

**Sistemas electrónicos de
potencia aplicados al control
de la energía eléctrica**

Sistemas electrónicos de potencia aplicados al control de la energía eléctrica

Enrique Rosales Asensio
Antonio Colmenar Santos
José Rosales Asensio



AULAMAGNA
PROYECTO CLAVE

Sistemas electrónicos de potencia aplicados al control de la energía eléctrica

Primera edición: 2020

ISBN: 9788417979324

ISBN eBook: 9788417979782

© del texto:

Enrique Rosales Asensio
Antonio Colmenar Santos
José Rosales Asensio

© de esta edición:

Editorial Aula Magna, 2020. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
editorialaulamagna.com
info@editorialaulamagna.com

Impreso en España – Printed in Spain

Quedan prohibidos, dentro de los límites establecidos en la ley y bajo los apercibimientos legalmente previstos, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, ya sea electrónico o mecánico, el tratamiento informático, el alquiler o cualquier otra forma de cesión de la obra sin la autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. Diríjase a info@editorialaulamagna.com si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

RESUMEN

En este libro se abordarán los siguientes puntos:

1. Desarrollo del modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75

Este punto consistirá en el desarrollo de dos modelos de la microturbina Honeywell Parallon 75 (uno que tenga a la velocidad del eje como entrada y el otro que tenga al par del motor primario como entrada) basados en ecuaciones en lugar de elementos del circuito.

2. Desarrollo del modelo del inversor de la microturbina Honeywell Parallon 75
3. Desarrollo de un esquema anti-isla activo para la microturbina Honeywell Parallon 75

Se propondrá un esquema anti-isla basado en el concepto de la realimentación positiva y en el de la implementación DQ para el inversor de la microturbina de gas Honeywell Parallon 75. Es preciso indicar que el aislamiento no intencionado de la GD puede resultar en problemas de la calidad de la potencia, interferencias con los dispositivos de protección de la red, daño en el equipamiento e incluso riesgos para la seguridad del personal, siendo muy importante que se diseñe un esquema anti-isla que sea robusto, fiable y tenga un bajo coste de implementación (por lo general, los esquemas anti-isla activos actuales son muy caros, teniendo por su parte todos los esquemas pasivos una zona de no detección además de estar normalmente sujetos a disparos accidentales en el caso de que los ajustes sean demasiado agresivos).

4. Control de potencia activa, reactiva y modo de operación de una microrred estando presentes microturbinas Honeywell Parallon 75

Se estudiará la respuesta de la microturbina Honeywell Parallon 75 ante cambios en la carga.

Índice general

1	Introducción.....	1
2	Almacenamiento energético en generación distribuida.....	9
2.1	Introducción.....	9
3	Cuestiones relacionadas con el diseño de la batería.....	13
3.1	Acercamiento técnico.....	13
3.2	Directrices para el diseño de las baterías.....	19
4	Modelado y simulación de la batería.....	25
4.1	Acercamiento del modelo.....	25
4.2	Resultados de la simulación.....	27
5	Esquemas anti-isla.....	31
5.1	Zona de No Detección (ZND) para esquemas anti-isla pasivos.....	31
5.2	Zona de No Detección para algunos esquemas activos.....	31
5.3	Degradación de la calidad de la potencia para algunos esquemas activos.....	32
5.4	Efecto dilución con múltiples GD.....	32
5.5	Dispositivos externos.....	33
5.6	Preocupación de la estabilidad causada por algunos esquemas activos.....	34
6	Control anti-isla para un convertidor electrónico asociado a la microturbina de gas Honeywell Parallon 75.....	35
6.1	Topología general.....	35
6.2	Descripción general de las microturbinas.....	37
6.3	Configuraciones del sistema microturbina de gas.....	38
6.4	Topologías de electrónica de potencia.....	41
6.5	Electrónica de potencia y control.....	43
6.6	Concepto e implementación de esquemas anti-isla.....	46
6.6.1	Conceptos básicos.....	46
6.6.1.1	Realimentación positiva.....	46
6.6.1.2	Implementación DQ.....	47
6.6.1.3	Esquemas de tensión.....	49
6.6.1.4	Esquemas de frecuencia.....	51
6.6.1.5	Implementaciones para inversores monofásicos.....	51
6.6.2	Directrices de diseño basadas en el análisis en el dominio de la frecuencia.....	52
6.6.2.1	Teoría de la estabilidad basada en la ganancia del lazo.....	52
6.6.3	Directrices de diseño anti-isla.....	56
6.6.3.1	Ganancia.....	58
6.6.3.2	Filtro pasa banda.....	59
6.6.3.3	Limitador.....	59
6.6.3.4	Factor de calidad.....	59
6.6.3.5	Nivel de potencia.....	60
6.6.4	Evaluación del desempeño con simulaciones en el dominio del tiempo.....	61
6.6.4.1	Evaluación del desempeño para el esquema de tensión.....	61
6.6.4.1.1	Caso base sin anti-isla.....	61
6.6.4.1.2	Esquema de tensión con $P=75$ kW, $F_c=1.8$	62
6.6.4.1.3	Esquema de tensión con $P=25$ kW, $F_c=1.8$	62
6.6.4.1.4	Esquema de la tensión con $P=75$ kW, $F_c=5$	62
6.6.4.1.5	Esquema de tensión con $P=75$ kW, $F_c=1.8$ y ganancia reducida.....	62

