cuando ocurre una falla monofásica, se deben identificar y modificar tanto un elemento del bus como un atributo adicional. En la figura 4.3 se muestra el archivo.

```
event=[ 0.2 3;
        0.283 4;
        0.283 2;]

% buschange = [time bus(row) attribute(col) new_value attribute(col) new_value]
buschange = [0.2 7 5 0 6 0 ;
             0.283 7 5 0 6 0 ];

% linechange = [time line(row) attribute(col) new_value]
linechange = [0.283 8 11 0];
```

Figura 4.5 Archivo *caseXevent* modificado para falla monofásica.

4.6 Modelos de carga del MatDyn

Los modelos de carga del MatDyn son de admitancia constante, para el análisis de eventos con fallas monofásicas se toma el mismo valor de impedancia de secuencia positiva para cada una de las secuencias.

4.7 Modificación de la función AugYbus del MatDyn para el cálculo de las matrices aumentadas de secuencia.

Al igual al caso de la función *MakeYbus.m* la función que calcula la matriz aumentada *AugYbus.m* debe ser modificada. Para secuencia positiva y negativa la función original trabaja adecuadamente, pero para secuencia cero se debe tomar en cuenta la nueva función *MakeYbusSec0.m* y de esta manera obtener esta Y_{bus_aug} de secuencia cero.

4.8 Función para obtener las impedancias equivalentes de Thevenin de las redes de secuencia negativa y cero en el punto de falla.

A partir de la función *AugYbus.m* se determinan las matrices de admitancia de barra aumentadas de secuencia negativa y cero, el siguiente paso es determinar las impedancias equivalentes en el punto de falla de ambas matrices, para luego añadirlas a la matriz de red de secuencia positiva y refactorizar nuevamente la matriz de admitancia Y_{bus_aug} aumentada del sistema.

El posible invertir directamente las matrices y tomar el elemento de interés, pero computacionalmente esto podría acarrear problemas de redondeo para matrices de grandes dimensiones. Por lo que se optó, en crear una función que obtiene este elemento directamente de las matrices de admitancia Y_{bus} aumentadas [5]. Esto se realiza factorizando la matriz Y_{bus_aug} aumentada en sus matrices inferior y superior es decir LU ,

$$Y_{bus_aug} = L * U \quad (4.4)$$

Luego con la información de donde ocurre la falla se crea un vector del tamaño de los buses con ceros, excepto en el punto de falla (k) donde se coloca un uno.

$$X_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1_k \ 0]^t \quad (4.5)$$

Se obtiene un vector X_k con el siguiente producto:

$$X_2 = L^{-1} * X_1 \quad (4.6)$$

Luego se realiza el siguiente producto:

$$Z_2 = U^{-1} * X_2 \quad (4.7)$$

El vector Z_2 representa la columna k de la matriz de impedancia Z_{barra} de donde obtenemos el elemento Z_{kk} que corresponde a la impedancia equivalente de Thevenin. En la figura 4.4 se muestra la función implementada.

```
function [Zth2] = Zsecth( L,U,pf,N)
%Funcion Zsecth calcula la Z equivalente de Thevenin en el punto de falla
%de una red de admitancia Ybus aumentada

% L= Matriz L de la Ybus aumentada
% U= Matriz U de la Ybus aumentada
% pf= vector con informacion de los buses donde ocurre la falla
% N= numero de buses del sistema

X1=zeros(N,1); %Vector de ceros tamaño N buses
i=pf(1); % obtiene el numero del bus donde ocurre la falla.
X1(i)=1; % Coloca un 1 en el bus donde ocurre la falla.
X2=(L^-1)*X1;
Z2=(U^-1)*X2;
Zth2=Z2(i); % Toma el elemento equivalente de thevenin en el punto de falla
end
```

Figura 4.6 Función que calcula Z_{th} a partir de la Y_{bus} aumentada

Las impedancias equivalentes de Thevenin Z_{2th} y Z_{0th} respectivamente, no se pueden adicionar directamente a la matriz de admitancia de red de secuencia positiva para el caso falla monofásica, luego de sumarse se obtiene una impedancia serie, que se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Z_{eq} = Z_{2th} + Z_{0th} = R_s + jX_s \quad (4.8)$$

Esta impedancia serie se añade en forma de impedancia paralelo ya que es la forma más fácil de implementar usando los atributos de barra ya establecidos en el programa original de MatDyn. La forma de conversión se obtiene del análisis de redes eléctricas, la figura 4.5 ilustra el cambio y las ecuaciones (4.9) y (4.10) muestran la equivalencia.

