

INDICE

	<i>Pag.</i>
Capitulo 1. INTRODUCCIÓN	
1.1.- Introducción	1
1.2.- Motivación	2
1.3.- Objetivos	3
1.4.- Estructura	4
Capitulo 2. GENERACIÓN DISTRIBUIDA	
2.1.- Introducción a la generación distribuida	7
2.2.- Beneficios de la generación distribuida	8
2.3.- Futuro de la generación distribuida	9
2.4.- Tecnologías de generación distribuida	11
2.4.1 Motores a Base de Combustibles Fósiles	11
2.4.2 Turbinas de Gas	11
2.4.3 Microturbinas	12
2.4.3.1 Microturbina a Gas	12
2.4.3.2 Microturbina Hidráulica	12
2.4.4 Celda de Combustible	13
2.4.5 Células Fotovoltaicas	13
2.4.6 Generadores Eólicos	14
2.5.- Características de los generadores	15
2.5.1 Generadores Síncronos	16
2.5.1.1 Utilización de los Generadores Síncronos en Generación Distribuida	19
2.5.2 Generadores de Inducción	19
2.5.2.1 Generadores de Inducción bajo condiciones de fallo	21
2.5.2.2 Utilización de los Generadores de Inducción en Generación Distribuida	21
2.5.3 Sistemas convertidores electrónicos	22
2.6.- Generación distribuida en los sistemas eléctricos de distribución	22

2.6.1	Flujo de potencia	22
2.6.1.1	Transferencia de Potencia entre dos Nudos de una Red	23
2.6.1.2	Análisis del Flujo de Carga	24
2.6.1.2.1	<i>Clasificación de los nudos</i>	25
2.6.1.2.2	<i>Ecuación de Red</i>	26
2.6.1.2.3	<i>Tipos de Métodos Iterativos</i>	27
2.6.1.2.3.1	<i>Comparación de ambos métodos iterativos</i>	28
2.6.2	Estabilidad de Tensión	28
2.6.2.1	<i>Estabilidad de tensión en Sistemas de Distribución</i>	28
2.6.2.1.1	<i>Curvas PV</i>	29
2.6.2.1.2	<i>Curvas QV</i>	30
2.6.3	Análisis de Fallos	31
2.6.3.1	<i>Tipos de Fallos</i>	31
2.6.3.2	<i>Cálculo de Fallos Equilibrados</i>	32
2.6.3.3	<i>Cálculo de Fallos Desequilibrados</i>	33
2.6.4	Impacto de la Generación distribuida en las redes de distribución	34
2.6.4.1	<i>Flujos de potencia</i>	34
2.6.4.2	<i>Pérdidas de potencia</i>	34
2.6.4.3	<i>Variación de los niveles de tensión</i>	34
2.6.4.4	<i>Contribución al nivel de fallos</i>	35
2.7.-	Marco Legal de la GD	36
2.7.1	Normas de Interconexión de la GD Red	39
2.8.-	Conclusiones	43
Bibliografía	44

Capítulo 3. EVALUACIÓN DE LA POTENCIA TRANSFERIDA

3.1.-	Introducción	47
3.2.-	Capacidad de Transferencia de Potencia	49
3.2.1	Caso general	50
3.2.2	Capacidad de Potencia Transferida de una Línea de Distribución	51
3.2.2.1	<i>Máxima Potencia Transferida limitada por la Estabilidad de la Tensión</i> ..	51

3.3.- Capacidad de Transferencia de potencia Disponible (ATC)	52
3.4.- Métodos de cálculo de la Capacidad de Transferencia de Potencia	54
3.4.1 Método basado en el Flujo de Carga Continuo	54
3.4.2 Flujo de Potencia Optimo (OPF)	55
3.4.3 Métodos lineales	58
3.5.- Capacidad de transferencia de potencia disponible en el sistema de distribución primaria de energía eléctrica (CTDD) con Generación Distribuida	62
3.6.- Conclusiones	67
Bibliografía	68

Capitulo 4. GENERACIÓN EÓLICA: MODELO DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA DE PARQUES EÓLICOS

4.1.- Introducción	71
4.2.- Recursos eólicos	75
4.2.1 Recursos eólicos en España	77
4.3.- Tipos de Aerogeneradores	79
4.4.- Tecnología actual y proyección hacia el futuro	83
4.4.1 El Aerogenerador de Eje Horizontal	83
4.4.2 Tamaño	85
4.4.3 Rotor	86
4.4.4 Sistema de control	87
4.4.5 Sistema eléctrico	88
4.4.6 Sistema de almacenamiento	89
4.4.7 Curva de potencia	91
4.4.8 Tecnologías de futuro	91
4.4.9 Panorama español	92
4.5.- Actuaciones de las aeroturbinas	94
4.6.- Configuración de un parque eólico	101