6.6.5 Evaluación del comportamiento del esquema de frecuencia.....	68
6.6.6 Evaluación del comportamiento cuando la red eléctrica está conectada.....	68
6.6.6.1 Calidad de la potencia	68
6.6.6.2 Perturbaciones de la red eléctrica	70
6.6.6.3 Estabilidad	73
7 Modelado y emulación de la microturbina.....	77
7.1 Conceptos básicos relacionados con la turbina y el generador	77
7.2 Construcción del sistema microturbina de gas	78
7.3 Resultados de las pruebas de la microturbina Honeywell Parallon 75.....	80
7.4 Modelo matemático para la microturbina.....	85
7.5 Modelo del par como entrada	91
7.6 Modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75 con controlador «Todo-Nada».....	95
8 Teoría DQ y control del inversor.....	103
8.1 Descripción general	103
8.2 Control basado en el referencial D-Q.....	103
8.2.1 Teoría básica del referencial D-Q.....	103
8.2.2 Control con referencia síncrona del inversor.....	106
8.3 Otros métodos de control.....	108
8.3.1 Control con referencia estacionaria d_s-q_s	108
8.3.2 Control en el referencial estacionario a-b-c.....	109
9 Modelo del inversor.....	111
9.1 Modelos de electrónica de potencia.....	111
9.2 Control detallado para la utilización del inversor ideal.....	116
9.3 Modelo del inversor en PSCAD	120
10 Control de potencia activa, reactiva y modo de operación de una microrred	127
10.1 Control de potencia activa	127
10.1.1 Control de la generación de dos máquinas interconectadas en un sistema eléctrico de potencia.....	127
10.1.2 Control del flujo de potencia activa en una microrred con sistemas de alimentación ininterrumpida/ recursos distribuidos	137
10.1.2.1 Sistema distribuido de alimentación ininterrumpida.....	138
10.1.2.2 Micro-red consistente en recursos distribuidos	147
10.2 Control de potencia reactiva en una microrred.....	154
10.3 Modo de operación de la micro-red conectada a la red eléctrica	163
11 Conclusiones.....	167
12 Lista de referencias.....	169
13 Software utilizado.....	173
ANEXOS	175
ANEXO A. Modelos de la máquina de inducción	175
A.1 Modelo en estado estacionario de la máquina de inducción.....	175
A.2 Modelo en el dominio de la secuencia.....	175
A.3 Modelo en el dominio fasorial.....	181
A.4 Expresión general de los parámetros de la máquina.....	183
A.5 Modelo monofásico equilibrado de la dinámica lenta de la máquina de inducción	185
ANEXO B. Flujo de cargas general para el caso equilibrado	191
B.1 Resumen.....	191
B.2 Formulación del flujo de cargas.....	191