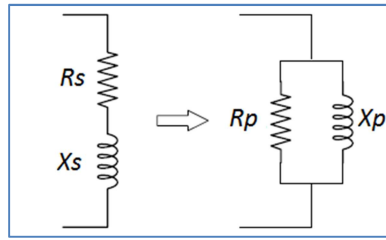


Figura 4.7 Conversión de impedancias de serie a paralelo

$$Rp = \frac{(R_s)^2 + (X_s)^2}{R_s} \quad (4.9)$$

$$Xp = \frac{(R_s)^2 + (X_s)^2}{X_s} \quad (4.10)$$

Finalmente siguiendo las reglas para el cambio de atributos en los buses del MatDyn se añaden estos valores en el punto de falla y se refactoriza la matriz de red de admitancias aumentada Y_{bus_aug} de secuencia positiva del sistema.

4.9 Lectura de las estructuras o archivos *file.m* con la información de secuencia

Los datos de secuencia son cargados en el cuerpo del programa principal de MatDyn de manera similar a como se leen los datos de secuencia positiva. La modificación realizada consiste en añadir para cada uno de los datos de secuencia negativa y cero, estas líneas se muestra en la figura 4 .5.

```
%Introduccion de datos de secuencia negativa
mpc2 = loadcase(casefilesec2);
mpc2 = ext2int(mpc2);
[baseMVA, bus2, gen2, branch2] = deal(mpc2.baseMVA, mpc2.bus, mpc2.gen, mpc2.branch);

%Introduccion de datos de secuencia cero
mpc0 = loadcase(casefilesec0);
mpc0 = ext2int(mpc0);
[baseMVA, bus0, gen0, branch0] = deal(mpc0.baseMVA, mpc0.bus, mpc0.gen, mpc0.branch);
```

Figura 4.8 Carga de datos de secuencia negativa y cero en MatDyn

Para el caso de los generadores, la lectura de los datos de secuencia positiva estaba por defecto en MatDyn mientras que para leer los datos de secuencia negativa y cero, se añaden códigos similares a la estructura principal del programa. Estas modificaciones se muestran en la figura 4.6

```
% Se toman los datos de secuencia negativa de los generadores
xd_tr2 = zeros(ngen,1);
xd_tr2(genmodel==2) = Pgen0(genmodel==2,14); % 4th order model: xd_tr column 8
xd_tr2(genmodel==1) = Pgen0(genmodel==1,14); % classical model: xd_tr column 7

% Se toman los datos de secuencia cero de los generadores
xd_tr0 = zeros(ngen,1);
xd_tr0(genmodel==2) = Pgen0(genmodel==2,13); % 4th order model: xd_tr column 8
xd_tr0(genmodel==1) = Pgen0(genmodel==1,13); % classical model: xd_tr column 7
```

Figura 4.9 Lectura de impedancias de secuencia de los generadores

MatDyn solo identifica dos tipos de eventos: fallas trifásicas en barra y conexión y desconexión de líneas y transformadores. Para incluir la falla monofásica a tierra en una barra se añaden dos tipos de eventos: un evento de conexión y otro evento de desconexión de la falla monofásica a tierra. Estos nuevos eventos se incluyen en la estructura principal del programa con las siguientes líneas de código mostradas en la figura 4.7.

```
switch event(ev,2)

case 1
    bus(buschange(ev,2),buschange(ev,3)) = buschange(ev,4); %Falla trifasica en bus
case 2
    branch(linechange(ev,2),linechange(ev,3)) = linechange(ev,4); %Salida de linea de forma trifasica
case 3 % Se incluye evento tipo falla monofasica a tierra
    bus(buschange(ev,2),buschange(ev,3)) = baseMVA/Rp
    bus(buschange(ev,2),buschange(ev,5)) = -baseMVA/Xp
case 4 %Se cambia atributos del bus para quitar la falla monofasica
    bus(buschange(ev,2),buschange(ev,3)) = buschange(ev,4);
    bus(buschange(ev,2),buschange(ev,5)) = buschange(ev,6);

end
```