4.6.1	Disponibilidad de la energía	102
4.7.-	Modelo de Producción de Energía Eléctrica de Parques Eólicos	103
4.7.1	Modelado de la velocidad del viento	105
4.7.1.1	<i>Energía del viento</i>	106
4.7.1.2	<i>Caracterización energética de las variaciones temporales del viento</i>	109
4.7.1.3	<i>Modelo propuesto para generar velocidades del viento</i>	116
4.7.2	Generación de velocidades del viento correladas	117
4.7.2.1	<i>Métodos actuales</i>	118
4.7.2.2	<i>Método propuesto</i>	118
4.7.3	Modelado del nº de turbinas en funcionamiento en los parques eólicos ..	123
4.7.4	Resultados	126
4.7.5	Implementación del modelo.....	127
4.8.-	Conclusiones	129
	Bibliografía	131

Capitulo 5. COGENERACIÓN: MODELO DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA DE PLANTAS DE COGENERACIÓN

5.1.-	Introducción	133
5.2.-	Ventajas de la cogeneración	136
5.3.-	Sistemas de cogeneración	139
5.3.1	Cogeneración con Turbina de Gas	140
5.3.2	Cogeneración con turbina de vapor	144
5.3.2.1	<i>Turbinas de vapor a contrapresión</i>	145
5.3.2.2	<i>Turbinas de vapor de condensación con extracción</i>	146
5.3.3	Cogeneración en ciclo combinado	148
5.3.4	Cogeneración con motor alternativo	149
5.3.5	Otras tecnologías	151
5.4.-	Eficiencia de los sistemas de cogeneración	152
5.5.-	Panorama actual de la cogeneración	155
5.6.-	Modelo de Producción de Energía Eléctrica de Plantas de	

Cogeneración (CHP)	158
5.6.1 Modelado de la decisión de conectar las PC a la red eléctrica	160
5.6.1.1 Costes de generación	160
5.6.1.2 Precio de venta de la electricidad	164
5.6.1.3 Modelado de la decisión	167
5.6.2 Modelado del nº de generadores disponibles en las plantas de cogeneración	169
5.6.3 Resultados	172
5.6.4 Implementación del modelo.....	173
5.7.- Conclusiones	175
Bibliografía	177

Capitulo 6. MÉTODOLÓGIA DE SIMULACIÓN DE RESULTADOS

6.1.- Introducción	179
6.2.- Metodología	180
6.2.1 Sistemas eléctricos de distribución primaria	181
6.2.1.1 Sistema de Distribución en Anillo de 5 nudos	181
6.2.1.2 Sistema de Distribución Real en Anillo de 37 nudos	181
6.2.2 Escenarios	183
6.3.- Resultados	184
6.3.1 Sistema de Distribución de 5 nudos	184
6.3.1.1 Flujos de potencia	185
6.3.1.2 Pérdidas en la red	186
6.3.1.3 Variaciones de tensión y estabilidad	187
6.3.1.4 Contribuciones al nivel de fallo	188
6.3.1.5 Capacidad de Transferencia Disponible en el sistema de Distribución (CTDD).....	189
6.3.1.6 Escenario sin generación convencional.....	191
6.3.2 Sistema de Distribución Real de 37 nudos	194
6.3.2.1 Flujos de potencia	194

6.3.2.2 Pérdidas en la red	195
6.3.2.3 Variaciones de tensión y estabilidad	196
6.3.2.4 Contribuciones al nivel de fallo	197
6.3.2.5 Capacidad de Transferencia Disponible entre las distintas áreas del sistema de Distribución (CTDD)	197
6.3.2.6 Capacidad de Transferencia Disponible desde una zona con GD del Sistema de Distribución a un área o conjunto de áreas del sistema	202
6.4.- Conclusiones	206
Bibliografía	209

Capítulo 7. CONCLUSIONES

7.1 Resumen y conclusiones	211
7.2 Aportaciones de esta tesis	216
7.3 Futuros desarrollos	217

Anexo A. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS Y DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

A1 Introducción	219
A2 Técnicas de Simulación	219
A2.1 Generación de números aleatorios	221
A2.2 Simulación de Monte Carlo	222
A3 Programación no lineal	223
Bibliografía	225

Anexo B. PARÁMETROS PARA EVALUAR LA POTENCIA TRANSFERIDA

B.1 Ecuación de Flujo de Potencia en C.A	227
B.2 Factores de distribución de potencia transferida (PTDFs)	227