B.3 Sistema por unidad en la red de CA.....	192
B.4 Modelos de microfuentes y operación.....	193
B.5 Modelo de microfuentes en una red aislada.....	199
B.6 Microfuentes conectadas a la red.....	199
B.7 Microfuentes en una red aislada	200
B.8 Microfuentes conectadas a la red y sujetas a restricciones contractuales	201
ANEXO C. Principio de operación de recursos distribuidos	203
ANEXO D. Microrredes condicionadas por la calidad de la potencia.....	207
D.1 Calidad de la potencia.....	207
D.2 Sincronización	208
ANEXO E. Motivación del cambio de las tensiones de la microturbina obtenidas experimentalmente.....	217
ANEXO F. Selección del filtro eliminador de armónicos de mayor orden.....	221
Índice	225

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama de bloques del sistema de generación de potencia de una microturbina	4
Ilustración 2. Diagrama de bloques del sistema de generación de la pila de combustible.....	4
Ilustración 3. Diagrama de bloques del modelo del sistema propuesto.....	8
Ilustración 4. Diagrama de bloques de un sistema de generación distribuida basado en una microturbina.....	10
Ilustración 5. Respuesta típica de una microturbina a una variación en la carga tipo escalón	11
Ilustración 6. Diagrama de bloques de un sistema microfuelle de generación distribuida con almacenamiento a través de baterías.....	14
Ilustración 7. Descarga de la tensión frente al tiempo para una batería de plomo ácido	16
Ilustración 8. Corriente de pico y tensión por celda de una batería de plomo-ácido para una alta tasa de descarga.....	17
Ilustración 9. Circuito equivalente de Thévenin de la batería	18
Ilustración 10. Curvas de potencia instantáneas de una batería plomo-ácido para una alta tasa de descarga	18
Ilustración 11. Diagrama de flujo describiendo el acercamiento al diseño de la batería	23
Ilustración 12. Respuesta de microturbinas de gas a un cambio en la carga tipo escalón	25
Ilustración 13. Circuito equivalente de una batería plomo-ácido.....	26
Ilustración 14. Respuesta a un escalón de una batería integrada en un sistema microfuelle de generación distribuida	30
Ilustración 15. Zona de No Detección para algunos esquemas pasivos	31
Ilustración 16. Zona de No Detección para algunos esquemas activos.....	32
Ilustración 17. Ejemplo de la degradación de la calidad de la potencia causada por algunos esquemas activos.....	32
Ilustración 18. Efecto dilución para múltiples generadores distribuidos con algunos esquemas activos	33
Ilustración 19. Unidad de aislamiento automático ENS32.....	33
Ilustración 20. Esquemas activos utilizando dispositivos externos.....	34
Ilustración 21. Preocupación de la estabilidad causada por algunos esquemas activos..	34
Ilustración 22. Diagrama de bloques general para generadores distribuidos típicos asociados a convertidores electrónicos.....	35
Ilustración 23. Microturbina Honeywell Parallon 75.....	38
Ilustración 24. Configuración básica de la microturbina y de la electrónica de potencia	39
Ilustración 25. Configuración de una microturbina de gas con un enlace en CC en el convertidor electrónico.....	39
Ilustración 26. Configuración de una microturbina de gas con un convertidor de potencia con enlace en alta frecuencia	40
Ilustración 27. Topologías de electrónica de potencia basadas en un enlace en CC con (a) Rectificador activo; (b) Rectificador pasivo	42
Ilustración 28. Conversión directa CA-CA a través de un convertidor matricial.....	42
Ilustración 29. Electrónica de potencia generalizada y control de la microturbina de gas Honeywell Parallon 75.	44
Ilustración 30. Concepto de la realimentación positiva en tensión	47
Ilustración 31. Concepto de realimentación positiva en frecuencia	47

