

# Tabla de contenido

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivo general	2
1.3	Objetivos específicos	2
1.4	Estructura del documento	2
<b>Capítulo 2</b>	<b>Esquemas de control de frecuencia del <i>DFIG</i></b>	<b>4</b>
2.1	Control inercial sin reservas	4
2.1.1	Control droop	4
2.1.2	Control inercial derivativo	5
2.1.3	Control droop más control inercial derivativo (control combinado)	8
2.2	Operación <i>deload</i>	10
2.2.1	Control droop	12
2.2.2	Control inercial derivativo	13
2.3	Elección de esquemas de control a utilizar	14
<b>Capítulo 3</b>	<b>Metodología</b>	<b>15</b>
3.1	Revisión bibliográfica	15
3.2	Datos de entrada	16
3.3	Proyección del sistema	16
3.4	Modelo dinámico	16
3.5	Definición de casos de estudio	16
3.6	Estudio dinámico	17
<b>Capítulo 4</b>	<b>Caso de estudio</b>	<b>19</b>
<b>Capítulo 5</b>	<b>Modelación dinámica</b>	<b>23</b>
5.1	Modelo genérico del <i>DFIG</i>	23
5.1.1	Modelo aerodinámico	24
5.1.2	Modelo mecánico	25
5.1.3	Modelo del generador	27
5.1.4	Modelo convertidores y controladores [27]	28
5.2	Modelo <i>DFIG</i> en base de datos DigSILENT [28]	30
5.3	Incorporación de esquemas de control para respuesta inercial	32
5.3.1	Modelo control droop sin reservas	32
5.3.2	Modelo control inercial con control derivativo sin reservas	35
5.3.3	Modelación control inercial derivativo más control droop sin reserva	37

5.4	Incorporación <i>DFIG</i> a la base de datos.....	40
<b>Capítulo 6</b>	<b>Resultados y análisis.....</b>	<b>41</b>
6.1	Control droop sin reservas ( <i>E1</i> ).....	41
6.1.1	Sensibilidad estatismo <i>RWT</i> .....	41
6.1.2	Sensibilidad <i>TD</i> .....	44
6.2	Control inercial derivativo ( <i>E2</i> ).....	48
6.2.1	Sensibilidad <i>Tf</i> .....	48
6.2.2	Sensibilidad <i>H</i> .....	50
6.3	Control inercial derivativo más control droop sin reserva ( <i>E3</i> ).....	54
6.3.1	Sensibilidad <i>H</i> .....	54
6.3.2	Sensibilidad <i>RWT</i> .....	56
6.4	Comparación esquemas de control <i>E1</i> , <i>E2</i> y <i>E3</i> .....	59
<b>Capítulo 7</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>62</b>
<b>Capítulo 8</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>64</b>
<b>Anexo A</b>	<b>Despacho SIC hora 7669.....</b>	<b>67</b>
<b>Anexo B</b>	<b>Despacho SING hora 7669.....</b>	<b>70</b>
<b>Anexo C</b>	<b>Modelo eléctrico del SIC-SING.....</b>	<b>72</b>
<b>Anexo D</b>	<b>Descripción de EDAC SIC y SING.....</b>	<b>74</b>
<b>Anexo F</b>	<b>Parques eólicos agregados proyectado al 2030.....</b>	<b>75</b>

