

Índice

1. Introducción.....	7
2. Energía solar fotovoltaica.....	15
2.1 Energía solar.....	15
2.2 Modos de aprovechamiento de la energía solar.	21
2.3 El sistema eléctrico español y la energía solar.....	32
2.4 El efecto fotoeléctrico.....	55
2.5 La célula solar.....	56
2.6 Los módulos fotovoltaicos.	64
2.7 Instalaciones fotovoltaicas.....	69
2.7.1 Instalaciones aisladas.....	73
2.7.2 Instalaciones conectadas a red.....	75
2.7.3 Baterías de almacenamiento.....	77
2.7.4 Mecanismos de seguimiento.....	79
2.7.5 Vida útil.....	82
2.8 El inversor.....	82
2.8.1 Topologías de inversores fotovoltaicos.....	88
2.8.1.1 Inversores multinivel.....	89
2.8.1.1.1 Medio puente con fijación de nivel por diodos.....	93
2.8.1.1.2 Puente completo con fijación de nivel por interruptores.....	95
2.8.1.1.3 Cascada.....	95
2.8.1.1.4 Paso.....	96
2.8.1.1.5 Con acoplamiento magnético.....	97
2.8.1.1.6 Con condensadores flotantes.....	97
2.8.2 Parámetros de rendimiento.....	98
2.8.3 Configuraciones de sistemas fotovoltaicos e inversores.....	100
2.8.4 Inversores del mercado.....	104
2.9 Modulación por ancho de pulso (PWM).....	106
2.9.1 Técnicas avanzadas de modulación.....	117
2.10 Seguimiento del punto de máxima potencia.....	121
2.11 Teoría pq.....	127
2.11.1 La transformación de Clarke.....	127
2.11.2 Potencias instantáneas de la teoría pq.....	129
2.11.3 Control pq.....	130

2.12 Métodos de detección en isla.....	132
2.12.1 Métodos pasivos residentes en el inversor.....	134
2.12.1.1 UVP/OVP y UFP/OFP.....	134
2.12.1.2 Detección de salto de fase de la tensión (<i>Voltage Phase Jump Detection</i>)...	143
2.12.1.3 Detección de armónicos (<i>Detection of Harmonics</i>).....	143
2.12.2 Métodos activos residentes en el inversor.....	143
2.12.2.1 Medida de la impedancia (<i>Impedance Measurement</i>).....	146
2.12.2.2 Inyección de una señal (<i>Signal injection</i>).....	147
2.12.2.3 Inserción de carga (<i>Load insertion</i>).....	147
2.12.2.4 Cambio de frecuencia en modo corredera (<i>Sliding Mode Frequency Shift, SMS</i>).....	148
2.12.2.5 Modificación activa de la frecuencia (<i>Active Frequency Drift, AFD</i>).....	153
2.12.2.6 Cambio Sandía de la Frecuencia (<i>Sandia Frequency Shift, SFS</i>).....	157
2.12.2.7 Salto de frecuencia (<i>Frequency Jump</i>).....	160
2.12.2.8 Disparo de Frecuencia Inestable (<i>Unstable Frequency Trip</i>).....	160
2.12.2.9 Cambio Sandía de la Tensión (<i>Sandia Voltage Shift, SVS</i>).....	160
2.12.2.10 Esquemas de frecuencia eléctrica general (<i>General Electric Frequency Schemes, GEFS</i>).....	161
2.12.3 Métodos basados en sistemas de comunicación.....	161
2.12.3.1 Comunicaciones en la línea de potencia (<i>power line carrier communications</i>).....	161
2.12.3.2 Desconexión por Señal Producida (<i>Signal Produced by Disconnect</i>).....	162
2.12.3.3 Adquisición de Datos y Control de Supervisión (<i>Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA</i>).....	163
2.12.3.4 Esquema de Transferencia de Disparo (<i>Transfer Trip Scheme</i>).....	163
2.12.4 Métodos residentes en la red eléctrica.....	164
2.12.4.1 Inserción de impedancia (<i>Impedance Insertion</i>).....	165
2.13 Factores de pérdidas energéticas.....	167
2.13.1 Pérdidas por no cumplimiento de la potencia nominal.....	167
2.13.2 Pérdidas de mismatch o de conexonado.....	167
2.13.3 Pérdidas por polvo y suciedad.....	168
2.13.4 Pérdidas angulares y espectrales.....	168
2.13.5 Pérdidas por efecto Joule en el cableado.....	168
2.13.6 Pérdidas por temperatura.....	168
2.13.7 Pérdidas por rendimiento del inversor DC/AC.....	169
2.13.8 Pérdidas por rendimiento del MPPT del generador fotovoltaico.....	169
2.13.9 Pérdidas por sombreado del generador FV.....	169
2.13.10 Otras pérdidas.....	169