Figura 4.10 Inclusión del caso 3 y 4 (falla monofásica a tierra y despeje)

Lo que realiza esta línea de código es cambiar los atributos del bus donde ocurre la falla y de esta forma simular la ocurrencia de la falla monofásica.

CAPÍTULO V

IMPLEMENTACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DEBIDO A UNA FALLA MONOFASICA A TIERRA USANDO EL MATDYN MODIFICADO

En el capítulo anterior se mostraron las modificaciones realizadas al MatDyn, el enfoque principal fue en mantener la estructura y legibilidad del programa. En este capítulo se validan los resultados, implementando un caso de estudio de estabilidad transitoria debido a una falla monofásica.

Se selecciona el mismo caso del IEEE de nueve barras y se toman ciertos criterios bibliográficos referentes a estudios de estabilidad [6-7] para determinar los valores de las impedancias de secuencia, información que no estaba disponible. Por último, se hace una discusión de los diferentes resultados obtenidos y se comparan con las variables de salida emitidas por el programa de PowerWorld [3].

5.1 Criterio para la determinación de las redes de secuencia de los componentes del sistema.

5.1.1 Impedancia de secuencia de transformadores

El modelo de transformador implementado para el estudio de falla monofásica en MatDyn es la conexión estrella a tierra – delta. Además se considera un modelo ideal (impedancia cero) para representar la conexión a tierra del neutro de la estrella. Tomando en cuenta lo indicado, se establece que las impedancias de secuencia del transformador implementado corresponde con la expresión 5.1

$$X_1 = X_2 = X_0 \quad (5.1)$$

Por otra parte, cuando se pasa del lado de bajo al del alto voltaje en un transformador con conexión estrella a tierra a delta los voltajes (y las corrientes) de secuencia positiva avanzan 30° y los voltajes (y las corrientes) de secuencia negativa se retrasan 30° . Esto se toma en cuenta en los respectivos archivos *file.m* de cada caso agregando un $+30^\circ$ y -30° en la fila correspondiente a la rama del transformador. Para el caso de secuencia cero no existe desplazamiento angular.

5.1.2 Impedancias de secuencia de líneas de transmisión

En el modelo de parámetros concentrados π , se asume igual valor de impedancia para las secuencias positiva y negativa. Cuando por la línea de transmisión fluye corriente de secuencia cero, las corrientes en las tres fases son idénticas, están en fase y retornan por tierra. El campo magnético de secuencia cero es muy diferente al producido por las corrientes de secuencia positiva y negativa, éste efecto neto hace que se tome un valor de 2 a 3 veces el valor de la impedancia de secuencia positiva [6]. En los datos introducidos en el caso de estudio de nueve barras se utiliza el siguiente criterio para fijar las impedancias de secuencia de las líneas de transmisión.

$$Z_{l1} = Z_{l2} \quad (5.2)$$

y

$$Z_{l0} = 2.5 * Z_{l1} \quad (5.3)$$

5.1.3 Impedancia de secuencia de los generadores

La impedancia de los generadores depende del instante de interés donde se realiza el estudio. Se toma X_d para estado estable y X_d' para estudios de estabilidad y X_d'' para estudios de cortocircuito. Todas estas impedancias son de secuencia positiva. Por otra parte, se considera que la reactancia de secuencia negativa se obtiene de la media de las reactancias subtransitorias de eje directo y cuadratura [6]. Por último, se

puede aproximar la reactancia de secuencia cero a la reactancia de fuga X_l [7]. Para introducir los datos en el caso de estudio se establecieron los siguientes criterios para representar los valores de secuencia de los generadores.

