

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DISEÑO DE FILTROS PASIVOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

por

Julio Cesar Churio Barboza

Director: José María Maza Ortega

Sevilla, Noviembre de 2010

*Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y
la energía atómica: la voluntad.*

Albert Einstein

Índice General

1.	Introducción.....	1
1.1.	La calidad de suministro eléctrico	2
1.1.1.	Normativa UNE-EN-50160	3
1.1.2.	Limites IEEE	4
1.2.	Métodos clásicos de filtrado de armónicos: pasivos y activos	4
1.2.1.	Filtros pasivos.....	5
1.2.1.1.	Filtros pasivos serie.....	5
1.2.1.2.	Filtros de doble banda de paso	5
1.2.1.3.	Filtros amortiguados.....	6
1.2.1.4.	Filtros desintonizados o antirresonantes	6
1.2.2.	Filtros activos	6
1.3.	Diseño de filtros pasivos sintonizados	6
1.4.	Planteamiento del trabajo	7
1.4.1.	Esquema unifilar de referencia	8
2.	Diseño de un banco de filtros pasivos para un punto de operación.....	10
2.1.	Descripción del sistema eléctrico de referencia	10
2.1.1.	Circuito armónico equivalente.....	10
2.1.2.	Cálculo de las magnitudes eléctricas del circuito.....	11
2.2.	Los filtros pasivos y las resonancias: transmitancias frente a frecuencia.....	12
2.2.1.	Carga conectada a un sistema de potencia de cortocircuito infinita.....	13
2.2.2.	Carga conectada a un sistema de potencia de cortocircuito finita.....	13
2.3.	Planteamiento del problema de optimización.....	15
2.3.1.	Algoritmo de punto interior (14)	15
2.3.2.	Compensación con filtro pasivo o condensador	16
2.3.3.	Resonancias para un compensador pasivo	16
2.3.4.	Resonancias para un banco de compensadores pasivos	17
2.3.5.	Introducción de restricciones adicionales.....	18
2.3.5.1.	Introducción de resonancias ficticias	19
2.3.5.2.	Restricción de potencia reactiva en el armónico fundamental	20
2.3.6.	Representación gráfica del problema de optimización.....	21
2.3.7.	Problema de optimización	22
2.4.	Posibles funciones objetivo que pueden utilizarse	22
2.4.1.	Distorsión armónica de la tensión del sistema	22
2.4.2.	Distorsión armónica de la corriente del sistema.....	23
2.4.3.	Coste del compensador.....	23
2.4.4.	Valor eficaz de la intensidad del sistema.....	24
2.4.4.1.	Ecuaciones de la tensión y sus derivadas	25
2.5.	Programa Desarrollado	26
2.5.1.	Datos del sistema eléctrico	26
2.5.2.	Configuración de la herramienta de optimización.....	27
2.5.3.	Resultados gráficos.....	28
2.6.	Ejemplo de Aplicación	28
2.6.1.	Consideraciones generales.....	29

2.6.2.	Caso de Estudio I (filtro de quinto armónico)	31
2.6.3.	Caso de Estudio II (quinto y séptimo armónico)	31
2.6.4.	Caso de Estudio III (quinto, séptimo y decimoprimer armónico)	34
3.	Diseño de un banco de filtros pasivos con punto de operación variable: planteamiento determinista	36
3.1.	Descripción del sistema eléctrico de referencia	36
3.1.1.	Curvas de variación de la carga	36
3.2.	Modificación del algoritmo para incluir varios puntos de operación	37
3.2.1.	Funciones objetivo	38
3.2.1.1.	Distorsión armónica de la intensidad	38
3.2.1.2.	Distorsión armónica de la tensión	38
3.2.1.3.	Valor de la intensidad del sistema eléctrico industrial	39
3.2.2.	Restricciones debidas a la resonancia	39
3.2.3.	Restricciones adicionales	41
3.2.3.1.	Restricción de potencia reactiva para una curva de demanda	42
3.2.3.2.	Resonancias ficticias para una curva de demanda	42
3.3.	Ejemplo de aplicación	43
3.3.1.	Caso de Estudio I (5° Armónico)	43
3.3.2.	Caso de Estudio II (5° y 7° Armónico)	45
3.3.3.	Caso de Estudio III (5°, 7° y 11° Armónico)	52
4.	Diseño de un banco de filtros pasivos con punto de operación variable: planteamiento probabilístico	55
4.1.	Justificación de la utilización de un método probabilístico	55
4.2.	Planteamiento del problema	55
4.2.1.	Análisis de la red eléctrica industrial	56
4.2.2.	Variables probabilísticas	56
4.2.3.	Representación estadística mediante funciones lineales Gaussianas	57
4.2.3.1.	Justificación del modelo de Gaussianas mezcladas	57
4.2.3.2.	Datos proporcionados por la empresa eléctrica	58
4.2.3.3.	Modelo de Gaussianas mezcladas	58
4.2.3.4.	Estimación de parámetros de GM utilizando el algoritmo EM	59
4.2.3.5.	Reducción de componentes de Gaussianas	60
4.2.3.6.	Ejemplo de aplicación del método y resultados de los datos	61
4.2.4.	Aproximación lineal y modelo de programación de probabilidad restringida	64
4.2.4.1.	Aproximación lineal para las funciones de variables aleatorias	64
4.2.4.2.	Modelo de programación de probabilidad restringida	64
4.2.5.	Planteamiento del problema de optimización	67
4.2.5.1.	Funciones objetivo	67
4.2.5.2.	Restricciones probabilísticas	68
4.2.5.2.1.	Inyección individual y total de armónicos de corriente	68
4.2.5.2.2.	Límite de la tensión sobre el condensador del filtro	71
4.2.5.2.3.	Límite de corriente rms fluyendo por el filtro	72
4.2.5.3.	Restricciones determinísticas	74
4.2.5.3.1.	Potencia reactiva al armónico fundamental	74
4.2.5.3.2.	Armónico de sintonización de los filtros	75
4.2.5.3.3.	Restricciones debidas a la resonancia	75
4.2.5.3.4.	Restricciones adicionales	76
4.2.5.3.5.	Problema de optimización completo	76
4.3.	Ejemplo de aplicación	77