3. Sistema eléctrico de potencia objeto de estudio.....	171
3.1 Planta fotovoltaica.....	171
3.2 Cálculos.....	173
3.2.1 Filtro.....	173
3.2.2 Línea subterránea de BT.....	174
3.2.3 Transformador 0.420/20 kV.....	175
3.2.4 Línea subterránea de MT.....	178
3.2.5 Línea aérea de MT.....	179
3.2.6 Transformador 66/20 kV.....	180
3.2.7 Cargas.....	183
3.2.7.1 Carga 1.....	183
3.2.7.2 Carga 2.....	184
3.2.7.3 Carga 3.....	185
3.2.7.4 Carga 4.....	186
3.3 Programación en ATP-EMPT del transistor IGBT.....	187
4. Simulaciones	191
4.1 Inversor.....	192
4.2 Planta fotovoltaica 1.....	201
4.3 Planta fotovoltaica 2.....	219
4.4 Planta fotovoltaica 3.....	239
4.5 Planta fotovoltaica 4.....	257
4.6 Planta fotovoltaica 5.....	281
4.7 Planta fotovoltaica 6.....	291
4.8 Planta fotovoltaica 7.....	299
4.9 Planta fotovoltaica 8.....	321
5. Análisis de resultados y conclusiones	343
6. Tendencias futuras	347
Bibliografía.....	353
Apéndice A ATP-EMTP.....	357
A.1 ¿Qué es ATP?.....	357
A.2 Requerimientos de hardware y software para ATP.....	357
A.3 Licencia de ATP.....	358
A.4 Capacidades del programa.....	359
A.5 Descripción del entorno de trabajo.....	359
A.5.1 Gestor del entorno: ATPCC.....	360

A.5.1.1 Pantalla principal.....	361
A.5.1.2 Configuración de los programas principales.....	361
A.5.1.3 Configuración de programas adicionales.....	363
A.5.1.4 Configuración de parámetros generales.....	364
A.6 Compilador: ATP.....	365
A.7 Editor de textos: PFE32.....	366
A.7.1 Estructura general de un fichero .atp o .dat.....	367
A.7.2 Subrutinas de apoyo.....	370
A.7.3 Módulos de simulación integrada.....	372
A.7.3.1 TACS.....	372
A.7.3.2 MODELS.....	372
A.8 EDITOR GRÁFICO: ATPDraw.....	373
A.8.1 ENTORNO DE TRABAJO.....	374
A.8.3 CREAR UN CIRCUITO NUEVO.....	375
A.8.4 COMPONENTES DEFINIDOS POR EL USUARIO.....	378
A.8.5 COMPONENTES EN ATPDRAW.....	383
A.8.5.1 PROBES & 3-PHASE.....	384
A.8.5.2 BRANCH LINEAR.....	386
A.8.5.3 BRANCH NONLINEAR.....	387
A.8.5.4 LINE LUMPED.....	388
A.8.5.5 LINE DISTRIBUTED.....	389
A.8.5.6 SWITCHES.....	390
A.8.5.7 SOURCES.....	391
A.8.5.8 MACHINES.....	392
A.8.5.9 TRANSFORMERS.....	393
A.8.5.10 TACS.....	394
A.8.5.11 Frequency comp.....	397
A.9 Visualizador gráfico: PCPlot.....	398
A.10 Visualizador gráfico: PlotXY.....	398
A.11 Oscilaciones numéricas.....	400
A.11.1 Causas de las oscilaciones numéricas.....	400
A.11.2 Representación matemática.....	400
A.11.3 Ejemplos.....	404

A.11.3.1 Intensidad a través de una inductancia.....	404
A.11.3.2 Tensión a través de un condensador.....	405
A.11.4 Opciones para eliminar las oscilaciones numéricas.	407
A.11.4.1 Añadiendo elementos al circuito.	407
A.11.4.2 Rama 'snubber'.	408
A.11.4.3 Disminuir el tiempo de paso.....	410
A.11.4.4 Amortiguamiento.....	410
A.11.4.5 Interpolación.....	411
A.11.4.6 Cambiando el método de integración.	411