Ilustración 32. Realimentación positiva de tensión en la implementación DQ.....	48
Ilustración 33. Realimentación positiva de la frecuencia en la implementación DQ.....	48
Ilustración 34. Cambio en la magnitud y ángulo de la tensión debido al cambio en la tensión según el eje directo.....	49
Ilustración 35. Esquema de tensión: V_d contra I_{d_ref}	50
Ilustración 36. Implementación del bucle enganchado en fase DQ para un sistema monofásico	51
Ilustración 37. Implementación del esquema de realimentación positiva para un inversor monofásico	52
Ilustración 38. Sistema de realimentación con lazo cerrado	53
Ilustración 39. Sistema de realimentación con lazo abierto para medida de la ganancia del lazo.....	53
Ilustración 40. Diagrama de Bode para un sistema estable	53
Ilustración 41. Diagrama de Bode para un sistema inestable	54
Ilustración 42. Medición de la ganancia del lazo para el esquema de tensión.	55
Ilustración 43. Ganancia del lazo del sistema aislado para el esquema de tensión	58
Ilustración 44. Ganancia del lazo del esquema de tensión cuando la red está conectada.....	59
Ilustración 45. Ganancia del lazo del esquema de tensión para diferentes factores de calidad (F_C).....	60
Ilustración 46. Ganancia del lazo del esquema de tensión a diferentes niveles de carga.....	61
Ilustración 47. Resultados de la simulación sin función anti-isla habilitada ($F_C=1.8$, 75 kW). Arriba: tensión de salida del inversor (V); en medio: corriente de salida del inversor (A); abajo: Δ_i desde el lazo de realimentación anti-isla (W).....	63
Ilustración 48. Resultados de las simulaciones sin función anti-isla habilitada ($F_C=1.8$, 75 kW). Arriba: potencia activa de salida del inversor (W); en medio: potencia reactiva de salida del inversor (VAr); abajo: Δ_i desde el lazo de realimentación anti-isla (W).....	63
Ilustración 49. Resultados de la simulación con esquema de realimentación ($F_C=1.8$, 75 kW) (arriba: tensión de salida del inversor (V); en medio: corriente de salida del inversor (A); abajo: frecuencia medida del inversor (rad/s).....	64
Ilustración 50. Resultados de la simulación con esquema de realimentación de tensión ($F_C=1.8$, 75 kW). Arriba: potencia activa de salida del inversor (W); en medio: potencia reactiva de salida del inversor (VAr); abajo: Δ_i desde el lazo de realimentación anti-isla (W)	64
Ilustración 51. Resultados de la simulación con esquema de realimentación ($F_C=1.8$, 25 kW). Arriba: tensión de salida del inversor (V); en medio: corriente de salida del inversor (A); abajo: Δ_i frecuencia medida del inversor (rad/s).....	65
Ilustración 52. Resultados de la simulación con esquema de realimentación de tensión ($F_C=1.8$, 25 kW). Arriba: potencia activa de salida del inversor (W); en medio: potencia reactiva de salida del inversor (VAr); abajo: Δ_i desde el lazo de realimentación anti-isla (W)	65
Ilustración 53. Resultados de la simulación con esquema de realimentación ($F_C=5$, 75 kW). Arriba: tensión de salida del inversor (V); en medio: corriente de salida del inversor (A); abajo: frecuencia medida del inversor (rad/s).....	66
Ilustración 54. Resultados de la simulación con esquema de realimentación de tensión ($F_C=5$, 75 kW). Arriba: potencia activa de salida del inversor (W); en medio: potencia reactiva de salida del inversor (VAr); abajo: Δ_i desde el lazo de realimentación anti-isla (W)	66