## Índice de figuras

Figura 1 Diagrama resumen de técnicas de control para respuesta inercial. Elaboración propia. .	4
Figura 2 Diagrama de bloques de esquema de control droop. Elaboración propia. ....	5
Figura 3 Diagrama de bloques de esquema de control inercial derivativo. Elaboración propia. ...	6
Figura 4 Diagrama de bloques de esquema de control inercial derivativo con controlador PD. Elaboración propia.....	7
Figura 5 Diagrama de bloques de esquema de control droop y control inercial derivativo combinados sobre la potencia. Elaboración propia. ....	8
Figura 6 Maneras de trabajar en deload en turbinas eólicas.....	10
Figura 7 Diagrama esquemático de deload para curva optima de potencia activa (roja) y al 95% de la curva optima de potencia activa (negra). ....	12
Figura 8 Diagrama de bloques de esquema de control droop operando en deload. Elaboración propia. ....	12
Figura 9 Diagrama de bloques de esquema de control inercial derivativo operando en deload. Elaboración propia.....	13
Figura 10 Esquema metodológico. ....	15
Figura 11 Escenarios de estudios. ....	18
Figura 12 Diagrama simplificado del SING con la conexión de los parques eólicos por región considerados en el estudio. Líneas de transmisión verdes representan circuitos de 220 [kV]. ....	21
Figura 13 Diagrama simplificado del SIC con la conexión de los parques eólicos por región considerados en el estudio. Líneas de transmisión rosadas representan circuitos de 154[kV], verdes representan circuitos de 220[kV] y azules representan circuitos de 500[kV]. ....	22
Figura 14 Partes físicas del <i>DFIG</i> . ....	23
Figura 15 Estructura general en bloques del modelo <i>DFIG</i> con sus interrelaciones. ....	24
Figura 16 Ilustración de condiciones de viento alrededor de aspas móviles. Nota: $v_{punta}$ =velocidade punta; $R$ = radio del rotor; $v_{viento}$ = Velocidad del viento; $\alpha$ = ángulo de ataque; $\varphi$ = angulo de incidencia entre el plano del rotor y la velocidad relativa. ....	25
Figura 17 Modelo de dos masas para el tren de transmisión del <i>DFIG</i> . ....	26
Figura 18 Modelo eléctrico del generador de inducción configurado como <i>DFIG</i> . ....	27
Figura 19 Modelo genérico del conversor PWM de 6 pulsos. ....	28
Figura 20 Controladores del conversor lado del rotor y conversor lado de la red. ....	29
Figura 21 <i>Frame Generic DFIG-Turbine_resync</i> del DigSILENT.....	30
Figura 22 Diagrama de bloques de esquema de control droop. Elaboración propia para modelación dinámica.....	32
Figura 23 Bloque modificado del <i>Frame</i> en DigSILENT para implementar el control droop (recuadro rojo). ....	33
Figura 24 Zoom de bloque modificado en el <i>Frame</i> de DigSILENT. ....	34

Figura 25 Diagrama de bloques del control droop implementado en DigSILENT.....	34
Figura 26 Diagrama de bloques de esquema de control inercial derivativo. Elaboración propia para modelación dinámica.....	35
Figura 27 Diagrama de bloques del control inercial derivativo implementado en DigSILENT..	36
Figura 28 Diagrama de bloques de esquema de control combinado. Elaboración propia para modelación dinámica.....	38
Figura 29 Diagrama de bloques del control inercial derivativo implementado en DigSILENT..	39
Figura 30 Incorporación de <i>DFIG</i> a la red en base de dato DigSILENT.....	40
Figura 31 Frecuencia Pan de Azúcar 220 [kV] para el análisis de sensibilidad del estatismo del control droop, manteniendo la fija la constante de tiempo en $TD = 25[s]$ .....	41
Figura 32 Potencia El Arrayan para diferentes valores de estatismo, manteniendo la fija la constante de tiempo en $TD = 25 s$ .....	42
Figura 33 Velocidad del parque eólico El Arrayan para diferentes estatismos, manteniendo la fija la constante de tiempo en $TD = 25 s$ .....	43
Figura 34 Frecuencia Pan de Azúcar 220 [kV] para el análisis de sensibilidad sobre la constante de tiempo del filtro pasa alto del control droop, manteniendo la fija el estatismo en $R = 16\%$ ..	45
Figura 35 Potencia El Arrayan para el análisis de sensibilidad sobre la constante de tiempo del filtro pasa alto del control droop, manteniendo la fija el estatismo en $R = 16\%$ .....	45
Figura 36 Velocidad del parque eólico El Arrayan el análisis de sensibilidad sobre la constante de tiempo del filtro pasa alto del control droop, manteniendo la fija el estatismo en $R = 16\%$ .	46
Figura 37 Frecuencia Pan de Azúcar 220 [kV] para el análisis de sensibilidad sobre la constante de tiempo del filtro pasa alto del control inercial derivativo, manteniendo fija la constante de inercia $H = 4,44 [s]$ .....	48
Figura 38 Potencia El Arrayan para el análisis de sensibilidad sobre la constante de tiempo del filtro pasa alto del control inercial derivativo, manteniendo fija la constante de inercia $H = 4,44 [s]$ .....	49
Figura 39 Velocidad del parque eólico El Arrayan el análisis de sensibilidad sobre la constante de tiempo del filtro pasa alto del control inercial derivativo, manteniendo fija la constante de inercia $H = 4,44 [s]$ .....	49
Figura 40 Frecuencia Pan de Azúcar 220 [kV] para el análisis de sensibilidad sobre constante de inercia del control inercial derivativo, manteniendo la fija la constante de tiempo en $Tf = 2 s$ .	50
Figura 41 Potencia El Arrayan para diferentes valores de constante de inercia, manteniendo la fija la constante de tiempo en $Tf = 2 s$ .....	51
Figura 42 Velocidad del parque eólico El Arrayan para diferentes constantes de inercia, manteniendo la fija la constante de tiempo en $Tf = 2 s$ .....	52
Figura 43 Frecuencia Pan de Azúcar 220 [kV] para el análisis de sensibilidad sobre constante de inercia del control combinado, manteniendo fija $Tf = 2 s$ , $TD = 20 [s]$ y $R = 16\%$ .....	54
Figura 44 Potencia El Arrayan para el análisis de sensibilidad sobre constante de inercia del control combinado, manteniendo fija $Tf = 2 s$ , $TD = 20 [s]$ y $R = 16\%$ .....	55

