

INDICE GENERAL

| | |
|---|----------|
| MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y SUMARIO DE LA TESIS DOCTORAL | 1 |
| Motivación..... | 1 |
| Objetivos..... | 3 |
| Sumario..... | 5 |
| 1. INTRODUCCIÓN A LA EFICIENCIA ENERGÉTICA. GENERACIÓN, RECEPTORES Y EQUIPOS DE MEJORA | 7 |
| 1.1. Definiciones de la Potencia Eléctrica. | 13 |
| 1.1.1. Definiciones de potencia propuestas por Budeanu (1927). | 15 |
| 1.1.2. Teoría de la potencia eléctrica de Fryze (1932). | 16 |
| 1.1.3. Definiciones recogidas en el Standard 100 de IEEE. | 18 |
| 1.1.4. Teoría p-q de Akagi. | 19 |
| 1.1.5. Teoría de la potencia del IEEE Std. 1459-2000. | 22 |
| 1.2. Causas y efectos de los desequilibrios en los sistemas eléctricos..... | 27 |
| 1.3. Causas y efectos de la distorsión en los sistemas eléctricos. | 29 |
| 1.4. Compensadores activos para sistemas trifásicos a cuatro hilos. | 31 |
| 1.4.1. Topologías de la etapa de potencia de un SAPC..... | 32 |
| 1.4.2. Técnicas para el control de corriente..... | 34 |
| 1.4.2.1. Controladores lineales. Estructuras básicas. | 36 |
| 1.4.2.1.1. Controlador PI con modulación por comparación con portadora triangular PWM. | 37 |
| 1.4.2.1.2. Control de corriente en coordenadas estacionarias α , β , 0. | 38 |
| 1.4.2.1.3. Control de corriente en coordenadas rotatorias d, q, 0. Transformada de Park. | 39 |
| 1.4.2.1.4. Controlador de corriente en espacio de estados..... | 41 |
| 1.4.2.2. Controladores de corriente on – off. Controlador de corriente por banda de histéresis | 43 |
| 1.4.3. Modulación vectorial SVPWM..... | 44 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1.4.3.1. | Modulación vectorial en el plano α - β (2D-SVM)..... | 44 |
| 1.4.3.1.1. | Modulación vectorial en coordenadas del sistema A, B, C..... | 51 |
| 1.4.3.1.2. | Distribución de los ciclos de trabajo..... | 53 |
| 1.4.3.2. | Modulador vectorial tridimensional 3D SVPWM..... | 58 |
| 1.5. | Conclusiones..... | 63 |
| 2. | ESTRATEGIAS DE COMPENSACIÓN PARA COMPENSADORES ACTIVOS PARALELO SAPC. SISTEMA PROPUESTO PARA LA COMPENSACIÓN SELECTIVA DE LOS FENÓMENOS NO EFICIENTES. | 67 |
| 2.1. | Estrategias de compensación global mediante SAPC..... | 69 |
| 2.1.1. | Método P-Q generalizado..... | 69 |
| 2.1.2. | Método del sistema de referencia síncrono modificado ($i_d - i_q$). | 72 |
| 2.1.3. | Estrategia de compensación UPF..... | 74 |
| 2.1.4. | Estrategia de compensación para absorción de corriente senoidal basada en la IEEE Std. 1459..... | 76 |
| 2.1.4.1. | Método de absorción senoidal basado en la tensión fundamental de secuencia directa según IEEE Std. 1459..... | 78 |
| 2.1.5. | Análisis de las estrategias de compensación global según IEEE Std. 1459-2000...82 | |
| 2.1.5.1. | Tensiones de alimentación ideales. Carga desequilibrada y distorsionada...83 | |
| 2.1.5.2. | Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas. Corrientes de carga senoidales y equilibradas..... | 86 |
| 2.1.5.3. | Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas. Corrientes de carga no senoidales y desequilibradas..... | 89 |
| 2.1.5.4. | Tensiones de alimentación y corrientes de carga no senoidales (5° y 7° armónico) y equilibradas..... | 92 |
| 2.1.5.5. | Tensiones de alimentación no senoidales (5° armónico) y equilibradas. Corrientes de carga no senoidales (7° armónico) y equilibradas..... | 95 |
| 2.1.5.6. | Tensiones de alimentación y corrientes de carga senoidales y desequilibradas..... | 98 |
| 2.2. | Compensación selectiva de fenómenos no eficientes..... | 101 |