$$X_1 = x'_d \quad (5.4)$$

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (5.5)$$

$$X_0 = X_l \quad (5.6)$$

5.2 Introducción de datos en los archivos *file.m* de secuencia negativa y cero.

Después de ser establecidos los criterios para la determinación de los valores de secuencia, se carga en un archivo *file.m* o estructura con el formato de MatPower con los datos de secuencia negativa y cero del sistema de transmisión, estos se muestran en las figuras 5.1 y 5.2:

%% system MVA base mpc.baseMVA = 100;															
%% bus data															
%	bus_i	type	Pd	Qd	Gs	Bs	area	Vm	Va	baseKV	zone	Vmax	Vmin		
mpc.bus = [															
1	3	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9;			
2	2	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9;			
3	2	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9;			
4	1	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9;			
5	1	125	50	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9;			
6	1	90	30	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9;			
7	1	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9;			
8	1	100	35	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9;			
9	1	0	0	0	0	1	1	0	345	1	1.1	0.9;			
];															
%% generator data															
%	bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	status	Pmax	Pmin	Pci	Pc2	Qc1		
mpc.gen = [															
1	0	0	300	-300	1.04	100	1	250	10	0	0	0	0	0	
2	163	0	300	-300	1.025	100	1	300	10	0	0	0	0	0	
3	85	0	300	-300	1.025	100	1	270	10	0	0	0	0	0	
];															
%% branch data															
%	fbus	tbus	r	x	b	rateA	rateB	rateC	ratio	angle	status				
mpc.branch = [															
1	4	0	0.0576	0	250	250	250	0	-30	1	-360	360;			
4	6	0.017	0.092	0.158	250	250	250	0	1	-360	360;				
6	9	0.039	0.17	0.358	150	150	150	0	1	-360	360;				
3	9	0	0.0586	0	300	300	300	0	-30	1	-360	360;			
8	9	0.0119	0.1008	0.209	150	150	150	0	1	-360	360;				
7	8	0.0085	0.072	0.149	250	250	250	0	1	-360	360;				
2	7	0	0.0625	0	250	250	250	0	-30	1	-360	360;			
5	7	0.032	0.161	0.306	250	250	250	0	1	-360	360;				
4	5	0.01	0.085	0.176	250	250	250	0	1	-360	360;				

Figura 5.1 Archivo de caso de secuencia negativa

En la figura anterior se resaltan los ángulos de desplazamiento de los transformadores en secuencia negativa.

<pre> %% system MVA base mpc.baseMVA = 100; %% bus data % bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin mpc.bus = [1 3 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9; 2 2 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9; 3 2 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9; 4 1 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9; 5 1 125 50 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9; 6 1 90 30 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9; 7 1 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9; 8 1 100 35 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9; 9 1 0 0 0 0 1 1 0 345 1 1.1 0.9;]; %% generator data % bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2 Qc1min mpc.gen = [1 0 0 300 -300 1.04 100 1 250 10 0 0 0 0 0 0 0 2 163 0 300 -300 1.025 100 1 300 10 0 0 0 0 0 0 0 3 85 0 300 -300 1.025 100 1 270 10 0 0 0 0 0 0 0]; %% branch data % fbus tbus r x b D-Yt Yt-D rateC ratio angle status angmin mpc.branch = [1 4 0 0.0576 0 0 1 250 0 0 1 -360 360; 4 6 0.0425 0.23 0.158 0 0 250 0 0 1 -360 360; 6 9 0.0975 0.425 0.358 0 0 150 0 0 1 -360 360; 3 9 0 0.0586 0 0 1 300 0 0 1 -360 360; 8 9 0.02975 0.252 0.209 0 0 150 0 0 1 -360 360; 7 8 0.02150 0.18 0.149 0 0 250 0 0 1 -360 360; 2 7 0 0.0625 0 0 1 250 0 0 1 -360 360; 5 7 0.08 0.4025 0.306 0 0 250 0 0 1 -360 360; 4 5 0.025 0.2125 0.176 0 0 250 0 0 1 -360 360;]; </pre>														
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Figura 5.2 Archivo de caso de secuencia cero

Como se puede observar en la figura 5.2 en el archivo *file.m* de secuencia cero se han agregado dos columnas que dan información del tipo de conexión de los transformadores, cuando en una de ellas se tiene un uno, indica la conexión correspondiente en ese transformador.

