

INDICE GENERAL

MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y SUMARIO DE LA TESIS DOCTORAL	1
Motivación.....	1
Objetivos.....	2
Sumario.....	3
CAPÍTULO 1	5
1. INTRODUCCIÓN.	5
CAPÍTULO 2	7
2. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN Y COMPENSACIÓN EÓLICA.....	7
2.1. Generador Síncrono de imanes permanentes.....	7
2.1.1. Modelo del generador.	8
2.1.2. Modelo mecánico del generador.	11
2.2. Topologías de las etapas de potencia.....	16
2.2.1. Rectificador no controlado del lado del generador.....	17
2.2.2. Rectificador activo del lado del generador.....	18
2.2.3. Inversor acoplado a red eléctrica.....	21
2.2.4. Topología seleccionada.....	23
CAPÍTULO 3	25
3. INEFICIENCIAS, CAUSAS Y EFECTOS. CUANTIFICACIÓN DE LA POTENCIA	25
3.1. Definición de armónico, subarmónicos e interarmónicos.....	25
3.2. Origen, causas y efectos de las ineficiencias en los sistemas eléctricos.....	26
3.3. Definiciones de potencia propuestas por Budeanu (1927).	28
3.4. Teoría de la potencia eléctrica de Fryze (1932).....	29
3.5. Definiciones recogidas en el Standard 100 del IEEE.	31
3.6. Cuantificación de la potencia eléctrica basada en la IEEE Std. 1459-2010.....	33
3.6.1. Sistemas eléctricos monofásicos.	34

3.6.1.1.	Sistemas eléctricos monofásicos lineales.....	34
3.6.1.2.	Sistemas eléctricos monofásicos no lineales.....	37
CAPÍTULO 4		41
4.	MÉTODOS DE MEDIDA PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DE LA RED ELÉCTRICA.	41
4.1.	Introducción a las técnicas de medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos.	42
4.2.	Métodos basados en la Transformada de Fourier Discreta (DFT).....	44
4.2.1.	Transformada de Fourier (DFT):.....	44
4.2.1.1.	Efecto “Leakage”.....	46
4.2.1.2.	Efecto “Picket-fence”	46
4.2.1.3.	Variaciones de la DFT para la medida de armónicos, subarmónicos e interarmónicos.	46
4.2.1.4.	Adaptación del ancho de la ventana de adquisición	47
4.2.1.5.	Medida de interarmónicos basada en la DFT Iterativa	50
4.2.1.6.	Agrupaciones aplicables para la mejora de la identificación de armónicos, subarmónicos e interarmónicos.....	54
4.2.1.6.1.	Agrupación según la relación de Parseval.	54
4.2.1.7.	Agrupaciones según norma UNE-EN 61000-4-7	56
4.2.1.7.1.	Definiciones relacionadas con el análisis frecuencial	56
4.2.1.7.2.	Duración de la ventana temporal	58
4.2.1.7.3.	Definiciones de la norma EN 61000-4-7:2002	58
4.2.1.7.4.	Medida de interarmónicos.....	60
4.3.	Basados en técnicas de PLL	61
4.4.	Técnicas de medida basadas en el Filtro de Kalman	63
4.4.1.	Filtro de Kalman Lineal	63
4.4.1.1.	Aplicaciones del filtro de Kalman lineal en la sincronización con la red eléctrica 67	
4.4.1.1.1.	Modelo matemático de la red eléctrica	68

4.4.1.1.2.	Descripción del "principio del modelo interno" y estimación del valor de la frecuencia de una señal desconocida.....	69
4.4.1.1.3.	Unión del Filtro de Kalman Lineal con el estimador de frecuencia. Sincronización con la red eléctrica.	73
4.4.1.2.	Aplicaciones del filtro de kalman en la medida de la energía eléctrica ...	75
4.4.2.	Filtro de Kalman Extendido (EKF).....	76
4.4.2.1.	Aplicaciones basadas en el filtro de Kalman Extendido. Filtro de Kalman Resonante	80
4.4.2.1.1.	Modelo del filtro resonante.....	81
4.4.2.1.2.	Modelo de la señal monofásica de la red para su aplicación con el (EKF), modo normal.	83
4.4.2.1.3.	(EKF) en el modo acelerado	84
CAPÍTULO 5	87
5.	METODOLOGÍA PROPUESTA.....	87
5.1.	Introducción.....	87
5.2.	Bloque 1: Determinación del número de componentes armónicas.....	89
5.2.1.	Introducción	89
5.2.2.	Descripción de la etapa de detección de componentes armónicas	91
5.2.2.1.	Descripción etapa 1. Adquisición y tratamiento de la señal	91
5.2.2.2.	Descripción etapa 2. Selección de resultados de la FFT.....	92
5.3.	Bloque 2: Selección de filtros FIR, separación del espectro, definición de las matrices de estado de (KF- PLL).....	98
5.4.	Bloque 3: Estimación de los valores de las componentes armónicas, estructura "KF-PLL" y adaptación del desfase introducido por el Filtro FIR.	104
5.4.1.	Medida de los grados de desfase introducidos por los filtros FIR.....	105
5.4.2.	Modulo y ángulo de cada componente obtenida con Kalman.....	106
5.5.	Bloque 4. Generación de la señal de referencia para la compensación de ineficiencias en la carga.....	108
5.5.1.	Compensación de las Componentes armónicas de la carga.....	108
5.5.2.	Compensación de energía reactiva consumida por la carga	108

