

FLUJO DE POTENCIA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

UN ENFOQUE NUMÉRICO

MARÍA CAMILA HERRERA BRÍNEZ
ÓSCAR DANILO MONTOYA GIRALDO
LUIS FERNANDO GRISALES NOREÑA

Herrera Bríñez, María Camila, autora

Flujo de potencia en redes de distribución : un enfoque numérico / María Camila Herrera Bríñez, Óscar Danilo Montoya Giraldo, Luis Fernando Grisales Noreña. -- Primera edición. -- Bogotá : Ecoe Ediciones, 2024.

124 páginas. -- (Tecnología, ingeniería, agricultura, procesos industriales. Ingeniería eléctrica)

Incluye datos curriculares de los autores.

ISBN 978-958-508-262-5 (impreso) -- 978-958-508-263-2 (PDF) -- 978-958-508-264-9 (ePUB)

1. Corriente alterna - Soluciones numéricas 2. Distribución de energía eléctrica - Soluciones numéricas 3. Matlab (Programa para computador) - Soluciones numéricas 4. Transmisión de potencia - Soluciones numéricas 5. Líneas eléctricas - Soluciones numéricas 6. Ingeniería eléctrica I. Montoya Giraldo, Óscar Danilo, autor II. Grisales Noreña, Luis Fernando, autor

CDD: 621.31913 ed. 23

CO-BoBN- a1137406



Área: Tecnología, ingeniería, agricultura, procesos industriales

Subárea: Ingeniería eléctrica

ECOE
EDICIONES

© María Camila Herrera Bríñez
© Óscar Danilo Montoya Giraldo
© Luis Fernando Grisales Noreña

© Ecoe Ediciones S.A.S.
info@ecoeediciones.com
www.ecoeediciones.com
Carrera 19 # 63 C 32
Teléfono: (+57) 321 226 46 09
Bogotá, Colombia

♦ Cita sugerida:
Herrera Bríñez, M. C., Montoya Giraldo, O. D. y Grisales Noreña, L. F. (2024). *Flujo de potencia en redes de distribución. Un enfoque numérico*. Ecoe Ediciones.

Primera edición: Bogotá, abril del 2024

ISBN: 978-958-508-262-5
e-ISBN (PDF): 978-958-508-263-2
e-ISBN (ePUB): 978-958-508-264-9

Coordinadora editorial: Ana María Rueda G.
Coordinadora de producción editorial:
Alejandra Rondón Forero
Editora de adquisiciones: Alejandra Cely R.
Carátula: Wilson Marulanda Muñoz
Impresión: Carvajal Soluciones de
Comunicación S.A.S.
Carrera 69 #15-24

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados

Agradecimientos

El presente libro fue producido en el marco del proyecto de investigación: **Desarrollo de una metodología de optimización para la gestión óptima de recursos energéticos distribuidos en redes de distribución de energía eléctrica**, registrado ante el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Código interno 1643-012-2020.

Adicionalmente, este libro se desarrolló y publicó en el marco de la postulación e iniciación del proyecto FONDECYT de iniciación en investigación 2024: **Smart energy management methods for improving the economic, technical, and environmental indexes of the alternating current microgrids including variable generation and demand profiles**, identificado con el N° 11240006. Empleando los espacios del centro Tecnológico de Conversión de Energía de la universidad de Talca.

Los autores quieren agradecer a la *Red para la Integración a Gran Escala de Energías Renovables en Sistemas Eléctricos* (RIBIERSE-CYTED) de la cual hace parte el grupo de investigación en compatibilidad e interferencia electromagnética (GCEM), así como el semillero de investigación en circuitos y sistemas (SICSUD) por el soporte brindado a este libro resultado de investigación. Para más información sobre RIBIERSE consulte la siguiente página web: [RIBIERSE-CYTED](#).