Ilustración 55. Resultados de la simulación con esquema de realimentación ($F_C=1.8$, 75 kW, ganancia reducida a la mitad). Arriba: tensión de salida del inversor (V); en medio: corriente de salida del inversor (A); abajo: frecuencia medida del inversor (rad/s).....	67
Ilustración 56. Resultados de la simulación con esquema de realimentación de tensión ($F_C=1.8$, 75 kW, ganancia reducida a la mitad). Arriba: potencia activa de salida del inversor (W); en medio: potencia reactiva de salida del inversor (VAR); abajo: Δ_i desde el lazo de realimentación anti-isla (W).....	67
Ilustración 57. Formas de onda con 75 kW como potencia de salida del inversor (corriente de salida del inversor)	69
Ilustración 58. Formas de onda con 75 kW como potencia de salida del inversor (Δ_i desde el lazo de realimentación anti-isla).....	69
Ilustración 59. Formas de onda con 25 kW como potencia de salida del inversor (corriente de salida del inversor)	69
Ilustración 60. Formas de onda con 25 kW como potencia de salida del inversor (Δ_i desde el lazo de realimentación anti-isla).....	70
Ilustración 61. Formas de onda del inversor a causa de un hueco de tensión sin anti-isla [arriba: tensión de salida del inversor (V); en medio: corriente de salida del inversor (A); abajo: frecuencia medida del inversor (rad/s)]	71
Ilustración 62. Formas de onda del inversor a causa de un hueco de tensión sin anti-isla [arriba: potencia activa de salida del inversor (W); en medio: potencia reactiva de salida del inversor (VAR); abajo: Δ_i del lazo de realimentación del esquema anti-isla (A)]	71
Ilustración 63. Formas de onda del inversor a causa de un hueco de tensión con esquema anti-isla de tensión [arriba: tensión de salida del inversor (V); en medio: corriente de salida del inversor (A); abajo: frecuencia medida del inversor (rad/s)]	72
Ilustración 64. Respuesta a un escalón transitorio de potencia sin anti-isla [arriba: tensión de salida del inversor (V); en medio: corriente de salida del inversor (A); abajo: frecuencia medida del inversor (rad/s)]	73
Ilustración 65. Respuesta a un escalón transitorio de potencia con esquema de tensión [arriba: tensión de salida del inversor (V); en medio: corriente de salida del inversor (A); abajo: frecuencia medida del inversor (rad/s)]	73
Ilustración 66. Escenario con el 100% de impedancia en la carga.....	74
Ilustración 67. Inestabilidad causada por el esquema de tensión con el 100% de impedancia en la red eléctrica. [arriba: frecuencia medida del inversor (rad/s); en medio: tensión del inversor (V); abajo: corriente del inversor (A)]	75
Ilustración 68. Diagrama de Bode del esquema anti-isla de tensión con el 100% de impedancia en la red eléctrica	76
Ilustración 69. Diagrama de bloques de la microturbina.....	78
Ilustración 70. Diagrama de bloques de la conexión del generador de la microturbina a la red eléctrica/carga.....	79
Ilustración 71. Demanda de potencia a la microturbina para un cambio en la carga a razón de escalones de 15 kW.....	81
Ilustración 72. Potencia de salida de la microturbina para un cambio en la carga con escalones de 15 kW	82
Ilustración 73. Velocidad del eje de la microturbina para un cambio en la carga con escalones de 15 kW	82

