UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

FORMULACIONES TRIFASICAS MULTIFRECUENCIAS PARA EL ESTUDIO DE REDES ELECTRICAS EN ESTADO ESTABLE

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA:

JUAN MARCOS GARCIA MARTINEZ

MONTERREY, N. L. FEBRERO DE 1995

FORMULACIONES TRIFASICAS MULTIFRECUENCIAS
PARA EL ESTUDIO DE REDES ELECTRICAS
EN ESTADO ESTABLE

TD
Z5853
.M2
FIME
1995
G3

1020112146

FORMULACIONES TRIFÁSICAS MULTIFRECUENCIAS PARA EL ESTUDIO DE REDES ELÉCTRICAS EN ESTADO ESTABLE

Los miembros del comité aprueban la Tesis
Doctoral de Juan Marcos García Martínez

Dr. Florencio Aboytes García
Asesor

Dr. Oscar Chacón Mondragón

Dr. Federico Viramontes Brown

Dr. Salvador Acha Daza

Dr. Hector Altuve Ferrer

FONDO TESIS

CAPILLA ALFONSINA
UANL
FONDO TESIS

Copyright ©1995 by Juan Marcos García Martínez
Reservados todos los derechos

Dedicado a mis padres:

Pedro García y
Natalia Martínez

En primer lugar por la vida,
es una deuda que nunca podré pagar.

En segundo término por su amor sin límites,
que se materializó en un constante espíritu de sacrificio.

En tercer lugar porque todo lo que soy se lo debo a ellos,
al espíritu de superación que supieron transmitir a todos sus hijos.

Por todo mil gracias.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

FORMULACIONES TRIFÁSICAS MULTIFRECUENCIAS PARA EL ESTUDIO DE REDES ELÉCTRICAS EN ESTADO ESTABLE

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

JUAN MARCOS GARCÍA MARTÍNEZ

Monterrey, N.L. Febrero de 1995

TD
Z5853
.M2
FIME
1995
G3

0117-10860

CAPILLA ALFONSINA
UANL
FONDO TESIS

AGRADECIMIENTOS:

Al Dr. Florencio Aboytes, por la acertada dirección de este trabajo de investigación.

A todos los maestros y compañeros del Programa de Doctorado en Ingeniería Eléctrica, por la amistad que siempre me han brindado y por su valiosa ayuda en el desarrollo del presente trabajo.

A mis amigos del Centro Universitario Roda, por la gran amistad que me han brindado. Y porque en esas instalaciones inicié y concluí mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico para realizar estos estudios.

Al Sistema Nacional de Investigadores por el apoyo económico que me ha brindado para realizar la presente investigación.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por la oportunidad y el apoyo que me brindó para realizar estos estudios.

RESUMEN

FORMULACIONES TRIFÁSICAS MULTIFRECUENCIAS PARA EL ESTUDIO DE REDES ELÉCTRICAS EN ESTADO ESTABLE

Publicación No. _____

Juan Marcos García Martínez, Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 1995

Profesor Asesor: Dr. Florencio Aboytes García

En este trabajo se presentan técnicas de análisis trifásicas para el estudio de sistemas eléctricos de potencia en estado estable.

Se describe en detalle una formulación para realizar estudios de flujos de potencia trifásicos de frecuencia fundamental, posteriormente se generaliza el algoritmo para realizar estudios de flujos de potencia trifásicos armónicos.

Se analizan modelos activos de máquinas síncronas y rectificadores controlados por tiristores, los cuales actúan como fuentes de armónicas. El modelo de la máquina síncrona considera los fenómenos de conversión de frecuencias y de saturación del flujo principal. También se incluyen modelos pasivos, dependientes de la frecuencia, de los componentes del sistema eléctrico, por ejemplo, modelos de líneas de transmisión, transformadores, cargas, etc.

También se presentan técnicas de análisis lineales para estudios de frecuencia fundamental y de frecuencias armónicas; se detalla una formulación para realizar estudios

trifásicos de resonancia en líneas de transmisión con compensación paralelo, adicionalmente se presenta una técnica lineal para determinar la penetración de armónicas en redes eléctricas.