4.3.1.	Resolución del problema probabilísticamente.....	78
4.3.2.	Comparación con el caso determinista	80
5.	Conclusiones y futuros desarrollos.....	83
5.1.	Conclusiones.....	83
5.2.	Futuros desarrollos	84

Índice de Figuras

Figura 1 Filtro pasivo serie.....	5
Figura 2 Representación armónica de un sistema eléctrico.....	7
Figura 3 Representación armónica de un sistema eléctrico con compensación pasiva....	7
Figura 4 (a) Unifilar sin compensador. (b) Unifilar con compensador	9
Figura 5 Circuito equivalente para el método determinístico de un punto de operación	11
Figura 6 Función objetivo en función del valor del condensador	14
Figura 7 Fundamento de los métodos de punto interior de barrera logarítmica.....	16
Figura 8 Regiones factibles limitadas por las resonancias del sistema con el compensador.....	18
Figura 9 Punto de diseño y resonancia. (a) Punto de diseño en el plano Cs-Ci. (b) Impedancia equivalente desde la carga	20
Figura 10 Región factible para la restricción de las resonancias ficticias	20
Figura 11 Restricción de potencia reactiva en el armónico fundamental.....	21
Figura 12 Restricciones del problema de optimización	21
Figura 13 Definición de los parámetros constantes de la función de coste.....	24
Figura 14 Descomposición ortogonal de la intensidad sobre la tensión.....	25
Figura 15 Pantalla del GUI 1. Introducción de los datos del sistema eléctrico industrial.	27
Figura 16 Pantalla del GUI 2. Configuración del problema de optimización.	28
Figura 17 Pantalla del GUI 3. Resultados gráficos.	28
Figura 18 Esquema unifilar de la red a estudiar.	30
Figura 19 THD de la intensidad frente al valor de los condensadores.	32
Figura 20 Curvas de nivel del THD de la intensidad frente al valor de los condensadores.....	32
Figura 21 Curvas de nivel del THD de la tensión frente al valor de los condensadores.	33
Figura 22 Curvas de nivel del coste del banco de filtros frente al valor de los condensadores.....	33
Figura 23 Curvas de nivel del valor eficaz de la intensidad frente al valor de los condensadores.....	33
Figura 24 Localización de los mínimos globales para las cuatro funciones objetivos en referencia a las restricciones.....	34
Figura 25 Representación de la impedancia vista desde la carga con respecto a la frecuencia.	35
Figura 26 Representación de la impedancia vista desde la carga con respecto a la frecuencia.	35
Figura 27 Curva de potencia aparente demandada diariamente por la carga	37
Figura 28 Curva de factor de potencia diario de la carga.....	37
Figura 29 Hiperplanos de resonancia de la carga con el compensador para un perfil de carga diario dado	40
Figura 30 Restricciones para hiperplanos de pendiente negativa.....	41
Figura 31 Restricciones para hiperplanos de pendiente positiva.....	41
Figura 32 Restricciones para el diseño de un banco de filtros para una curva de carga	43