Ilustración 74. Tensión del enlace de CC de la microturbina para un cambio en la carga en escalones de 15 kW	83
Ilustración 75. Demanda de potencia a la microturbina para cambios en la carga con escalones de 30 kW	83
Ilustración 76. Potencia de salida de la microturbina para cambios en la carga con escalones de 30 kW	84
Ilustración 77. Velocidad del eje de la microturbina para cambios en la carga con escalones de 30 kW	84
Ilustración 78. Tensión en el enlace de CC para cambios en la carga con escalones de 30 kW	85
Ilustración 79. Modelo de la microturbina con rectificador pasivo.....	85
Ilustración 80. Modelo de la velocidad del eje de una microturbina.....	87
Ilustración 81. Ajuste de la curva del modelo de la velocidad del eje de una microturbina	88
Ilustración 82. Potencia ordenada a la curva de ajuste del modelo de la velocidad del eje	89
Ilustración 83. Potencia de salida a partir del ajuste de la curva del modelo de la velocidad del eje	89
Ilustración 84. Velocidad del rotor a partir del ajuste de la curva del modelo de la velocidad del eje	90
Ilustración 85. Tensión del enlace de CC a partir del ajuste de la curva del modelo de la velocidad del eje	90
Ilustración 86. Modelo del par como entrada en una microturbina.....	91
Ilustración 87. Modelo del par como entrada en una microturbina (en Simulink).....	92
Ilustración 88. Par de entrada para el modelo del par como entrada.....	93
Ilustración 89. Corriente de la carga para el modelo del par como entrada	93
Ilustración 90. Potencia de salida a partir del modelo del par como entrada	94
Ilustración 91. Velocidad del eje a partir del modelo del par como entrada	94
Ilustración 92. Tensión del enlace de CC a partir del modelo del par como entrada	94
Ilustración 93. Diagrama de bloques del controlador «Todo-Nada».....	96
Ilustración 94. Controlador «Todo-Nada» y modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75	96
Ilustración 95. Modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75	97
Ilustración 96. Par de entrada proporcionado por el controlador «Todo-Nada»	97
Ilustración 97. Velocidad del eje a partir del modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75 con el controlador.....	98
Ilustración 98. Tensión del enlace de CC a partir del modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75 con el controlador	98
Ilustración 99. Potencia de salida a partir del modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75 con el controlador.....	98
Ilustración 100. Velocidad del rotor a partir del modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75 con el controlador.....	99
Ilustración 101. Tensión del enlace de CC a partir del modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75 con el controlador	99
Ilustración 102. Potencia de salida a partir del modelo de la microturbina Honeywell Parallon 75 con el controlador.....	100
Ilustración 103. Potencia de salida a partir de cambios en escalón en la carga.....	101
Ilustración 104. Distribución de las tres fases y de los ejes estacionarios en cuadratura	104

Ilustración 105. Cuadratura estacionaria y ejes de referencia síncrona.....	105
Ilustración 106. Transformación desde el referencial trifásico a la referencia síncrona	106
Ilustración 107. Diagrama de bloques del inversor para conexión a la red eléctrica y controles en el referencial d-q	106
Ilustración 108. Diagrama de bloques de los controladores del estatismo de control de la potencia.....	107
Ilustración 109. Diagrama de bloques del controlador de corriente en el referencial d-q	108
Ilustración 110. Diagrama de bloques del inversor para conexión con la red eléctrica y controles en el referencial estacionario d_s - q_s	109
Ilustración 111. Diagrama de bloques del inversor para conexión con la red eléctrica y controles en la referencia estacionaria a-b-c.....	110
Ilustración 112. Esquema general del inversor.....	111
Ilustración 113. Esquema de control del inversor	112
Ilustración 114. Control de histéresis del modelo completo	113
Ilustración 115. Tensiones de salida del inversor.....	114
Ilustración 116. Modelo ideal del inversor.....	114
Ilustración 117. Fuentes del modelo ideal del inversor	115
Ilustración 118. Control para la regulación de la P y de la E sin estatismo del control	117
Ilustración 119. Control para la regulación de la P y la Q sin estatismo del control....	118
Ilustración 120. Control para la regulación de la P y la Q con estatismo del control ..	119
Ilustración 121. Detalles del bloque del estatismo del control	119
Ilustración 122. PLL y transformación axial d-q.....	120
Ilustración 123. Modelo completo en PSCAD	121
Ilustración 124. Modelo PSCAD de alimentación en CA y rectificador de puente de diodos	122
Ilustración 125. Modelo promediado del convertidor de fuente de tensión	123
Ilustración 126. Controladores PI.....	123
Ilustración 127. Término de compensación para el control de la tensión del inversor y de la frecuencia.....	124
Ilustración 128. Órdenes para el convertidor de fuente de tensión promediado	124
Ilustración 129. Red eléctrica, modelos de las cargas e interruptores.....	125
Ilustración 130. Diagrama de bloques del controlador de la generación para una máquina giratoria.....	129
Ilustración 131. Estatismo del control del generador en estado estacionario. (a) Cantidades de la desviación de la frecuencia y la potencia y (b) cantidades reales	130
Ilustración 132. Diagrama unifilar en el que se representa el flujo de potencia de un sistema de potencia interconectado que consta de dos generadores.....	131
Ilustración 133. Diagrama de bloques del control del regulador para un sistema de potencia interconectado que consta de dos generadores	132
Ilustración 134. Respuesta del sistema de potencia interconectado ante un cambio en la carga de $\Delta P_{L1}=0.2$ p.u. (a) sistema sin regulador de velocidad y (b) sistema con regulador de velocidad.....	134
Ilustración 135. Compartimiento del cambio de carga entre los dos generadores en el sistema de potencia interconectado	136
Ilustración 136. Estatismos del control de la frecuencia en el sistema interconectado	137