Se presentan conceptos para estudiar señales eléctricas no-sinusoidales. Se desarrollan y analizan expresiones para evaluar los valores rms de señales de voltaje y corriente, de la potencia real y de sus componentes analíticos, voltamperes aparentes, reactivos y de distorsión. Además se presentan índices para medir los grados de contaminación de armónicas en las señales.

Para ilustrar las técnicas desarrolladas se incluyen resultados de simulaciones en sistemas de prueba considerando diversos estudios de interés, tanto a la frecuencia fundamental como a las frecuencias armónicas, v.g. flujos de potencia, desconexión monopolar, resonancia en líneas de transmisión compensadas, efectos del reactor controlado por tiristores y de la máquina síncrona en la contaminación de armónicas, amplificación de armónicas debido al fenómeno de resonancia, etc. Los estudios se realizan en coordenadas de fase (abc), lo cual permite considerar los desbalances del sistema.

Finalmente, se presentan conclusiones y recomendaciones para realizar los estudios y para la selección de las metodologías contenidas en este trabajo.

Contenido

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 Motivación del trabajo 1

1.1.1 Justificación de los estudios trifásicos 2

1.1.2 Justificación de los estudios armónicos 3

1.1.3 Reseña histórica del problema de armónicas 5

1.2 Estudios de frecuencia fundamental 7

1.2.1 Estudios de fallas 8

1.2.2 Estudios de flujos de potencia 9

1.2.3 Estudios de estabilidad 10

1.3 Estudios de armónicas 11

1.3.1 Análisis linealizado 12

1.3.2 Análisis no-lineal multifrecuencia 13

1.3.3 Simulación no-lineal en el tiempo 13

1.4 Fuentes de armónicas 14

1.4.1 Fuentes de armónicas internas 15

1.4.2 Fuentes de armónicas externas 15

1.5 Revisión histórica de estudios de flujos trifásicos multifrecuencias 16

1.6 Contenido de la tesis 20

2 ANÁLISIS DE SEÑALES ARMÓNICAS 23

2.1 Transformada de Fourier 24

2.1.1 Series de Fourier 25

2.1.2 Forma trigonométrica 25

2.1.2.1 Cálculo de los coeficientes de Fourier 27

2.1.3 Forma compleja de la serie de Fourier 27
2.1.4 Simetría de formas de onda 29
2.1.4.1 Simetría impar 29
2.1.4.2 Simetría par 30
2.1.4.3 Simetría de media onda 30
2.1.5 Transformada discreta de Fourier 31
2.1.5.1 Transformada rápida de Fourier 32
2.2 Factores de distorsión 33

3 MODELADO DE ELEMENTOS PARA ESTUDIOS MULTIFRECUENCIA 41

3.1 Introducción 41
3.2 Máquinas síncronas 42
3.2.1 Modelado de la conversión de frecuencias 43
3.2.1.1 Modelo armónico de la máquina síncrona en coordenadas (dqo) . 44
3.2.1.2 Modelo armónico de la máquina síncrona en coordenadas (abc) . 47
3.2.2 Modelado de la saturación 51
3.2.2.1 Saturación en coordenadas (dqo) 51
3.2.2.2 Saturación en coordenadas (abc) 56
3.2.2.3 Proceso iterativo para calcular $W(h)$ 57
3.2.3 Modelo pasivo de máquina síncrona 57
3.3 Reactor controlado por tiristores 58
3.3.1 Equivalente Norton del RCT 58
3.3.2 Conexión real de compensadores 61
3.4 Líneas de transmisión 63
3.5 Transformadores 66
3.6 Cargas 69
3.7 Inductores y Capacitores 70

