

Índice general

1. Introducción	2
1.1. Hipótesis	5
1.2. Objetivo principal	5
1.3. Objetivos específicos	6
1.4. Alcance	6
1.5. Limitaciones	6
1.6. Metodología	7
2. Revisión de la literatura y marco teórico	8
2.1. Evolución histórica y estado del arte del convertidor matricial	8
2.2. Topologías del convertidor matricial	11
2.3. El convertidor matricial directo	12
2.4. Topologías derivadas del convertidor matricial directo	12
2.4.1. Convertidor matricial monofásico	13
2.4.2. Convertidores matriciales multifásicos directos	15
2.4.3. Convertidor matricial fuente quasi-Z	16
2.4.4. Convertidor matricial modular multinivel	16
2.4.5. Convertidor matricial multimodular	17
2.5. Elementos y consideraciones referentes al convertidor matricial directo	17
2.5.1. Estados de conmutación de los interruptores de potencia	19
2.5.2. El filtro de entrada	20
2.5.3. Restricciones de operación	24
2.5.4. Circuito de protección clamp	26
2.5.5. Interruptores bidireccionales y conmutación	27
2.5.6. La conmutación de cuatro pasos	28

2.6.	Estrategias de control aplicadas al convertidor matricial	31
2.6.1.	Técnicas de modulación aplicadas a los MC	32
2.6.2.	Control predictivo basado en modelo aplicado al MC	33
2.7.	Control predictivo de corriente de salida en sistemas trifásicos con un solo módulo	36
2.8.	Control predictivo de corriente con minimización de potencia reactiva a la entrada en un sistema trifásico	38
2.9.	Control predictivo de tensión de salida para un sistema trifásico	40
2.10.	Generadores multifásicos	44
2.11.	Sumario del capítulo	46
3.	Metodología	48
3.1.	Materiales y métodos	48
3.2.	Convertidor matricial multimodular aplicado a sistemas de generación hexafásicos	49
3.3.	El convertidor matricial multimodular	50
3.3.1.	Etapas de potencia del convertidor matricial multimodular	51
3.3.2.	Modelo del filtro de entrada	54
3.3.3.	Modelo del filtro de salida	55
3.3.4.	Modelo discreto del sistema	56
3.4.	Control predictivo de corriente usando convertidores matriciales multimodulares para sistemas de generación hexafásicos	58
3.5.	Control predictivo de corriente mejorado aplicado al convertidor matricial multimodular en sistemas de generación hexafásico	61
3.6.	Sumario del capítulo	63
4.	Resultados y discusión	64
4.1.	Resultados en el entorno de simulación	64
4.1.1.	Respuesta ante un cambio en la amplitud de referencia	64
4.1.2.	Respuesta dinámica a cambios en la frecuencia de la referencia	66

4.1.3.	Señales de entrada del convertidor	69
4.1.4.	Análisis de desempeño del sistema	69
4.2.	Validación experimental de la propuesta	75
4.3.	Desempeño del sistema en régimen de fallas	81
4.3.1.	Operación bajo desbalance en la fuente	82
4.3.2.	Desempeño en régimen de fallas en el generador	85
4.4.	Análisis de sensibilidad de la técnica propuesta	88
4.4.1.	Sensibilidad a las variaciones de la inductancia del filtro de entrada	89
4.4.2.	Sensibilidad a las variaciones de la resistencia de fuga	90
4.5.	Sumario de resultados y discusión	92
5.	Otras estrategias de control propuestas para convertidores matriciales multimodulares	94
5.1.	Control predictivo de corriente con minimización de potencia reactiva de entrada usando convertidores matriciales multimodulares para sistemas de generación hexafásicos	94
5.2.	Control de potencia activa y reactiva basado en control predictivo de corriente en sistemas de generación hexafásicos	99
5.2.1.	Implementación del PLL digital	100
5.2.2.	Generación de la referencia de corriente	101
5.3.	Control de potencia activa y reactiva basado en bucles de control predictivo de tensión aplicado a sistemas de generación hexafásicos utilizando convertidores matriciales	102
5.3.1.	Lazo de control predictivo de tensión	104
5.3.2.	Bucle de control externo para generación de la tensión de referencia	106
5.3.3.	Proceso de arranque del sistema y conexión a la red	106
5.4.	Comparación entre las distintas técnicas propuestas en el marco de la tesis doctoral	111

6. Conclusiones y trabajo futuro	114
6.1. Sumario y conclusiones	114
6.2. Producción científica realizada en el marco de la tesis doctoral	116
6.2.1. Publicaciones en revista científica	117
6.2.2. Publicaciones en anales de eventos internacionales	117
6.3. Trabajos futuros en base a la propuesta de tesis doctoral	121
7. Anexos	143