B.3 Factores de distribución de contingencia en líneas (LODFs)	228
B.4 Factores de distribución de desconexión de líneas (LCDFs)	228
B.5 Factores de distribución de potencia transferida en contingencia (OTDFs) .	229
B.6 Flujos de contingencia (OMWs)	229
B.7 NetPTDF _B y NetMW _B	229

Anexo C. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS DE TEST

C.1 Sistema de distribución primaria de 5 nudos	231
C.2 Sistema de distribución primaria de 37 nudos	232

Anexo D. PROGRAMACIÓN DE LOS MODELOS

E.1 Modelo de producción eléctrica de parques eólicos	235
E.2 Modelo de producción eléctrica de plantas de cogeneración	242

Anexo E. RESULTADOS

E.1 Producción eléctrica de parques eólicos durante un día	249
E.2 Producción eléctrica de plantas de cogeneración durante un día	251
E.3 Simulaciones de funcionamiento de los sistemas de distribución en los distintos escenarios	253

LISTA DE FIGURAS:

- Fig. 1.1.- Energía consumida en España procedente de GD
- Fig. 2.1.- Generador sincrónico conectado a una red de potencia infinita[4]
- Fig. 2.2.- Diagrama fasorial de un generador sincrónico conectado a una red de potencia infinita[4]
- Fig.2.3.- Diagrama de funcionamiento de un generador sincrónico.[4]
- Fig. 2.4.- Curva Par-Velocidad de una máquina trifásica de inducción
- Fig. 2.5.- Circuito equivalente de un motor de inducción [4]
- Fig. 2.6.- Diagrama del círculo de una máquina de inducción [4]
- Fig.2.7.- Diagrama equivalente del sistema [14]
- Fig. 2.8.- Típica curva Potencia activa-Tensión (PV)
- Fig. 2.9.- Típica curva Potencia reactiva-Tensión (QV)
- Fig. 3.1.- Carga conectada a un generador
- Fig. 4.1.-Potencia eólica instalada en España por Comunidades Autónomas (Enero 2004)
- Fig. 4.2.- Mapa eólico europeo.
- Fig. 4.3.- Vista parcial de un parque eólico
- Fig. 4.4.-: Máquinas de Eje Horizontal (HAWT) frente a Máquinas de Eje Vertical (VAWT - Darrieus).
- Fig. 4.5.-: Máquinas a Sotavento y a Barlovento
- Fig. 4.6.- Turbinas de 1, 2 y 3 Palas.
- Fig. 4.7.- Eficiencia de algunos tipos de turbina.
- Fig. 4.8.- Disposición típica dentro de la góndola de un aerogenerador de eje horizontal de tamaño medio con sistemas modulares [10].
- Fig. 4.9.- Curvas de potencia de una misma turbina, con regulación por cambio de paso y con regulación por pérdida aerodinámica.
- Fig. 4.10.- Curvas de coeficiente de potencia de una misma aeroturbina, como función del coeficiente de velocidad para distintos ángulos de paso de pala. A: con superposición de estados operativos en actuación con paso variable. B: con superposición de estados operativos en actuación con paso fijo.
- Fig. 4.11.- Coeficientes de par característicos de turbinas lentas y rápidas.
- Fig.4.12.- Variación del coeficiente de potencia C_p máximo con el parámetro de velocidad del rotor λ para diferentes tipos de aeroturbinas con tecnología actual.
- Fig 4.13.- Forma de la función de densidad de probabilidad de Weibull $f(c, a)$ y su integral $p(c, a)$, $a = v/a$
- Fig.4.14.- Histograma (distribución de frecuencias) de las velocidades del viento medidas y ajustadas a una función de Weibull para datos obtenidos en la zona eólica de Malpica, La Coruña. (A es c).
- Fig.4.15.- Métodos de estimación de la producción energética eólica. S significa el sumatorio de la potencia a lo largo del tiempo para obtener la energía.

Fig. 4.16.- Esquema del algoritmo propuesto para obtener las velocidades del viento correladas

Fig. 4.17.- Modelo de parque eólico con generadores asincronos

Fig. 4.18. Curva de potencia típica de una turbina eólica

Fig.4.19. Pantalla de introducción de datos (Modelo de Parques Eólicos)

Fig.5.1.- Ahorro de energía primaria en un sistema de cogeneración

Fig.5.2.- Esquema de cogeneración de ciclo simple

Fig. 5.3.- Esquema cogeneración turbina de vapor

Fig. 5.4.- Esquema cogeneración ciclo combinado

Fig. 5.5.- Esquema cogeneración motor alternativo

Fig. 5.6.- % de Cogeneración c/r al total de energía.

