

# INDICE GENERAL

|  |     |
|--|-----|
| INDICE GENERAL.....  | I   |
| INDICE DE FIGURAS.....   | VII |
| MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y SUMARIO DE LA TESIS DOCTORAL .....   | 1   |
| Motivación. ....   | 1   |
| Objetivos. ....  | 3   |
| Sumario. ....  | 4   |
| 1. INTRODUCCIÓN. ....  | 5   |
| 1.1. Cuantificación de la potencia eléctrica. Teorías de la potencia eléctrica. ....   | 12  |
| 1.1.1. Teoría de la potencia eléctrica de Budeanu (1927). ....   | 13  |
| 1.1.2. Teoría de la potencia eléctrica de Fryze (1931). ....   | 14  |
| 1.1.3. Extensión de las definiciones de la potencia de la teoría de Budeanu a sistemas trifásicos dentro del IEEE Std. 100. .... | 16  |
| 1.1.4. Teoría de la potencia del IEEE Std. 1459. ....  | 17  |
| 1.1.4.1. Teoría de la potencia eléctrica del IEEE Std. 1459 en sistemas trifásicos.....  | 18  |
| 1.1.4.1.1. Sistema trifásico lineal y equilibrado.....   | 20  |
| 1.1.4.1.2. Sistema trifásico lineal, con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas. ....                                | 21  |
| 1.1.4.1.3. Sistema trifásico no lineal con tensiones asimétricas y corrientes desequilibradas. ....                              | 24  |
| 2. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA Y CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE CONEXIÓN A RED. ....                         | 29  |
| 2.1. Fundamentos de los sistemas eólicos de generación. ....   | 29  |
| 2.2. Situación actual de los sistemas de generación eólica.....  | 30  |
| 2.3. Tipos de sistemas de generación eólica.....   | 32  |
| 2.3.1. Sistemas eólicos de generación de eje vertical.....   | 33  |
| 2.3.2. Sistemas eólicos de generación de eje horizontal .....  | 34  |
| 2.4. Pequeña eólica.....   | 37  |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 2.5.      | Funcionamiento de los sistemas de generación eólica .....                                | 39 |
| 2.5.1.    | Sistemas de generación eólica de velocidad fija y de velocidad variable .....            | 46 |
| 2.6.      | Topologías de los sistemas eólicos de generación con conexión a red.....                 | 47 |
| 2.6.1.    | Generador de inducción de jaula de ardilla (IG).....                                     | 48 |
| 2.6.2.    | Generador de inducción de doble bobinado (DFIG).....                                     | 48 |
| 2.6.3.    | Generador síncrono de rotor bobinado (GS).....   | 49 |
| 2.6.4.    | Generador síncrono de imanes permanentes (GSIP).....                                     | 49 |
| 2.7.      | Modelado de los sistemas de generación eólica .....                                      | 50 |
| 2.7.1.    | Modelado del generador síncrono de imanes permanentes.....                               | 50 |
| 2.7.2.    | Modelado del sistema de generación eólica.....   | 54 |
| 2.8.      | Operación en el punto de máxima potencia (PMP).....                                      | 56 |
| 2.8.1.    | Esquema de relación de velocidad pala/viento constante. ....                             | 57 |
| 2.8.2.    | Búsqueda del punto de máxima potencia.....   | 58 |
| 2.8.2.1.  | Algoritmos de perturbar y observar (P&O).....  | 58 |
| 2.9.      | Modelado del convertidor electrónico de potencia bidireccional <i>back-to-back</i> ..... | 59 |
| 2.10.     | Fundamentos básicos de control borroso .....   | 62 |
| 2.10.1.   | Funciones de pertenencia .....   | 63 |
| 2.10.2.   | Sistemas borrosos .....  | 63 |
| 2.10.3.   | Métodos de implicación.....  | 64 |
| 2.10.3.1. | Mamdani.....   | 64 |
| 2.10.3.2. | Lusing Larson.....   | 64 |
| 2.10.3.3. | Sugeno (Takagi-Sugeno-Kang).....   | 65 |
| 2.10.4.   | Métodos de desfuzificación .....   | 66 |
| 2.10.4.1. | Método del centro de gravedad .....  | 66 |
| 2.10.4.2. | Método de la altura.....   | 66 |
| 2.10.4.3. | Método de la media máxima .....  | 66 |
| 2.10.4.4. | Método de Sugeno.....  | 67 |