5.3 Introducción de los datos de los eventos bajo estudio.

Al igual que el caso trifásico utilizamos el archivo de eventos, en donde se describe el tipo, lugar e instante del evento. Para el caso de la implementación de la

falla monofásica hay que cambiar dos atributos de la barra fallada .En la figura 5.3 se resaltan las columnas agregadas para tomar en cuenta esto:

```
% event = [time type]

event=[ 0.2      3;
        0.283   4;
        0.283   2;]

% buschange = [time      bus(row)  attribute(col) new_value attribute(col) new_value]

buschange = [0.2      7      5      0      6      0 ;
             0.283   7      5      0      6      0 ];

% linechange = [time line(row)  attribute(col) new_value]
linechange = [0.283 8 11 0];
```

Figura 5.3 Datos de los eventos del sistema bajo estudio

5.4 Ejecución y resultados de la falla monofásica en el programa MatDyn modificado

La función principal del programa fue modificada y los parámetros de entrada cambian. El caso del sistema bajo estudio en la ventana principal se ejecuta de la siguiente manera:

rundynmodf('case9Sec1','case9dyn','faultmonf','case9Sec0','case9Sec2')

Similarmente al programa original se obtiene como salidas el resultado del flujo de potencia y como graficas principales los ángulos de carga, velocidades de los generadores y las tensiones en las barras. En la figura 5.4 y 5.5 observamos los ángulos de los generadores 2 y 3 referenciados con respecto al generador 1.

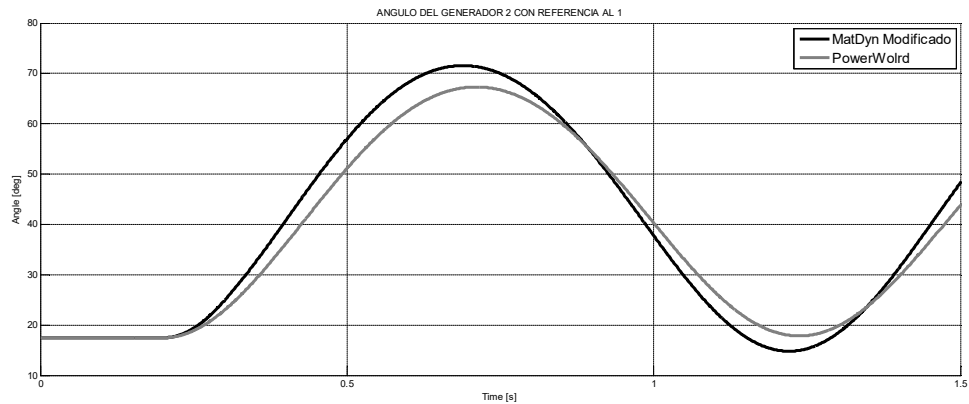


Figura 5.4 Ángulo de carga del generador 2 con referencia al 1(falla barra 7)