Índice de figuras

2.1.	Topologías de convertidor matricial	11
2.2.	Circuito simplificado de un convertidor matricial.	13
2.3.	Etapa de potencia del convertidor matricial 3x3	14
2.4.	Convertidor matricial monofásico	15
2.5.	Topología qZSMC	17
2.6.	Convertidor matricial modular multinivel.	18
2.7.	Convertidor matricial multimodular	18
2.8.	Etapa de potencia con convertidor matricial y circuito de protección clamp de 12 diodos.	20
2.9.	Configuraciones típicas del filtro de entrada.	23
2.10.	Configuraciones no permitidas para los interruptores del MC.	25
2.11.	Configuraciones básicas de los interruptores bidireccionales.	28
2.12.	Convertidor basado en llaves bidireccionales.	29
2.13.	Diagrama de estados del método de conmutación de cuatro pasos.	31
2.14.	Clasificación de las técnicas de modulación en convertidores matriciales.	33
2.15.	Técnicas de control predictivo aplicado a convertidores matriciales	34
2.16.	Esquema PCC aislado	36
2.17.	Esquema de control aplicado al sistema eólico.	41
2.18.	Costo de dispositivos semiconductores Sic-Mosfet en función a la corriente má- xima soportada	45
3.1.	Esquema general de la aplicación del MMC como etapa de potencia en sistemas de generación eólicos hexafásicos	51
3.2.	Etapa de potencia de un módulo con filtro inductivo	52
3.3.	Etapa de potencia de un módulo con filtro LC	53

3.4.	Esquema propuesto para el control de corriente suministrada	60
4.1.	Respuesta del control desacoplado para un cambio de amplitud con una frecuencia de muestreo de 10 kHz alimentando una carga $R=1 \Omega$, $L= 10 \text{ mH}$	65
4.2.	Respuesta del control desacoplado para un cambio de amplitud con una frecuencia de muestreo de 40 kHz alimentando una carga $R=1 \Omega$, $L= 10 \text{ mH}$	65
4.3.	Respuesta del control predictivo mejorado para un cambio de amplitud con una frecuencia de muestreo de 10 kHz alimentando una carga $R=1 \Omega$, $L= 10 \text{ mH}$	67
4.4.	Respuesta del control predictivo mejorado para un cambio de amplitud con una frecuencia de muestreo de 40 kHz alimentando una carga $R=1 \Omega$, $L= 10 \text{ mH}$	67
4.6.	Respuesta del sistema para un cambio de frecuencia con una frecuencia de muestreo de 40 kHz alimentando una carga $R=1 \Omega$, $L= 10 \text{ mH}$	68
4.5.	Respuesta del sistema para un cambio de frecuencia con una frecuencia de muestreo de 10 kHz alimentando una carga $R=1 \Omega$, $L= 10 \text{ mH}$	68
4.7.	Respuesta del control predictivo mejorado para un cambio de frecuencia con una frecuencia de muestreo de 10 kHz alimentando una carga $R=1 \Omega$, $L= 10 \text{ mH}$	70
4.8.	Respuesta del control predictivo mejorado para un cambio de frecuencia con una frecuencia de muestreo de 40 kHz alimentando una carga $R=1 \Omega$, $L= 10 \text{ mH}$	70
4.9.	Señales de entrada al DMC para el control desacoplado	71
4.10.	Señales de entrada al DMC para el control acoplado	71
4.11.	Seguimiento para diferentes corrientes deseadas de 2 a 10 A. (a) Control de corriente de salida independiente. (b) Control de corriente de salida acoplado propuesto.	73
4.12.	Seguimiento para diferentes corrientes deseadas de 20 a 80 A (a) Control de corriente de salida independiente. (b) Control de corriente de salida acoplado propuesto.	73

4.13. Curvas de THD y MSE según cambios en la frecuencia de conmutación con carga fija. (a) Para 2 A. (b) Para 6 A y (c) Para 10 A.	74
4.14. Curvas de THD y MSE según cambios en la frecuencia de conmutación con carga fija. (a) Para 20 A. (b) Para 40 A y (c) Para 80 A.	74
4.15. Curvas de THD y MSE para cambios en la carga con frecuencia de muestreo fija. (a) $f_s = 10$ kHz. (b) $f_s = 20$ kHz y (c) $f_s = 40$ kHz.	75
4.16. Plataforma experimental.	76
4.17. Corrientes de salida de los módulos y en la carga aplicando la técnica acoplada.	78
4.18. Análisis dinámico del comportamiento del sistema ante un cambio en la amplitud de la referencia.	79
4.19. Análisis dinámico del comportamiento del sistema ante un cambio en la frecuencia de la referencia.	79
4.20. Valores experimentales de THD y MSE en función de los cambios en la frecuencia de conmutación con carga fija. (a) Para 2 A. (b) Para 6 A y (c) para 10 A.	81
4.21. Valores experimentales de THD y MSE en función de los cambios en la carga con frecuencia de muestreo fija. (a) $f_s = 10$ kHz. (b) $f_s = 20$ kHz and (c) $f_s = 40$ kHz.	81
4.22. Desempeño del sistema ante fuente desequilibrada. Arriba: tensiones de entrada. Centro: corriente de salida del módulo 1. Abajo: corriente de salida del módulo 2	83
4.23. Corriente de salida ante fuente desequilibrada	83
4.24. Desempeño del sistema ante fuente desequilibrada. Arriba: corrientes del generador. Centro: potencia activa de los módulos. Abajo: Potencia Reactiva de los módulos	84
4.25. Desempeño del sistema ante fuente desequilibrada. Arriba: tensión de la carga. Centro: potencia activa de salida. Abajo: potencia reactiva de salida	84