| 2.2.1. | Método de compensación selectiva utilizando conductancias equivalentes..... | 101 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 2.2.1.1. | Análisis de la compensación selectiva mediante conductancias según IEEE Std. 1459-2000 | 103 |
| 2.2.1.1.1. | Tensiones de alimentación ideales. Carga resistiva desequilibrada..... | 104 |
| 2.2.1.1.2. | Tensiones de alimentación ideales. Carga desequilibrada y distorsionada..... | 108 |
| 2.2.1.1.3. | Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas. Corrientes de carga senoidales y equilibradas. | 110 |
| 2.2.1.1.4. | Tensiones de alimentación no senoidales (5º armónico) y equilibradas. Corrientes de carga no senoidales (7º armónico) y equilibradas. | 112 |
| 2.2.1.1.5. | Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas. Corrientes de carga senoidales y desequilibradas. | 114 |
| 2.2.2. | Método de compensación selectiva basado en la IEEE Std. 1459. | 116 |
| 2.2.2.1. | Análisis de la compensación selectiva basada en la IEEE Std. 1459..... | 122 |
| 2.2.2.1.1. | Tensiones de alimentación ideales. Carga resistiva desequilibrada..... | 122 |
| 2.2.2.1.2. | Tensiones de alimentación ideales. Carga desequilibrada y distorsionada..... | 124 |
| 2.2.2.1.3. | Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas. Corrientes de carga senoidales y equilibradas. | 126 |
| 2.2.2.1.4. | Tensiones de alimentación no senoidales (5º armónico) y equilibradas. Corrientes de carga no senoidales (7º armónico) y equilibradas. | 128 |
| 2.2.2.1.5. | Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas. Corrientes de carga senoidales y desequilibradas. | 130 |
| 2.3. | Conclusiones | 132 |
| 3. | ANÁLISIS DEL COMPENSADOR ACTIVO DE POTENCIA..... | 135 |
| 3.1. | Descripción de la etapa de potencia..... | 136 |
| 3.2. | Modelado de la etapa de potencia..... | 138 |
| 3.2.1. | Modelo en funciones de conmutación..... | 138 |
| 3.2.2. | Modelo promediado | 140 |
| 3.3. | Ecuaciones básicas de diseño de la etapa de potencia | 142 |
| 3.3.1. | Cálculo de la capacidad del bus dc..... | 142 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.3.2. | Cálculo de las inductancias del lado de alterna del SAPC. | 142 |
| 3.3.3. | Valor nominal de la tensión del bus DC..... | 144 |
| 3.4. | Descripción de la plataforma hardware implementada para el SAPC. | 146 |
| 3.5. | Sistema de control del SAPC..... | 150 |
| 3.5.1. | Método de obtención de las corrientes de referencia basado en la IEEE Std. 1459. | 151 |
| 3.5.1.1. | Método de la ventana deslizante..... | 154 |
| 3.6. | Diseño del regulador de corriente..... | 156 |
| 3.7. | Pérdidas en el SAPC. Control del bus dc. Diseño del lazo de tensión..... | 160 |
| 3.7.1. | Energía disipada en los semiconductores..... | 161 |
| 3.7.2. | Pérdidas en el bus dc y en el lado de alterna. | 161 |
| 3.7.3. | Potencias activas residuales. Mejora del compensador selectivo..... | 162 |
| 3.7.4. | Análisis y control del bus DC. | 165 |
| 3.8. | Desarrollo del modulador vectorial. | 172 |
| 3.8.1. | Modulador 3D-3B-SVPWM en coordenadas A-B-C..... | 173 |
| 3.8.2. | Modulador 3D-3B-SVPWM modificado. | 179 |
| 3.9. | Conclusiones | 184 |
| 4. | RESULTADOS DE SIMULACIÓN. | 185 |
| 4.1. | Técnicas de Simulación..... | 185 |
| 4.2. | Simulación mediante el modelo promediado del SAPC..... | 187 |
| 4.2.1. | Condiciones de alimentación. | 189 |
| 4.2.2. | Carga trifásica lineal desequilibrada. | 190 |
| 4.2.2.1. | Carga trifásica lineal desequilibrada resistiva..... | 190 |