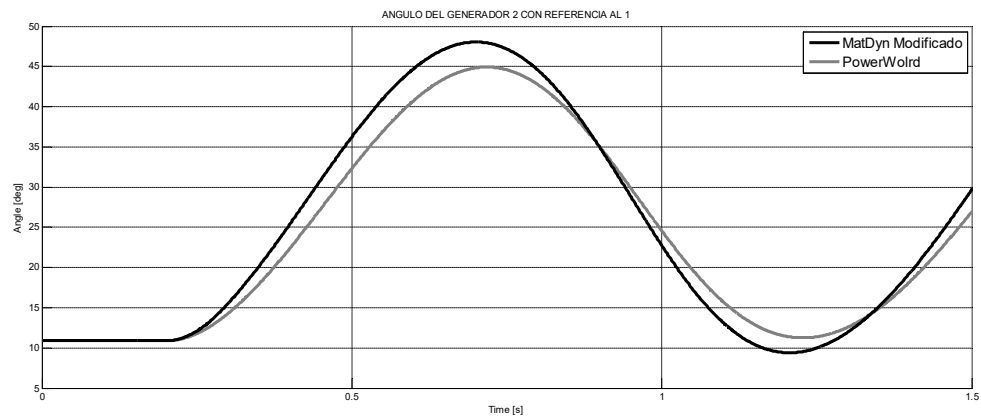


Figura 5.5 Ángulo de carga del generador 3 con referencia al 1(falla barra 7)

En líneas continuas se muestra el resultado obtenido de la modificación del MatDyn para estudio de la falla monofásica. Se puede observar que aunque la falla sea de menor afectación que una trifásica igualmente crea una oscilación en los ángulos de los generadores y de una forma u otra afecta el sistema. Al comparar los comportamientos de los generadores con el software PowerWorld, se observa que es similar, por lo tanto, las modificaciones hechas al programa principal son válidas.

Como ejemplo adicional se muestra la validez de las modificaciones del programa al evaluar un evento en otra barra del sistema, una falla cercana al bus 8 y

luego quitando de servicio la línea 8-7 en los mismos instantes de tiempo, para realizar esta modificación se realiza el cambio en el archivo de evento como se muestra en la figura 5.6

```
% event = [time type]

event=[ 0.2      3;
        0.283   4;
        0.283   2;]

% buschange = [time      bus(row)  attribute(col) new_value attribute(col) new_value]
buschange = [0.2      8      5      0      6      0 ;
             0.283   8      5      0      6      0 ];

% linechange = [time line(row)  attribute(col) new_value]
linechange = [0.283  8 11 0];
```

Figura 5.6 Cambio en el archivo de evento (Falla en barra 8)

Se muestra el comportamiento de los generadores en las figuras 5.7 y 5.8 ante tal perturbación, al igual que antes se obtienen comportamientos similares en ambos programas, el MatDyn modificado y el PowerWorld.

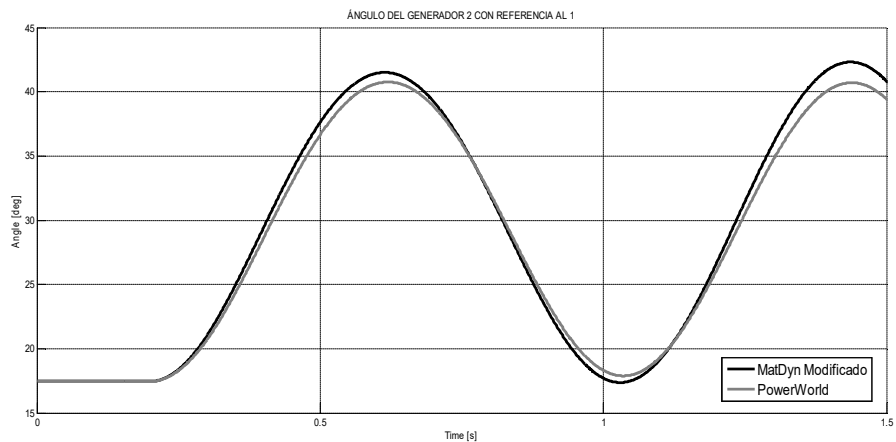


Figura 5.7 Ángulo del generador 2 con referencia al 1 (falla en barra 8)