Sobre los autores

M. C. HERRERA BRÍÑEZ, (Bogotá D.C., Colombia, 1994) Ingeniera eléctrica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021. Experta en análisis y diseño de sistemas eléctricos de media tensión. Actualmente, se desempeña como ingeniera de sistemas de potencia para la empresa Open System International. Sus principales intereses en investigación se relacionan con el área de gestión y operación eficiente de redes eléctricas de distribución. mherrera@udistrital.edu.co

Ó. D. MONTOYA GIRALDO, (Obando, Valle del Cauca, Colombia, 1989) Doctor en Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Pereira, Magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira e Ingeniero Electricista Universidad Tecnológica de Pereira. Actualmente es profesor asistente adscrito al Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ha publicado más de trescientos artículos en revistas y conferencias registradas en las bases de datos Scopus y WoS. Investigador Asociado en Minciencias, Miembro Senior el Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos de Estados Unidos (IEEE, USA) y miembro del grupo de Investigación en Compatibilidad e Interferencia Electromagnética (GCEM) adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas con clasificación A1 en Minciencias. odmontoyag@udistrital.edu.co

L. F. GRISALES-NOREÑA, (Cartago, Valle del Cauca, Colombia, 1990) Doctor en Energías Renovables de la Universidad de Jaén de España. Doctor en Ingeniería Automática de la Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira e Ingeniero Electricista Universidad Tecnológica de Pereira. Profesor conferenciante de Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca-Chile. Ha publicado más de ciento cuarenta artículos en revistas y conferencias registradas en las bases de datos Scopus y WoS. Investigador Asociado en Minciencias y Director alterno del Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Conversión de Energía de la Universidad de Talca . luis.grisales@utalca.cl

Resumen ejecutivo

El análisis de los sistemas eléctricos es una tarea compleja y cambiante a medida que se integran masivamente en ellos recursos energéticos distribuidos, como son fuentes de generación renovable, sistemas de almacenamiento de energía, y en general compensadores dinámicos de potencia activa y reactiva. Además, esta integración masiva de nuevos elementos a los sistemas eléctricos en todos los niveles de tensión, y particularmente de mediana escala en redes de distribución, ha cambiado el paradigma operativo de estas redes, desde la operación vertical clásica hacia esquemas horizontales, donde se presentan flujos bidireccionales y la demanda varía de acuerdo con sus necesidades de consumo y posibilidades de autogeneración. Por lo tanto, si bien existen métodos clásicos de análisis aplicables a las redes de distribución en condiciones de estado estacionario (solución del problema de flujo de potencia), que permiten determinar sus condiciones operativas, i.e., perfiles de tensión, flujos de potencia, pérdidas de potencia, regulación de tensión, cargabilidad, etc., es necesario revisar estas metodologías y proponer nuevos algoritmos y/o mejorar los algoritmos ya existentes, en busca de mejor desempeño computacional y facilidad de implementación.

El problema de flujo de potencia en redes eléctricas es quizá uno de los problemas más clásicos, y sobre el cual se han hecho más estudios en Ingeniería Eléctrica; sin embargo, aunque existen métodos bien establecidos para su solución (i.e., método de Newton-Raphson), continuamente en la literatura moderna se están ofreciendo nuevos enfoques, metodologías y algoritmos de solución, con el fin de adaptarse a los nuevos paradigmas operativos de las redes eléctricas contemporáneas.

Por lo anterior, este libro de investigación contribuye al análisis de los sistemas eléctricos, y en particular de las redes de distribución de energía, ya que reúne diferentes métodos de flujo de potencia aplicables a estas redes, y que pueden clasificarse en tres grandes grupos. El primero de ellos corresponde a los métodos libres de derivadas, es decir, métodos que se basan en las leyes de Kirchhoff y el teorema de Tellegen para obtener fórmulas recursivas (iterativas) que permiten determinar la solución del problema de flujo de potencia (voltajes en los nodos de demanda) garantizando un a convergencia lineal. El segundo enfoque, está centrado en los métodos que emplean la aproximación de primer orden de las series de Taylor, i.e., el operador derivada, para obtener las fórmulas recursivas que aproximarán la la solución del problema de flujo de potencia, con la característica particular de que exhiben convergencia cuadrática. Finalmente, se presentan los denominados métodos mixtos, los cuales se conocen también, como métodos cuasi-Newton, que toman elementos de los enfoques libres y basados en derivadas para obtener formulaciones recursivas alternativas para resolver las ecuaciones de flujo de potencia.