Figura 33 Impedancia vista desde la carga para un filtro optimizado para el valor eficaz de la intensidad	44
Figura 34 Impedancia vista desde la carga para un filtro optimizado para el coste	44
Figura 35 Impedancia vista desde la carga para un filtro optimizado para el THD de la intensidad.....	45
Figura 36 Impedancia vista desde la carga para un filtro optimizado para el THD de la tensión.....	45
Figura 37 Curvas de nivel del valor eficaz de la intensidad frente al valor de los condensadores.....	46
Figura 38 Impedancia vista desde la carga para el banco de filtros optimizando el valor eficaz de la intensidad.....	46
Figura 39 Representación en 3D de la función objetivo del valor eficaz de la intensidad	47
Figura 40 Curvas de nivel del coste al valor de los condensadores	47
Figura 41 Impedancia vista desde la carga para el banco de filtros optimizando el coste del banco de filtros	48
Figura 42 Representación en 3D de la función objetivo del coste del banco de filtros..	48
Figura 43 Curvas del THD de la intensidad frente al valor de los condensadores.....	49
Figura 44 Impedancia vista desde la carga para el banco de filtros optimizando el THD de la intensidad	49
Figura 45 Representación en 3D de la función objetivo del THD de la intensidad	50
Figura 46 Curvas del THD de la tensión frente al valor de los condensadores.....	50
Figura 47 Impedancia vista desde la carga para el banco de filtros optimizando el THD de la tensión.....	51
Figura 48 Representación en 3D de la función objetivo del THD de la tensión	51
Figura 49 Comportamiento de la intensidad para el perfil de carga dado.....	52
Figura 50 Localización de los mínimos globales de las cuatro funciones objetivo	52
Figura 51 Impedancia vista desde la carga para el banco de filtros optimizando el valor eficaz de la intensidad.....	53
Figura 52 Impedancia vista desde la carga para el banco de filtros optimizando el coste del banco de filtros	53
Figura 53 Impedancia vista desde la carga para el banco de filtros optimizando el THD de la intensidad	54
Figura 54 Impedancia vista desde la carga para el banco de filtros optimizando el THD de la tensión.....	54
Figura 55 Circuito equivalente de la red para el análisis probabilístico.....	56
Figura 56 Aproximación de la densidad de probabilidad por gaussianas mezcladas....	59
Figura 57 Aproximación mediante GM para la resistencia de la carga.....	61
Figura 58 Aproximación mediante GM para la distorsión armónica de corriente del quinto armónico.....	61
Figura 59 Aproximación mediante GM para la distorsión armónica de corriente del armónico 21	63
Figura 60 Aplicación de límites a la inyección probabilística de corriente armónica....	65
Figura 61 Estimación de la corriente armónica probabilística en un rango de intervalo de confianza.....	65
Figura 62 Ilustración de la relación entre la restricción probabilística y la de probabilidad restringida.....	66
Figura 63 Diagrama unifilar del sistema de potencia bajo estudio.....	78
Figura 64 Localización de los mínimos globales de las funciones con respecto a las restricciones determinísticas.....	79

Figura 65 Intensidad para un año de la subestación aplicando el filtro determinista.....	81
Figura 66 Curva del día de máxima demanda del año aplicando el filtro determinista .	81
Figura 67 Intensidad para un año de la subestación aplicando el filtro probabilista.....	82
Figura 68 Curva del día de máxima demanda del año aplicando el filtro probabilista ..	82

Índice de Tablas

Tabla 1 Límites de armónicos de tensión según UNE-EN-50160.....	4
Tabla 2 ANSI/IEEE 519 Límites de distorsión de tensión (18).	4
Tabla 3 Correspondencia entre las secuencias y el orden de armónicos	10
Tabla 4 Parámetros del diagrama unifilar de la red a estudiar.	29
Tabla 5 Contenido de Armónico en la carga no lineal.	30
Tabla 6 Resultados de optimización al instalar un filtro pasivo al 5º armónico.....	31
Tabla 7 Resultados de optimización al instalar dos filtros pasivos al 5º y 7º armónico. 32	
Tabla 8 Resultados de optimización al instalar un banco de filtros pasivos sintonizados al 5º, 7º y 11º armónico	34
Tabla 9 Resultados de la optimización de un filtro pasivo para una instalación dado un perfil de carga	43
Tabla 10 Resultados de la optimización de un banco de filtros pasivos para una curva de carga dada.....	45
Tabla 11 Resultados de la optimización de un banco de filtros pasivos para una curva de carga dada.....	53
Tabla 12 Resultados de la aplicación del algoritmo EM a los datos de las variables probabilísticas.....	62
Tabla 13 Límites de armónicos individuales utilizados para el algoritmo	77
Tabla 14 Resultados de la optimización para un banco de dos filtros pasivos sintonizados al 5º y 7º armónico.....	78
Tabla 15 Resultado para armónicos individuales, intensidad fundamental y factor de potencia.....	79
Tabla 16 Resultados de la Simulación Monte Carlo para los filtros diseñados con el algoritmo probabilístico.....	80
Tabla 17 Resultados de la simulación Monte Carlo para los filtros diseñados con el algoritmo determinístico.....	80