

Instituto Tecnológico de Morelia

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

PROGRAMA DE GRADUADOS E INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Modelado de sistemas fotovoltaicos interconectados con la red para estudios de propagación de armónicas

T E S I S

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

Presenta
Ing. Jorge Eduardo Lara Reyes

Director de tesis
Ph.D. Manuel Madrigal Martínez

Morelia, Michoacán, México. Mayo, 2014.

Resumen

En la presente tesis se trata de manera detallada el desarrollo de modelos matemáticos de sistemas de generación fotovoltaicos, interconectados a la red de distribución, para estudios de propagación de corrientes armónicas.

Los modelos mostrados en la tesis están enfocados para ser utilizados en herramientas de propagación de armónicas en redes eléctricas largas, por lo que los modelos tienden a ser lo más simples posibles, pero sin perder la exactitud que se requiere para estudios de propagación de corrientes armónicas.

Esta tesis contiene aspectos teóricos de generación distribuida, celdas y paneles fotovoltaicos, inversores CD-CA y redes de distribución, que son los elementos que comprenden un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica.

Se aborda de manera particular el modelado de las celdas y paneles fotovoltaicos, así como el modelado del inversor CD-CA utilizado en sistemas fotovoltaicos.

Se explican de manera general conceptos sobre calidad de la energía y propagación de armónicas. También se desarrolla un modelo de interconexión de un sistema fotovoltaico a la red, con características particulares al estudio realizado en la presente tesis. Y por último se muestran varios ejemplos de estudios en redes de distribución, en donde se analizan los efectos, desde el punto de vista armónico, de la interconexión de sistemas fotovoltaicos.

Los resultados indican que tanto la capacidad de los sistemas fotovoltaicos interconectados, así como su punto de interconexión en la red, pueden tener un efecto adverso a la red.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Indice general	III
Indice de figuras	VI
Indice de tablas	IX
Nomenclatura	X
1. Introducción	1
1.1. Estado del arte	1
1.2. Generación de armónicos debido a sistemas fotovoltaicos.	4
1.3. Justificación	5
1.4. Planteamiento del problema	6
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2. Objetivos específicos	7
1.6. Contenido de la tesis	7
2. Conceptos fundamentales	8
2.1. Introducción	8
2.2. Concepto de generación distribuida	8
2.2.1. Definición	8
2.2.2. Rango de la generación distribuida	9
2.2.3. Tecnologías de generación distribuida	9
2.2.4. Interconexión con la red	9
2.2.5. Aplicaciones de la generación distribuida	10
2.2.6. Aspectos a considerar para la inclusión futura a gran escala de la de GD	11
2.2.6.1. Confiabilidad y calidad de energía (PQ)	11
2.2.6.2. Cuestión del Control	12
2.2.6.3. Seguridad	12
2.2.6.4. Las cuestiones ambientales	12
2.2.6.5. Aspectos económicos	13
2.3. Concepto de generación fotovoltaica	13
2.3.1. Celda fotovoltaica y panel fotovoltaico	13
2.3.2. Usos de los sistemas de energía fotovoltaica	13
2.3.3. Fabricación	14
2.4. Concepto de calidad de la energía	14
2.4.1. Introducción	14
2.4.2. Fenómenos que afectan la calidad de la energía.	15
2.4.2.1. Distorsión de forma de la señal (DFS)	16