5.5.3.	Potencia activa a inyectar en la red de distribución de energía	111
5.5.4.	Corriente de referencia para la generación y compensación	111
5.6.	Evaluación de la señal de error en la estimación de la señal real mediante el método propuesto.	112
5.6.1.1.	Caso 1: Rutina de tratamiento del error con una única estructura “KF-PLL”	114
5.6.1.2.	Caso 2: Rutina de tratamiento del error con filtros FIR y varias estructuras “KF-PLL”	117
CAPÍTULO 6	121
6.	RESULTADOS DE SIMULACIÓN.	121
6.1.	Simulación 1. Determinar el número de componentes armónicas en una señal desconocida.	122
6.1.1.	Señal de test, tensión de red	122
6.2.	Simulación 2. Obtención de la señal de referencia mediante el método presentado.	130
6.2.1.	Identificación de las componentes armónicas	131
6.2.1.1.	Evolución temporal de la intensidad en la carga y su estimación mediante al algoritmo “KF-PLL”	131
6.2.1.2.	Evolución temporal de la primera componente armónica de la intensidad en la carga (24,5 Hz) y su estimación mediante el algoritmo (KF-PLL)	134
6.2.1.3.	Evolución temporal de la cuarta componente armónica (171,5 Hz) de la intensidad en la carga y su estimación mediante el algoritmo “KF-PLL”	141
6.2.1.4.	Evolución temporal de la séptima componente armónica (346,5 Hz) de la intensidad en la carga y su estimación mediante el algoritmo de Kalman con Identificación	146
6.2.1.5.	Evolución temporal de la décima componente armónica (495 Hz) de la intensidad en la carga y su estimación mediante el algoritmo KF-PLL.....	151
6.2.2.	Obtención del armónico fundamental de tensión	156
6.2.3.	Generación de la referencia y evolución de la intensidad de red compensada	162
6.3.	Simulación 3. Obtención de la señal de referencia mediante el método propuesto. Señal de 11 componentes armónicas, dos estructuras de "KF-PLL".	165

6.3.1.	Introducción	165
6.3.2.	Detección del número de armónicos en la corriente en la carga	166
6.3.3.	Selección de los filtros FIR a emplear.....	166
6.3.4.	Evolución de las estructuras “KF-PLL”	174
6.3.4.1.	Estructura asociada al filtro Paso-Bajo	174
6.3.4.2.	Estructura asociada al filtro Paso-alto	179
6.3.5.	Generación de la referencia y evolución de la intensidad de red compensada	183
6.4.	Simulación 4. Obtención de la señal de referencia mediante el método propuesto. Señal de 11 componentes armónicas, tres estructuras de "KF-PLL".....	188
6.4.1.	Filtros FIR empleados	189
6.4.1.1.	Filtro paso-bajo.....	189
6.4.1.2.	Filtro pasa-banda 1	190
6.4.1.3.	Filtro pasa-banda 2	191
6.4.1.4.	Estructura “KF-PLL ” 1	192
6.4.1.5.	Estructura “KF-PLL” 2.....	196
6.4.1.6.	Estructura “KF-PLL” 3.....	199
6.4.1.7.	Unión de estructuras. Única salida y compensación de ineficiencias	201
6.5.	Comparativa y análisis de resultados.....	203
6.6.	Simulación 5. Carga no lineal.....	212
6.6.1.	Estructura Filtro FIR 1 y “KF-PLL”	216
6.6.2.	Estructura Filtro FIR 2 y “Filtro de Kalman”.....	218
6.6.3.	Estructura Filtro FIR 3 y “KF-PLL”	221
6.6.4.	Estructura Filtro FIR 4 y “Filtro de Kalman”.....	223
6.6.5.	Estructura Filtro FIR 5 y “Filtro de Kalman”.....	225
6.6.6.	Compensación global.....	227
6.6.7.	Sistema híbrido, generador-compensador	229
6.7.	Simulación 6. Funcionamiento adaptativo del método propuesto.	232
CAPÍTULO 7	235

7. CONCLUSIONES, APORTACIONES, LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO Y DIFUSIÓN DE RESULTADOS.....	235
7.1. Conclusiones	235
7.2. Aportaciones.....	237
7.3. Líneas de trabajo futuro.....	238
7.4. Resultados publicados de la tesis doctoral.....	238
REFERENCIAS.	239