Figura 45 Velocidad El Arrayan para el análisis de sensibilidad sobre constante de inercia del control combinado, manteniendo fijo $Tf = 2 s$ , $TD = 20 [s]$ y $R = 16\%$ .....	55
Figura 46 Frecuencia Pan de Azúcar 220 [kV] para el análisis de sensibilidad sobre el estatismo del control combinado, manteniendo fijo $Tf = 2 s$ , $TD = 20 [s]$ y $H = 12\%$ . ....	57
Figura 47 Frecuencia en Pan de Azúcar, para todos los esquemas de control con valores óptimos encontrados en las secciones 6.1, 6.2 y 6.3. ....	59
Figura 48 Potencia El Arrayan, para todos los esquemas de control con valores óptimos encontrados en las secciones 6.1, 6.2 y 6.3. ....	60
Figura 49 Velocidad El Arrayan, para todos los esquemas de control con valores óptimos encontrados en las secciones 6.1, 6.2 y 6.3. ....	61

## Índice de tablas

Tabla 1 Valores de variables para cálculo de demanda neta mínima en la hora 7669 del año 2030. ....	19
Tabla 2 Desglose de potencia en [MW] de ERNC solares y eólicas para la hora 7669 del año 2030. ....	19
Tabla 3 Potencia despachada por tecnología para la hora 7669 del año 2030. ....	20
Tabla 4 Constante de inercia promedio del sistema para escenarios $E2$ y $E3$ . ....	20
Tabla 5 Potencia instalada de aerogeneradores proyectadas al 2030 por región. ....	20
Tabla 6 Significado de variables de las ecuaciones del modelo aerodinámico. ....	24
Tabla 7 Significado de variables de las ecuaciones del modelo mecánico. ....	27
Tabla 8 Significado de variables de las ecuaciones del modelo del generador. ....	28
Tabla 9 Descripción de los bloques ( <i>Frames</i> ) del <i>DFIG Control</i> . ....	31
Tabla 10 Correspondencia entre los modelos genéricos teóricos y los <i>Frames</i> del <i>DFIG Control</i> . ....	32
Tabla 11 Significados de las variables externas del control droop. ....	32
Tabla 12 Sensibilidad de variables internas del control droop. ....	35
Tabla 13 Significados de las variables externas del control inercial derivativo. ....	36
Tabla 14 Sensibilidad de variables internas del control inercial derivativo. ....	37
Tabla 15 Significados de las variables externas del control combinado. ....	38
Tabla 16 Tiempo en que se demoran en alcanzar el Nadir para diferentes estatismos. ....	42
Tabla 17 Medición de índices de desempeño del control droop para diferentes estatismos manteniendo fijo la constante de tiempo del filtro pasa alto en $TD = 25$ [s]. ....	43
Tabla 18 Medición de índices de desempeño del control droop para diferentes valores de constante de tiempo para filtro pasa alto, manteniendo fijo estatismo $RWT = 16$ [%]. ....	46
Tabla 19 Resumen de valores óptimos para los diferentes parámetros del control droop. ....	47
Tabla 20 Medición de índices de desempeño del control inercial derivativo para diferentes constantes de tiempo del filtro pasa bajo manteniendo fijo la constante de inercia en $H = 4,44$ [s]. ....	50
Tabla 21 Medición de índices de desempeño del control inercial derivativo para diferentes constantes de inercia manteniendo fijo la constante de tiempo del filtro pasa bajo en $Tf = 2$ [s]. ....	52
Tabla 22 Resumen de valores óptimos para los diferentes parámetros del control inercial derivativo. ....	53
Tabla 23 Medición de índices de desempeño del control combinado para diferentes constantes de inercia, manteniendo fijo $Tf = 2$ s, $TD = 20$ [s] y $R = 16$ %. ....	56
Tabla 24 Medición de índices de desempeño del control combinado para diferentes estatismos, manteniendo fijo $Tf = 2$ s, $TD = 20$ [s] y $H = 12$ [s]. ....	57

Tabla 25 Resumen de valores óptimos para los diferentes parámetros del control inercial derivativo.....	58
Tabla 26 Tabla resumen de los diferentes esquemas de control implementados con sus valores óptimos encontrados en las secciones 6.1, 6.2 y 6.3. ....	61