2.5.	Análisis armónico en sistemas eléctricos	17
2.5.1.	Definición de armónicas	17
2.5.2.	Fuentes de distorsión armónica	18
2.5.2.1.	Cargas no lineales clásicas	19
2.5.2.2.	Dispositivos de electrónica de potencia	19
2.5.2.3.	Otras cargas electrónicas no lineales	19
2.5.3.	Efecto de las armónicas	20
2.5.3.1.	Pérdidas I^2R	21
2.5.4.	Resonancias armónicas en las redes eléctricas	21
2.5.4.1.	Resonancia en Capacitores	21
2.5.4.2.	Resonancia paralelo	22
2.5.4.3.	Resonancia serie	23
2.5.4.4.	Pérdidas I^2R	24
2.5.5.	Razón de Corto-Circuito (SCR)	24
2.5.6.	Trayectoria de las Armónicas	24
2.5.7.	Medidas de la distorsión en voltaje y corriente	26
2.5.7.1.	Valor eficaz (rms)	26
2.5.7.2.	Distorsión armónica total (THD)	27
2.5.7.3.	Distorsión de demanda total (TDD)	27
3.	El generador fotovoltaico	28
3.1.	Introducción	28
3.1.1.	Física de semiconductores	28
3.1.2.	El efecto fotovoltaico	29
3.2.	El sistema fotovoltaico interconectado con la red	29
3.3.	Modelado de un panel fotovoltaico	30
3.3.1.	Ecuaciones para modelar el circuito que representa la celda fotovoltaica	30
3.3.2.	Tipos de modelos para la celda fotovoltaica	31
3.4.	Algoritmo para modelar el panel fotovoltaico	32
3.4.1.	Modelo del panel fotovoltaico.	33
3.4.1.1.	Bloque de Ingreso de datos	34
3.4.1.2.	Bloque de cálculo de parámetros primarios	35
3.4.1.3.	Bloque para cálculo iterativo del voltaje de diodo	37
3.5.	Modelo del arreglo de paneles fotovoltaicos.	40
3.6.	Prueba del modelo.	41
4.	El inversor DC-AC	42
4.1.	Introducción	42
4.2.	Configuración del inversor	42
4.2.1.	Principales topologías	42
4.2.1.1.	inversor acoplado por diodos o <i>Diode-Clamped</i>	42
4.2.1.2.	inversor acoplado por capacitor o <i>Flying-Capacitor</i>	43
4.3.	Control del voltaje de salida	43
4.3.1.	Control de voltaje por ancho de pulso	44
4.3.2.	Modulación senoidal de ancho de pulso (SPWM)	44
4.3.3.	Armónicas en la onda del SPWM	47
4.3.4.	Inversores trifásicos	49
4.4.	Corriente del inversor	50
4.5.	Modelo del inversor	50
4.5.1.	Modelo monofásico	52
4.6.	Modelo de un inversor monofásico de cinco niveles.	59
4.7.	Modelo de un inversor trifásico de cinco niveles.	60

Índice general

4.8.	Programación del modelo de un inversor trifásico multinivel.	63
4.8.1.	Operación de la rutina para el inversor multinivel	69
5.	Interconexión con la red de distribución.	73
5.1.	Inyección de corriente armónica a la red de distribución.	73
5.2.	Estudio de propagación de corrientes armónicas en redes de distribución con sistemas PV interconectados.	77
5.2.1.	Estudio de flujos de potencia.	77
5.2.2.	Estudio de propagación armónica.	78
5.3.	Casos de estudio en redes de distribución.	78
5.3.1.	Sistema radial de 12 nodos y un ramal.	78
5.3.1.1.	Caso Base	80
5.3.1.2.	Casos de estudio	80
5.3.1.3.	THD nodal de voltaje	83
5.3.2.	Sistema radial de 28 nodos.	86
5.3.2.1.	Caso Base.	88
5.3.2.2.	Casos de estudio con sistemas PV interconectados	88
5.3.2.3.	Descripción de las pruebas realizadas en los casos de estudio.	90
5.3.2.4.	Desviación de voltaje.	90
5.3.2.5.	Potencia suministrada por el sistema PV.	92
5.3.2.6.	Impedancia referida a un punto (DPI)	92
5.3.2.7.	Distorsión armónica total THD	94
5.3.2.8.	Corriente Aportada	94
5.3.3.	Sistema de radial de 48 nodos.	96
5.3.3.1.	Caso base	96
5.3.3.2.	Descripción del caso.	96
5.3.3.3.	Caso base con sistemas PV conectados.	99
5.3.3.4.	Caso base con sistemas PV conectados y media compensación.	99
5.3.3.5.	Caso base con sistemas PV conectados y compensación completa en nodo número 4.	101
5.3.3.6.	Caso base con sistemas PV conectados y compensación al 25 % en nodo número 4.	101
5.3.3.7.	Caso base sin compensación.	103
6.	Conclusiones	106
6.1.	Conclusiones generales	106
6.2.	Recomendaciones para trabajos futuros.	107
7.	Apéndices	109
7.1.	Directorio de M-files que componen el simulador de un sistema fotovoltaico.	109
7.2.	Archivo de salida resultado de la ejecución del programa simulador de un sistema fotovoltaico.	110
	Bibliografía	112