4 ESTUDIO DE FLUJO TRIFÁSICO DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL 71

4.1 Introducción 71

4.2 Formulación del problema 72
4.3 Algoritmo de solución utilizando el método de Newton-Raphson 72
4.4 Ecuaciones de restricción 74
4.4.1 Nodos de carga 74
4.4.2 Nodos de voltaje controlado 76
4.4.2.1 Ecuación de la potencia activa total 76
4.4.2.2 Ecuación del voltaje controlado 76
4.4.2.3 Ecuaciones de las corrientes internas 77
4.4.3 Nodo compensador 79
4.5 Elementos del jacobiano 80
4.5.1 Nodos de carga 80
4.5.2 Nodos de generación 81
4.5.3 Nodo compensador 81
4.6 Control de voltaje de secuencia positiva 83
4.7 Límites de potencia reactiva generada 85
4.8 Diagrama lógico del algoritmo 87
4.9 Formulaciones desacopladas 92
4.9.1 Formulación desacoplada rápida 93
4.10 Análisis de resultados en casos de estudio 95
4.10.1 Sistema desbalanceado 96
4.10.2 Desconexión monopolar 100
4.10.3 Cálculo de neutros 105
4.11 Conclusiones 108

5 ESTUDIO DE FLUJO DE POTENCIA ARMÓNICO 110
5.1 Introducción 110
5.2 Formulación del problema 111
5.3 Ajuste de parámetros de control 114
5.3.1 Característica de operación del RCT 115
5.3.2 Ajuste del ángulo de conducción del RCT utilizando el error en la ecuación de control 117

5.3.3 Ajuste del ángulo de conducción del RCT utilizando las características de operación 119
5.3.3.1 Obtención de la característica del sistema 122
5.3.3.2 Justificación de la aproximación de la característica del sistema . 123
5.4 Algoritmo de solución 124
5.5 Análisis de resultados en casos de estudio 127
5.5.1 Contaminación de armónicas del RCT 128
5.5.2 Efecto del ángulo de conducción en la generación de armónicas . . 138
5.5.3 Efecto del capacitor en la propagación de armónicas 139
5.5.4 Análisis de la convergencia del método de la función error 146
5.5.5 Análisis de la convergencia de los métodos de las características . 149
5.5.6 Comparación de las tres alternativas mediante el número de iteraciones 151
5.5.7 Efecto de la conversión de frecuencias 153
5.5.7.1 Máquina síncrona como única fuente de armónicas 154
5.5.7.2 Conversión de las frecuencias armónicas de una fuente externa . . 158
5.5.8 Efecto de la saturación 160
5.6 Conclusiones 161

6 ESTUDIOS TRIFÁSICOS LINEALES 164
6.1 Resonancia en líneas de transmisión compensadas 165
6.1.1 Formulación del problema 165
6.1.2 Análisis utilizando las ecuaciones nodales 166
6.1.2.1 Formación del sistema de ecuaciones nodales 167
6.1.2.2 Solución de las ecuaciones nodales completas 168
6.1.2.3 Solución considerando solo el efecto capacitivo 170
6.1.3 Método electrostático 172
6.1.4 Conclusiones 174
6.2 Análisis armónico linealizado 175
6.2.1 Formulación del estudio 175
6.2.2 Caso de estudio 1 176
6.2.3 Caso de estudio 2 181

F.1 Efecto en la tensión térmica 230
F.1.1 Clasificación de las pérdidas 231
F.1.1.1 Pérdidas en el cobre 231
F.1.1.2 Pérdidas en el hierro 232
F.1.1.3 Pérdidas en el dieléctrico 233
F.1.2 Efecto en elementos del sistema 233
F.1.2.1 Motores y generadores 234
F.1.2.2 Transformadores 235
F.1.2.3 Bancos de capacitores 235
F.1.2.4 Cargas 236
F.2 Efecto en la tensión dieléctrica 237
F.3 Funcionamiento anormal 237