Ilustración 137. Analogía entre la regulación de la tensión de una fuente de tensión para estudios de sistemas eléctricos y un sistema de alimentación ininterrumpida/ recurso distribuido	138
Ilustración 138. Diagrama de bloques de un controlador de potencia activa-frecuencia para un sistema distribuido de alimentación ininterrumpida	139
Ilustración 139. Estatismo del control (frecuencia) mostrando las cantidades de desviación del generador. (a) $\Delta P_{L-ref}=0$, (b) $\Delta P_{L-ref}>0$	140
Ilustración 140. Estatismo del control (frecuencia) mostrando la potencia activa del generador. (a) $\Delta P_{L-ref}=\Delta P_{L0}$, (b) $\Delta P_{L-ref}>\Delta P_{L0}$	141
Ilustración 141. Diagrama unifilar mostrando el flujo de potencia activa en un sistema distribuido que consta de dos SAIs.....	141
Ilustración 142. Diagrama de bloques del control del regulador para un sistema distribuido de alimentación ininterrumpida interconectado (estando presente en una red con dos SAIs)	142
Ilustración 143. Respuesta de una microrred que contiene SAIs ante un cambio en la carga de $\Delta P_{L1}=0.2$ p.u. (a) Sistema sin restauración de la frecuencia y (b) sistema con restauración de la frecuencia.....	145
Ilustración 144. Compartimiento del cambio de la carga entre los dos sistemas de alimentación ininterrumpida en el sistema de potencia interconectado	146
Ilustración 145. Curvas del estatismo del control (frecuencia) del sistema de potencia interconectado.....	147
Ilustración 146. Funcionamiento de un único sistema de alimentación ininterrumpida. (a) Respuesta a un cambio en la carga $\Delta P_L=0.2$ p.u. (b) respuesta a un cambio en el punto de ajuste de referencia de la carga $\Delta P_{L-ref}=0.2$ p.u.....	148
Ilustración 147. Diagrama de bloques del controlador frecuencia-potencia activa para un recurso distribuido	149
Ilustración 148. Diagrama unifilar mostrando el flujo de potencia en una micro-red consistente en dos fuentes distribuidas.....	149
Ilustración 149. Diagrama de bloques del estatismo del control (frecuencia) y el control del regulador para una micro-red consistente en dos fuentes distribuidas	150
Ilustración 150. Respuesta de la micro-red a (a) cambio en la carga de $\Delta P_{L1}=0.2$ p.u. y (b) cambio en el punto de ajuste de referencia de la carga de $\Delta P_{L-ref}=0.2$ p.u.....	151
Ilustración 151. Compartimiento de la carga entre las dos unidades en el sistema interconectado.....	152
Ilustración 152. Curvas de caída de frecuencia del sistema de potencia interconectado	154
Ilustración 153. Diagrama de bloques del controlador de potencia reactiva propuesto para un recurso distribuido	155
Ilustración 154. Estatismo del control (tensión) del recurso distribuido en estado estacionario. (a) Cantidades de desviación y (b) cantidades reales.....	156
Ilustración 155. Diagrama unifilar mostrando el flujo de potencia reactiva en una micro-red que consta de dos recursos distribuidos.....	158
Ilustración 156. Diagrama de bloques del control de potencia reactiva de una microrred que consta de dos recursos distribuidos.....	160
Ilustración 157. Respuesta de la micro-red a un cambio en la carga de $\Delta Q_{L1}=0.2$ p.u. (a) Sistema sin regulador de tensión y (b) sistema con regulador de tensión	162
Ilustración 158. Características del estatismo del control (tensión y frecuencia) en el estado estacionario con alimentación de la red eléctrica.....	164