La principal contribución de este libro corresponde a la descripción detallada de cada uno de los métodos de flujo de potencia (métodos libres de derivadas, métodos basados en derivadas, y métodos mixtos) a manera de tutorial mediante la presentación de cada uno de los códigos desarrollados en el entorno de programación de MATLAB®. Además, es importante resaltar que, aunque este es un libro derivado de investigación, puede ser considerado como libro guía para cursos en en área de sistemas de distribución de energía eléctrica a nivel de pregrado y posgrado. Nótese que todos los códigos desarrollados en este libro están disponibles en la página web: <https://github.com/odmontoya/algoritmos-de-flujo-de-potencia>.

Los autores

Contenido

1	Introducción al flujo de potencia en sistemas de distribución	1
1.1	Definición	1
1.2	Formulación de la ecuación de flujo de potencia	2
1.3	Formulación matricial del problema de flujo de potencia	4
1.4	Métodos de solución derivativos y no derivativos	5
1.5	Proyecto de investigación	5
1.6	Organización del libro	7
I	Métodos libres de derivadas	9
2	Métodos de Gauss-Jacobi y Gauss-Seidel	10
2.1	Método de Gauss-Jacobi	10
2.2	Método de Gauss-Seidel	11
2.3	Fórmulas iterativas de Gauss-Jacobi y Gauss-Seidel para flujo de potencia	11
2.4	Factor de aceleración e implementación algorítmica	12
2.5	Ejemplo de implementación en el <i>software</i> MATLAB®	12
3	Método de barrido iterativo	17
3.1	Formulación matemática	17
3.1.1	Solución recursiva	20
3.1.2	Cálculo de las pérdidas de potencia	21
3.2	Ejemplo de implementación en el <i>software</i> MATLAB®	22
4	Método de aproximaciones sucesivas	26
4.1	Formulación matemática	26
4.1.1	Solución recursiva	27
4.1.2	Cálculo de las pérdidas de potencia	27
4.2	Ejemplo de aplicación el <i>software</i> MATLAB®	28
5	Método triangular	32
5.1	Formulación matemática	32
5.1.1	Solución recursiva	34
5.1.2	Cálculo de las pérdidas de potencia	35
5.2	Ejemplo de implementación en el <i>software</i> MATLAB®	36

II	Métodos basados en derivadas	41
6	Método de Newton-Raphson	42
6.1	Formulación general	42
6.2	Aplicación al problema de flujo de potencia	44
6.2.1	Criterio de parada y cálculo de pérdidas	45
6.2.2	Implementación algorítmica	46
6.3	Ejemplo de aplicación el <i>software</i> MATLAB®	47
7	Método de aproximación hiperbólica	52
7.1	Formulación matemática	52
7.1.1	Solución recursiva	53
7.1.2	Criterio de parada y cálculo de pérdidas	54
7.1.3	Implementación algorítmica	55
7.2	Ejemplo de aplicación el <i>software</i> MATLAB®	55
8	Método de aproximación del producto	61
8.1	Formulación matemática	61
8.1.1	Solución recursiva	62
8.1.2	Criterio de parada y cálculo de pérdidas	63
8.1.3	Implementación algorítmica	64
8.2	Ejemplo de aplicación el <i>software</i> MATLAB®	64
III	Métodos mixtos	69
9	Método cuasi-Newton	70
9.1	Formulación general	70
9.2	Aplicación al problema de flujo de potencia	71
9.2.1	Criterio de parada y cálculo de pérdidas	72
9.2.2	Implementación algorítmica	72
9.3	Ejemplo de aplicación el <i>software</i> MATLAB®	73
10	Método de Broyden o de la secante	79
10.1	Formulación general	79
10.2	Aplicación al problema de flujo de potencia en variable compleja	81
10.3	Aplicación al problema de flujo de potencia en variable real	82
10.4	Ejemplo de aplicación el <i>software</i> MATLAB®	83
11	Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	89
11.1	Conclusiones	89
11.2	Recomendaciones	90
11.3	Trabajos futuros	90
IV	Apéndice	92
A	Sistemas de Prueba	93
A.1	Sistema de prueba de 27 nodos	93
A.2	Sistema de prueba IEEE 33 nodos	94
A.3	Sistema de prueba IEEE 34 nodos	94
A.4	Sistema de prueba IEEE 69 nodos	95
A.5	Sistema de prueba IEEE 85 nodos	96