| 4.2.3. | Carga trifásica lineal desequilibrada mixta. Compensación del desequilibrio y del desfase..... | 193 |
| 4.2.3.1. | Compensación del desequilibrio..... | 195 |
| 4.2.3.2. | Compensación del desfase..... | 197 |
| 4.2.3.3. | Compensación conjunta del desequilibrio y el desfase..... | 199 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2.4. | Carga trifásica no lineal..... | 201 |
| 4.2.4.1. | Compensación del desequilibrio..... | 202 |
| 4.2.4.2. | Compensación del desfase..... | 205 |
| 4.2.4.3. | Compensación conjunta del desequilibrio y el desfase..... | 206 |
| 4.2.4.4. | Compensación de la distorsión..... | 209 |
| 4.2.4.5. | Compensación conjunta del desequilibrio, el desfase y la distorsión..... | 211 |
| 4.2.5. | Otros casos significativos..... | 213 |
| 4.2.5.1. | Tensiones de alimentación no lineales..... | 213 |
| 4.2.5.2. | Tensiones de alimentación lineales con desfase y asimetría..... | 217 |
| 4.3. | Simulación del regulador de corriente..... | 221 |
| 4.4. | Simulación de la DFT de ventana deslizante..... | 224 |
| 4.5. | Simulación del sistema completo..... | 226 |
| 4.6. | Simulación del control del bus dc..... | 232 |
| 4.7. | Simulación del modulador vectorial 3D 3B SVPWM..... | 235 |
| 4.8. | Conclusiones..... | 240 |
| 5. | ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES..... | 241 |
| 5.1. | Tensiones de alimentación senoidales y equilibradas..... | 244 |
| 5.1.1. | Carga trifásica lineal desequilibrada..... | 245 |
| 5.1.1.1. | Compensación del desequilibrio..... | 247 |
| 5.1.2. | Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva..... | 249 |
| 5.1.2.1. | Compensación del desequilibrio..... | 251 |
| 5.1.2.2. | Compensación del desfase..... | 253 |
| 5.1.2.3. | Compensación conjunta del desequilibrio y el desfase..... | 255 |
| 5.1.3. | Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase..... | 257 |
| 5.1.3.1. | Compensación del desequilibrio..... | 259 |
| 5.1.3.2. | Compensación del desfase..... | 261 |
| 5.1.3.3. | Compensación conjunta del desequilibrio y el desfase..... | 263 |
| 5.1.3.4. | Compensación de la distorsión..... | 265 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.1.3.5. | Compensación conjunta del desequilibrio, el desfase y la distorsión. | 267 |
| 5.2. | Tensiones de alimentación senoidales y desequilibradas. | 269 |
| 5.2.1. | Carga trifásica lineal desequilibrada. | 270 |
| 5.2.1.1. | Compensación del desequilibrio. | 272 |
| 5.2.2. | Carga trifásica lineal desequilibrada con componente inductiva. | 274 |
| 5.2.2.1. | Compensación del desequilibrio. | 276 |
| 5.2.2.2. | Compensación del desfase. | 278 |
| 5.2.2.3. | Compensación conjunta del desequilibrio y el desfase. | 280 |
| 5.2.3. | Carga trifásica no lineal desequilibrada y con desfase. | 282 |
| 5.2.3.1. | Compensación del desequilibrio. | 284 |
| 5.2.3.2. | Compensación del desfase. | 286 |
| 5.2.3.3. | Compensación conjunta del desequilibrio y el desfase. | 288 |
| 5.2.3.4. | Compensación de la distorsión. | 290 |
| 5.2.3.5. | Compensación conjunta del desequilibrio, el desfase y la distorsión. | 292 |
| 5.3. | Tensión de salida del inversor, rizado de corriente y frecuencia de conmutación. | 294 |
| 5.4. | Conclusiones. | 297 |
| 6. | APORTACIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO. PUBLICACIÓN DE RESULTADOS. | 299 |
| 6.1. | Aportaciones. | 299 |
| 6.2. | Líneas de trabajo futuro. | 301 |
| 6.3. | Resultados publicados de la tesis doctoral. | 302 |
| 7. | REFERENCIAS. | 305 |