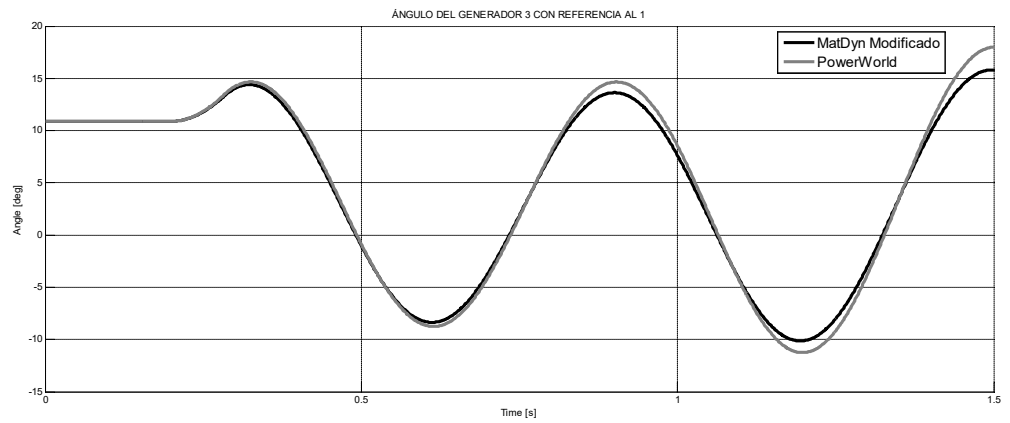


Figura 5.8 Ángulo del generador 3 con referencia al 1 (falla en barra 8)

CONCLUSIONES

- La modificación e implementación de la falla monofásica a tierra en el MatDyn fue posible, obteniéndose resultados satisfactorios al ser validados con otro software de uso comercial.
- Debido a la forma bien estructurada en que fue escrito el MatDyn, las modificaciones se pueden realizar sin afectar las funciones fundamentales del programa.
- Las modificaciones al MatDyn implican leves modificaciones al MatPower.
- Es posible llevar a cabo otras modificaciones de las funciones de ambos programas para la inclusión de otros tipos de perturbaciones.

RECOMENDACIONES

- Implementar modificaciones al MatDyn para considerar otros tipos de fallas asimétricas, tales como la bifásica o la bifásica a tierra.
- Depurar el código del programa para unificar dentro de un solo archivo file.m toda la información pertinente al sistema bajo estudio, los datos del sistema de transmisión y generación hasta los tipos y características de los eventos que toman lugar.
- Evaluar e implementar otros modelos de generadores, excitatrices y gobernadores.
- Evaluar e implementar diversos modelos estáticos y dinámicos de cargas.
- Evaluar los resultados de las tensiones de barra y velocidades angulares de los generadores, para la implementación de la falla monofásica llevada a cabo en este trabajo especial de grado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ponce H. Verónica, “Efecto de la incorporación de estabilizadores de potencia en las principales unidades de generación sobre los límites de transmisión del sistema eléctrico venezolano para el año 2015”, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2013.

[2] Anderson P.M y Fouad A.A, Power System Control and Stability, Volume I, The Iowa State University Press, 1977

[3] PowerWorld Corporation. “POWERWORLD ,versión de evaluación 19”, disponible en <http://www.powerworld.com/download/demo-software>.

[4] R. D. Zimmerman y C. Murillo-Sánchez, MatPower user's manual, 2015, disponible en <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>

[5] Grainger J y Stevenson W. “Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia”. *McGraw Hill*, 1996.

[6] Kundur Prabha, “Power System Stability and Control”, *McGraw Hill*, 1994

[7] Saadat Hadi, “Power System Analysis” , Third Edition, PSA publishing, 2011.

[8] Stijn Cole, MatDyn user’s manual. 2015, disponible en <http://www.esat.kuleuven.be/electta/teaching/matdyn>.

[9] S. Cole y R. Belmans, _MatDyn, A New Matlab-Based Toolbox for Power System Dynamic Simulation, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26,no. 3, pp. 1129_1136, 2011.

[10] Moore Holly, “Matlab para ingenieros”, Prentice Hall, 2007.

[11] R. Stallman, «Software libre para una sociedad libre». [En línea]. Disponible en: https://www.gnu.org/philosophy/fsfs/free_software.es.pdf. [Accedido: 17-sep-2016].

[12] Weedy B.M y Cory B.J , “Electric Power System” , Fifth Edition, Wiley publishing, 2012.