APÉNDICE G. LÍMITES DE ARMÓNICAS RECOMENDADOS 239

APÉNDICE H. RESONANCIA EN LÍNEAS COMPENSADAS 242
H.1 Condiciones sin falla 243
H.1.1 Línea balanceada, reactor sin acoplamientos 243
H.1.2 Línea con disposición horizontal, reactor sin acoplamientos 244
H.1.3 Línea desbalanceada, reactor sin acoplamientos 245
H.1.4 Línea balanceada, reactor con acoplamientos 246
H.1.5 Línea con disposición horizontal, reactor con acoplamientos 246
H.2 Fallas en la línea desconectada 246
H.2.1 Falla de fase a tierra 247
H.2.2 Falla doble de fase a tierra 248
H.2.3 Falla de línea a línea 248
H.2.4 Falla trifásica 249
H.3 Ejemplo numérico 249

Lista de Figuras

2.1 Representación de una señal en los dos dominios 26
2.2 Ahorro de operaciones usando FFT 33

3.1 Modelo general de máquina síncrona 43
3.2 Proceso de conversión de frecuencias 50
3.3 Curva de saturación de la máquina 53
3.4 Formas de onda de voltaje y corriente en un RCT 59
3.5 Equivalente Norton de un RCT 60
3.6 Diagrama unifilar de un compensador de 6 pulsos 62
3.7 Diagrama unifilar de un compensador de 12 pulsos 63
3.8 Parámetros de una línea de transmisión en función de la frecuencia . . . 65
3.9 Modelos amónicos de transformadores 67
3.10 Obtención punto a punto de la corriente de magnetización 68
3.11 Modelo de la carga para las frecuencias armónicas 69

4.1 Modelos del generador de frecuencia fundamental 77
4.2 Diagrama lógico del estudio de flujo de potencia 88
4.3 Sistema de estudio desbalanceado 96
4.4 Transformador 1–2 antes y después de desconectar la fase b de la línea 2–6 103
4.5 Transformador en conexión delta-estrella sin aterrizar 106
4.6 Circuito equivalente del transformador con conexión delta-estrella . . . 106

5.1 Esquema de control del RCT 115
5.2 Error en función del ángulo de conducción 118
5.3 Proceso de solución utilizando el método de la secante 119
5.4 Proceso de solución utilizando las características de operación 120

5.5 Función ($\sigma - \text{sen}\sigma$) 122
5.6 Obtención de la pendiente de la característica del sistema 123
5.7 Equivalente del sistema para la obtención de la característica 123
5.8 Diagrama lógico del estudio de flujo de potencia armónico 125
5.9 Sistema de estudio de 5 nodos 128
5.10 Formas de onda de voltajes 132
5.11 Formas de onda de corrientes del RCT para $\sigma = 136°$ 134
5.12 Potencia instantánea de la fase a del RCT 135
5.13 Flujos de corriente y potencia de la línea 4–3, fase a 137
5.14 Flujos de potencia instantáneos en líneas (fase a) 137
5.15 Formas de onda de las corrientes del RCT para $\sigma = 90°$ 140
5.16 Magnitud del voltaje en función de la admitancia del capacitor 141
5.17 Equivalente visto desde el nodo 3 para la quinta armónica 141
5.18 Formas de onda de voltajes 143
5.19 Flujos de potencia instantáneos en líneas (fase a) 144
5.20 Función error para distintos valores de inductancia 147
5.21 Función error para distintos valores de pendiente del RCT 148
5.22 Características reales de un sistema de prueba 150
5.23 Sistema de prueba de 3 nodos 154
5.24 Formas de onda de voltajes, efecto de conversión de frecuencias 156
5.25 Formas de onda de corrientes en el nodo 2 156
5.26 Potencias instantáneas en el nodo 2 157
5.27 Formas de onda de voltajes 159
5.28 Formas de onda de voltajes 161

6.1 Línea de transmisión acoplada con compensación 166
6.2 Voltajes en el nodo 5, calculados con ecuaciones completas 169
6.3 Voltajes en el nodo 5 para $Q = 400$ 170
6.4 Línea de transmisión compensada sin considerar el efecto inductivo . . . 171
6.5 Voltajes en el nodo 5, sin considerar el efecto inductivo 172
6.6 Forma de onda de la corriente inyectada 177
6.7 Voltajes de los nodos 1 y 2 178