4.26. Respuesta de la tensión de entrada y de la corriente de salida de los módulos en caso de falla para la técnica desacoplada.	86
4.27. Respuesta de la tensión de entrada y de la corriente de salida de los módulos en caso de falla para la técnica acoplada.	86
4.28. Corrientes de salida en caso de falla para la técnica desacoplada.	87
4.29. Corrientes de salida en caso de falla para la técnica acoplada.	87
4.30. Resultados experimentales ante fallas para la técnica desacoplada.	88
4.31. Resultados experimentales ante fallas para la técnica acoplada.	89
4.32. Sensibilidad del MSE en función a las variaciones de L_{fo}	90
4.33. Sensibilidad de la THD en función a las variaciones de L_{fo}	91
4.34. Sensibilidad del MSE en función a las variaciones de R_{fo}	91
4.35. Sensibilidad de la THD en función a las variaciones de R_{fo}	92
5.1. Esquema propuesto para control de corriente y minimización de potencia reactiva	95
5.2. Seguimiento de corriente a cambios en la referencia de 5 A a 3 A.	96
5.3. Desempeño del módulo 1. De arriba a abajo: seguimiento de corriente, tensión y corriente de una fase del generador y, finalmente, potencia reactiva instantánea en el devanado trifásico.	97
5.4. Desempeño del módulo 2. De arriba a abajo: seguimiento de corriente, tensión y corriente de una fase del generador y, finalmente, potencia reactiva instantánea en el devanado trifásico.	98
5.5. Esquema de control de potencia activa y reactiva basado en control predictivo de corriente.	99
5.6. Bloque PLL utilizado para obtener la fase de la red.	100
5.7. Respuesta del sistema para el control de potencia activa inyectada. Arriba: potencia activa inyectada. Centro: corriente en el marco dq . Abajo: tensión y corriente inyectada a la red.	103

5.8. Esquema de control de potencia activa y reactiva basado en control predictivo de tensión	104
5.9. Proceso de sincronización de las tensiones de salida de los módulos con la red.	107
5.10. Respuesta a cambios de amplitud de potencia activa inyectada.	108
5.11. Seguimiento de las corrientes de fase.	108
5.12. Respuesta a cambios de amplitud de potencia reactiva inyectada.	109

Índice de tablas

2.1. ESTADOS VÁLIDOS PARA LOS INTERRUPTORES DEL CONVERTIDOR MATRICIAL.	21
4.1. PARÁMETROS ELÉCTRICOS UTILIZADOS EN EL ESQUEMA PROPUESTO.	66
5.1. PARÁMETROS IMPLEMENTADOS EN LA EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA.	110
5.2. ANÁLISIS DE LA THD DE LA CORRIENTE INYECTADA A LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE 50 HZ.	110
5.3. COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS PROPUESTAS EN LA TESIS DOCTORAL.	112

Índice de anexos

Anexo A: Improved predictive control in multi-modular matrix converter for six-phase generation systems	145
Anexo B: An Assessment of Predictive Current Control Applied to the Direct Matrix Converter Based on SiC-MOSFET Bidirectional Switches	160
Anexo C: Experimental Assessment of IGBT and SiC-MOSFET based Technologies for Matrix Converter using Predictive Current Control	162
Anexo D: Active and Reactive Power Control Strategy for Grid-Connected Six-Phase Generator by using Multi-Modular Matrix Converters	164
Anexo E: Multi-Modular Matrix Converter Topology applied to Distributed Generation Systems	166
Anexo F: Predictive Current Control with Reactive Power Minimization in Six-phase Wind Energy Generator using Multi-Modular Direct Matrix Converter	168
Anexo G: Predictive Voltage Control Techniques for AC UPS Applications	169
Anexo H: Predictive Voltage Control using Matrix Converter for a Stand-alone Wind Energy based Microgrid	171
Anexo I: Active and Reactive Power Control based on an Inner Predictive Voltage Control Loop for AC generation systems with Direct Matrix Converter	173
Anexo J: Predictive Voltage Control of the Direct Matrix Converter applied to Grid Current Injection	175
Anexo K: Active and Reactive Power Control based on Predictive Voltage Control in a Six-Phase Generation System using Modular Matrix Converters	177