Ilustración 159. Compartimiento de la carga entre la micro-red y la alimentación de la red eléctrica mientras se opera en modo interconectado con la red eléctrica..... 165

Lista de tablas

Tabla 1. Variación típica de la capacidad a diferentes tasas de descarga..... 16

Tabla 2. Sistemas electrónicos de potencia para diferentes conversiones de potencia .. 37

Tabla 3. Convertidor de conexión a red de la microturbina Honeywell Parallon 75 57

Tabla 4. Comparación THD 68

Tabla 5. Elección del vector de conmutación..... 114

Lista de abreviaturas

CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
CNS	Cargas No Sensibles
DQ	Ejes directo-transversal
DSP	Procesador Digital de Señales
EP	Electrónica de Potencia
FC	Factor de Calidad
FSN	Filtro de Secuencia Negativa
FPB	Filtro Pasa Banda
GD	Generación Distribuida
GTO	Tiristores de Apagado por Puerta
IGBT	Transistor Bipolar de Puerta Aislada
LVRT	Respuesta frente a huecos de Tensión
MCT	Tiristores Controlados por MOS
MFGD	MicroFuentes de Generación Distribuida
MG	Margen de Ganancia
MF	Margen de Fase
PCC	Punto de Conexión Común
PI	Proporcional Integral
PWM	Modulación de Ancho de Pulso
RDT	Restauradores Dinámicos de Tensión
SAI	Sistema de Alimentación Ininterrumpida
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
SFS	Sandia Frequency Scheme
SMES	Almacenamiento de Energía Magnética por Superconducción
THD	Distorsión Armónica Total

TRF	Transformada Rápida de Fourier
VDF	Variador De Frecuencia
VEH	Vehículos Eléctricos Híbridos
ZND	Zona de No Detección

Lista de símbolos

$a_{i_frecuencia}$	Término de compensación de la frecuencia
$a_{i_tensión}$	Término de compensación de la tensión
$AG_{rlp}(s)$	Ángulo de fase en grados de la función de transferencia del filtro de paso bajo
A_n	Amplitud de las señales sinusoidales para la secuencia negativa
A_p	Amplitud de las señales sinusoidales para la secuencia positiva
$A_p C$	Amperios por celda (amperios de CC extraídos de cada celda de la batería)
B_D	Susceptancia de la máquina de inducción cuando se representa con una configuración en triángulo
B_{LN}	Susceptancia de la máquina de inducción cuando se representa con una configuración en estrella
C	Tasa que es definida como el valor del flujo de corriente que numéricamente es igual a la capacidad de la celda
$Carga\ 1$	Carga en el bus 1
$Carga\ 2$	Carga en el bus 2
C_b	Capacitancia equivalente de la batería
C_f	Condensador del filtro
$Curva_1$	Estatismo de la curva de frecuencia para el generador 1
$Curva_2$	Estatismo de la curva de frecuencia para el generador 2
d	Multiplicador que determina la tasa de descarga de la batería
dB	Decibelio
d^s	Eje vertical girado -90° con respecto al eje horizontal alineado con la fase a
$d - q$	Ejes directo-transversal
E^*	Magnitud de la tensión del nudo regulado
$e_{a,b,c}$	Sistema fasorial de las tensiones
E_{bat}	Capacidad energética (en J) de una batería
$E_{b,max}$	Máxima energía almacenada requerida en la batería
(f)	Perturbación de pequeña señal introducida