|   |     |
|---|-----|
| 3. MÉTODOS DE SINCRONIZACIÓN A LA RED Y MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD Y POSICIÓN DE GENERADORES ELÉCTRICOS. .... | 69  |
| 3.1. Métodos de sincronización a la red.....  | 70  |
| 3.1.1. Métodos basados en filtrado de tensiones.....  | 70  |
| 3.1.2. Métodos basados en Phase-Locked Loop (PLL).....  | 71  |
| 3.1.3. Métodos basados en filtros adaptativos.....  | 72  |
| 3.1.4. Método de sincronización propuesto. ....   | 73  |
| 3.2. Técnicas de estimación de velocidad y posición de los generadores eléctricos. ....                               | 78  |
| 3.2.1. Método de cálculo directo.....   | 78  |
| 3.2.2. Integración de la fuerza contraelectromotriz.....  | 79  |
| 3.2.3. Filtro extendido de Kalman .....   | 80  |
| 3.2.4. Sistema adaptativo por modelo de referencia .....  | 82  |
| 3.2.5. Observador en modo deslizante (OMD).....   | 83  |
| 3.2.6. Técnica propuesta para la estimación de la velocidad y la posición del rotor.....                              | 85  |
| 4. SISTEMA PROPUESTO.....   | 89  |
| 4.1. Funcionamiento del convertidor del lado del generador. ....  | 90  |
| 4.1.1. Esquema de control de velocidad y corriente del convertidor del lado del generador .....                       | 91  |
| 4.1.2. Diseño de los reguladores de corriente .....   | 92  |
| 4.1.3. Diseño del regulador de velocidad.....   | 94  |
| 4.1.4. Algoritmo de búsqueda y seguimiento del punto de máxima potencia.....  | 97  |
| 4.1.4.1. Funciones de pertenencia .....   | 100 |
| 4.1.4.2. Reglas de control.....   | 101 |
| 4.2. Funcionamiento del convertidor del lado de la red. ....  | 102 |
| 4.2.1. Esquema de control de corriente y tensión del convertidor de conexión a red .....                              | 103 |
| 4.2.2. Control de tensión del bus de continua .....   | 104 |
| 4.2.2.1. Funciones de pertenencia del sistema borroso de tensión del bus de continua .....                            | 105 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 4.2.2.2. | Reglas de control del sistema borroso de tensión del bus de continua .....   | 107 |
| 4.2.3.   | Control de corriente del inversor de conexión a red .....  | 108 |
| 4.2.4.   | Extracción de corrientes de referencia y estrategia de compensación de fenómenos ineficientes .....                                | 109 |
| 4.2.5.   | Optimización de la potencia aparente disponible en el inversor de conexión a red .....   | 111 |
| 5.       | RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO. ....   | 115 |
| 5.1.     | Técnicas de simulación. ....   | 116 |
| 5.2.     | Simulación de los sistemas del convertidor del lado del generador. ....  | 116 |
| 5.2.1.   | Observador en modo deslizante para la estimación de la velocidad y la posición del rotor. ....                                     | 117 |
| 5.2.1.1. | Mejora de la determinación de la ganancia del SMO. ....  | 125 |
| 5.2.2.   | Simulación de los lazos de regulación de corriente y velocidad. ....   | 134 |
| 5.2.3.   | Simulación del algoritmo de búsqueda y seguimiento del punto de máxima potencia basado en lógica borrosa. ....                     | 138 |
| 5.3.     | Simulación de los sistemas del convertidor del lado de la red. ....  | 148 |
| 5.3.1.   | Simulación del control de la tensión del bus de continua basado en lógica borrosa. ....  | 149 |
| 5.3.2.   | Simulación del sistema de compensación. ....   | 153 |
| 5.4.     | Simulación del sistema completo. ....  | 170 |
| 6.       | RESULTADOS EXPERIMENTALES. ....  | 191 |
| 6.1.     | Emulador eólico y método experimental de obtención de la curva $\lambda$ - $C_p$ de sistemas de generación de pequeña eólica. .... | 191 |
| 6.1.1.   | Implementación del emulador eólico. ....   | 191 |
| 6.1.2.   | Método experimental de obtención de la curva $\lambda$ - $C_p$ de sistemas de generación de pequeña eólica. ....                   | 196 |
| 6.2.     | Resultados experimentales del inversor de conexión a red. ....   | 200 |
| 6.2.1.   | Ensayos realizados al convertidor electrónico de conexión a red. ....  | 201 |
| 6.2.1.1. | Validación de la estrategia de sincronización a red. ....  | 202 |
| 6.2.1.2. | Validación de la extracción de las corrientes de referencia. ....  | 203 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.2.1.3. Validación de la compensación de las corrientes de referencia..... | 206 |
| 7. APORTACIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO. PUBLICACIÓN DE RESULTADOS. .... | 213 |
| 7.1. Aportaciones .....   | 213 |
| 7.2. Líneas de trabajo futuro.....  | 214 |
| 7.3. Resultados publicados de la tesis doctoral. ....                       | 214 |
| REFERENCIAS. ....   | 215 |