6.8 Voltajes de los nodos 3, 4 y 5 179
6.9 Redes equivalentes en componentes ($o + -$) 187

H.1 Reactancia de compensación para condiciones de falla 252
H.2 Valores de reactancia para falla de fase a tierra 252

Lista de Tablas

3.1 Clasificación de modelos 42

4.1 Tipos de nodos en un estudio de flujo trifásico 73
4.2 Submatriz del jacobiano, nodos de carga 81
4.3 Submatriz del jacobiano, nodos de generación 82
4.4 Submatriz del jacobiano, nodo compensador 82
4.5 Voltajes y potencias nodales 97
4.6 Voltajes y corrientes de generadores en valores de secuencia 98
4.7 Corrientes de secuencia $(0 + -)$ en transformadores 99
4.8 Flujos de potencia en transformadores 99
4.9 Flujos de potencia en líneas de transmisión 100
4.10 Voltajes y potencias nodales, desconexión monopolar 102
4.11 Voltajes y corrientes de generadores en valores de secuencia 104
4.12 Flujos de potencia en transformadores, desconexión monopolar 104
4.13 Flujos de potencia en líneas, desconexión monopolar 105

5.1 Datos del RCT 129
5.2 Voltajes y potencias nodales de frecuencia fundamental 129
5.3 Voltajes de frecuencias armónicas 130
5.4 Factores de distorsión de voltaje en por ciento 131
5.5 Corrientes armónicas del RCT para $\sigma = 136°$ 132
5.6 Magnitud de las componentes armónicas de las corrientes del RCT . . . 133
5.7 Factores de distorsión de la corriente del RCT para $\sigma = 136°$ en porciento 134
5.8 Potencia reactiva de frecuencia fundamental del RCT para $\sigma = 136°$ . . 134
5.9 Componentes armónicas de la potencia inyectada en la fase a del nodo 5 136

5.10 Voltamperes de la fase a del nodo 5, con y sin armónicas 136
5.11 Voltamperes en líneas de transmisión (fase a) 138
5.12 Corrientes armónicas del RCT para $\sigma = 90°$ 139
5.13 Factores de distorsión de las corrientes del RCT para $\sigma = 90°$ en por ciento 139
5.14 Magnitudes de voltajes nodales en función de la frecuencia 142
5.15 Factores de distorsión de voltaje 143
5.16 Factores de distorsión de las corrientes del RCT para $\sigma = 136°$ en por ciento 144
5.17 Componentes armónicas del flujo de potencia en líneas 145
5.18 Voltamperes en líneas de transmisión (fase a) 146
5.19 Comparación de los métodos para $Vr = .975$ 151
5.20 Comparación de los métodos para $Vr = 1.078$ 152
5.21 Comparación de los métodos para $Vr = .925$ 153
5.22 Voltajes nodales 155
5.23 Voltamperes de la carga 157
5.24 Voltajes nodales, con conversión de frecuencias 158
5.25 Voltajes nodales, sin conversión de frecuencias 159
5.26 Voltajes nodales, conversión de frecuencias y saturación 160

6.1 Valores típicos de corrientes armónicas en por ciento 176
6.2 Corrientes nodales de frecuencia fundamental 177
6.3 Factores de distorsión de voltaje y corriente 179
6.4 Magnitudes de voltajes armónicos 180
6.5 Corrientes nodales de frecuencia fundamental 181
6.6 Magnitudes de voltajes armónicos 182
6.7 Factores de distorsión de voltaje y corriente 182

C.1 Impedancias de generadores 216
C.2 Parámetros de las unidades de transformación monofásicas 216
D.1 Impedancias de generadores 224
E.1 Parámetros de la máquina síncrona 227

E.2 Datos del RCT 228
G.1 Límites de distorsión de voltaje 240
G.2 Actualización de límites de distorsión de voltaje 241
G.3 Límites de las corrientes armónicas 241