Lista de figuras

2.1	Configuración eléctrica del sistema de 7 nodos.	13
2.2	Carga de datos iniciales del sistema de prueba de 7 nodos en MATLAB®.	14
2.3	Calculo de la matriz de admitancia nodal para el sistema de prueba de 7 nodos en MATLAB®.	14
2.4	Método de Gauss-Jacobi con factor de aceleración unitario para el sistema de prueba de 7 nodos en MATLAB®.	15
2.5	Convergencia del método de Gauss-Jacobi en la solución del flujo de potencia para el sistema de 7 nodos.	16
3.1	Sistema de ejemplo para la formación de la matriz A	18
3.2	Diagrama eléctrico de sistema de prueba de 14 nodos	22
3.3	Carga de datos iniciales del sistema de prueba de 14 nodos en MATLAB®.	23
3.4	Construcción de la matriz de incidencia	24
3.5	Método barrido iterativo para el flujo de potencia en redes monofásicas	24
3.6	Convergencia del método de barrido iterativo en la solución del flujo de potencia para el sistema de 14 nodos.	25
4.1	Diagrama eléctrico de sistema de prueba de 10 nodos	28
4.2	Carga de datos iniciales del sistema de prueba de 10 nodos en MATLAB®.	29
4.3	Formación de la matriz de admitancias en MATLAB®.	30
4.4	Método aproximaciones sucesivas para el flujo de potencia en el sistema de 10 nodos	30
4.5	Convergencia del método de aproximaciones sucesivas en la solución del flujo de potencia para el sistema de 10 nodos.	31
5.1	Sistema de distribución radial de 5 nodos para la formulación del método triangular.	33
5.2	Configuración eléctrica del sistema de 7 nodos.	36
5.3	Carga de datos iniciales del sistema de prueba de 7 nodos en MATLAB®.	37
5.4	Construcción de la matriz triangular y la matriz auxiliar \mathbf{Z}_{bus}	37
5.5	Método iterativo triangular para flujo de potencia en redes monofásicas.	38
5.6	Convergencia del método triangular en la solución del flujo de potencia para el sistema de 7 nodos.	40
6.1	Diagrama eléctrico de sistema de prueba de 17 nodos	47
6.2	Información inicial del sistema de 17 nodos en MATLAB®(incluye cálculo de la matriz \mathbf{Y}_{bus} y la definición de valores iniciales de las variables).	49
6.3	Implementación del método de Newton-Raphson y cálculo de pérdidas.	50
6.4	Convergencia del método de Newton-Raphson en la solución del flujo de potencia para el sistema de 17 nodos.	51