Fig. 5.7.- Comparación de costes variables de generación en PC

Fig. 5.8.- Comparación de costes totales de generación en PC

Fig. 5.9.- Curva de demanda diaria y precios de casación

Fig. 5.10.- Retribuciones de cogeneración según distintos RD

Fig. 5.11.-Evolución de la tarifa eléctrica media (TEM)

Fig. 5.12.- Impacto RD 2818/98 en el desarrollo de la cogeneración en España

Fig. 5.13.- Expectativas de evolución de la cogeneración en España

Fig. 5.14. Modelo de planta de cogeneración de turbina de vapor

Fig, 5.15. Curva de generación y de demanda interna en una PC

Fig, 5.16. Pantalla de introducción de datos (Mo delo de Plantas de Cogeneración)

Fig. 6.1.- Sistema de distribución primaria de 5 nudos

Fig. 6.2.- Sistema de distribución primaria en anillo de 37 nudos

Fig. 6.3.- Sistema de distribución primario de 5 nudos (12 h).

Fig. 6.4.- Variación nivel de tensión (Sistema de 5 nudos – 20 h-)

Fig. 6.5.- Variación nivel de tensión (Sistema de 5 nudos – 6 h-)

Fig. 6.6.- Curva PV- Bus 5 (Sistema de 5 nudos)

Fig. 6.7.-Contribución al nivel de fallo (Sistema de 5 nudos)

Fig. 6.8.- Sistema de distribución primaria de 5 nudos sin generación convencional

Fig. 6.9.- Sistema de distribución primario real de 37 nudos.

Fig. 6.10.- Variación nivel de tensión (Sistema de 37 nudos – 20 h -)

Fig. 6.11.-Contribución al nivel de fallo (Sistema de 37 nudos)

Fig.6.12. Potencia generada en GD y CTDD del sistema (en un día)

LISTA DE TABLAS:

Tabla 2.1.- Producción eléctrica con energías renovables proyectada a 2010

Tabla 2.2.- Características de Tecnologías de GD

Tabla 4.1.- Potencia eólica instalada en 1994, 2000 y 2004.

Tabla 4.2. Plantas Offshore en funcionamiento (Año 2002)

Tabla 4.3.. Principales configuraciones de aerogeneradores existentes en el mercado.

Tabla 4.4. Principales fabricantes de aerogeneradores.

Tabla 4.5- Relación entre la velocidad del viento, su valor en grados Beaufort, sus efectos fácilmente apreciables, la densidad de potencia, la energía a lo largo de un año y la presión dinámica

Tabla 4.6.- Valores orientativos de n para distintos tipos de terreno.

Tabla 4.7. Presentación de resultados (Modelo de Parques Eólicos)

Tabla 5.1.- Comparación de las distintas alternativas de cogeneración

Tabla 5.2.- Desarrollo cogeneración

Tabla 5.3.- Distribución sectorial

Tabla 5.4.- Distribución por tecnologías

Tabla 5.5.- Costes variables de generación de electricidad en plantas de cogeneración.

Tabla 5.6. Presentación de resultados (Modelo de Plantas de cogeneración)

Tabla 6.1.- Potencia en la red a las 6h, 12h y 20 h..(Sistema de 5 nudos)

Tabla 6.2.- Pérdidas en la red a las 6h, 12h y 20 h.(Sistema de 5 nudos)

Tabla 6.3.- Transferencia límite de potencia (Sistema de 5 nudos – Sin GD)

Tabla 6.4.- Transferencia límite de potencia (Sistema de 5 nudos – Con GD)

Tabla 6.5.- Potencia en la red a las 6h, 12h y 20 h..(Sistema de 37 nudos)

Tabla 6.6.- Pérdidas en la red a las 6h, 12h y 20 h.(Sistema de 37 nudos)

Tabla 6.7.- Transferencia límite de potencia entre Áreas (Sistema de 37 nudos – Sin GD)

Tabla 6.8.- Transferencia límite de potencia entre Áreas (Sistema de 37 nudos – Con GD)

Tabla 6.9.- Transferencia límite de potencia (Nudos 1013/1156 -Sistema de 37 nudos) 06:00 h

Tabla 6.10.- Transferencia límite de potencia (Nudos 1013/1156 -Sistema de 37 nudos) 12:00 h

Tabla 6.11.- Transferencia límite de potencia (Nudos 1013/1156 -Sistema de 37 nudos) 20:00 h

Tabla 6.12.- Transferencia límite de potencia (Nudos 1013/1156 – Áreas 97-98) 20:00 h

Tabla 6.13.- Transferencia límite de potencia (Nudos 1013/1156 - Área 97) 20:00 h

Tabla 6.14.- Transferencia límite de potencia (Nudos 1013/1156 - Área 98) 20:00 h