Flujo de potencia en redes de distribución: un enfoque numérico

7.1	Configuración eléctrica del sistema de 27 nodos	56
7.2	Información inicial del sistema de 27 nodos en MATLAB®y su equivalente en por unidad.	57
7.3	Implementación del método de aproximación hiperbólica y cálculo de pérdidas.	58
7.4	Convergencia del método de aproximación hiperbólica en la solución del flujo de potencia para el sistema de 27 nodos.	59
8.1	Diagrama eléctrico de sistema de prueba de 15 nodos	64
8.2	Información inicial del sistema de 15 nodos en MATLAB®y su equivalente en por unidad.	66
8.3	Implementación del método de aproximación del producto y cálculo de pérdidas.	67
8.4	Convergencia del método de aproximación del producto en la solución del flujo de potencia para el sistema de 15 nodos.	67
9.1	Diagrama eléctrico de sistema de prueba de 23 nodos	73
9.2	Información inicial del sistema de 23 nodos en MATLAB®.	75
9.3	Cálculo de la matriz de admitancia nodal y la asignación de valores iniciales para el sistema de 23 nodos.	76
9.4	Implementación del método de cuasi-Newton y cálculo de pérdidas.	77
9.5	Convergencia del método de cuasi-Newton en la solución del flujo de potencia para el sistema de 23 nodos.	78
10.1	Diagrama eléctrico de sistema de prueba de 5 nodos	83
10.2	Implementación del método de la secante en variable compleja.	85
10.3	Implementación del método de la secante en variable real (primera parte).	86
10.4	Implementación del método de la secante en variable real (segunda parte).	87
10.5	Convergencia del método de la secante en la solución del flujo de potencia para el sistema de 5 nodos.	88
A.1	Diagrama unifilar del sistema de prueba de 27 nodos	93
A.2	Diagrama unifilar del sistema de prueba IEEE 33 nodos	94
A.3	Diagrama unifilar del sistema de prueba IEEE 34 nodos	95
A.4	Diagrama unifilar del sistema de prueba IEEE 69 nodos	96
A.5	Diagrama unifilar del sistema IEEE 85 nodos	98

Lista de tablas

2.1	Parámetros eléctricos del sistema de 7 nodos.	13
2.2	Tensión obtenida en los nodos para el sistema de 7 nodos por medio del método de Gauss-Jacobi	16
3.1	Identificación de las ramas y su conexión entre nodos para construcción de la matriz A	19
3.2	Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 14 nodos	22
3.3	Tensión obtenida en los nodos para el sistema de 14 nodos por medio del método barrido iterativo	25
4.1	Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 10 nodos	29
4.2	Tensión obtenida en los nodos para el sistema de 10 nodos por medio del método aproximaciones sucesivas	30
5.1	Parámetros eléctricos del sistema de 7 nodos.	36
5.2	Tensión obtenida en los nodos para el sistema de 7 nodos por medio del método triangular	39
6.1	Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 17 nodos	47
6.2	Tensión obtenida en los nodos para el sistema de 17 nodos por medio del método de Newton-Raphson	51
7.1	Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 27 nodos	56
7.2	Tensión obtenida en los nodos para el sistema de 27 nodos por medio del método de aproximación hiperbólica	59
8.1	Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 15 nodos	65
8.2	Tensión obtenida en los nodos para el sistema de 15 nodos por medio del método de aproximación del producto	68
9.1	Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 23 nodos	74
9.2	Tensión obtenida en los nodos para el sistema de 23 nodos por medio del método de cuasi-Newton	78
10.1	Parámetros eléctricos para el sistema de prueba de 5 nodos	84
10.2	Tensión obtenida en los nodos para el sistema de 5 nodos por medio del método de la secante en variable compleja y real	87
A.1	Parámetros del sistema de 27 nodos	94
A.2	Parámetros del sistema IEEE 33 nodos	95

Flujo de potencia en redes de distribución: un enfoque numérico

A.3	Parámetros del sistema IEEE 34 nodos	95
A.4	Parámetros del sistema IEEE 69 nodos	97
A.5	Parámetros del sistema IEEE 85 nodos	99