



**TÉCNICAS DE CONTROL ROBUSTO BASADO
EN MODELO DE REFERENCIA APLICADAS A
SISTEMAS MODULARES DE
ALIMENTACIÓN.**

TESIS DOCTORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

AUTOR: MARCOS PASCUAL MOLTÓ.

DIRECTOR: GABRIEL GARCERÁ SANFELIU.

OCTUBRE 2007.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción y estado de la técnica

1.1. Introducción.....	3
1.2. Linealización de una etapa de potencia PWM. Circuito de pequeña señal de un convertidor conmutado y de un inversor.....	7
1.2.1. Modelo del conmutador PWM.....	9
1.2.1.1. Modelo del conmutador PWM en conducción continua.....	12
1.2.1.2. Modelo del conmutador PWM en conducción discontinua.....	13
1.3. Desarrollo teórico del control modo corriente media de convertidores conmutados e inversores.....	14
1.3.1. Modelo de pequeña señal del control ACC.....	16
1.3.2. Modelo ACC del convertidor Buck en conducción continua.....	19
1.3.3. Modelo ACC del convertidor Buck en conducción discontinua.....	22
1.3.4. Modelo ACC de un inversor monofásico con modulación PWM unipolar.....	23
1.4. Sistemas modulares de alimentación.....	25
1.4.1. Modelo de pequeña señal de un sistema DC-DC modular basado en convertidores Buck en paralelo. Circuito PSPICE para análisis de Montecarlo.....	27
1.4.2. Modelo de pequeña señal de un sistema DC-AC modular basado en paralelización de inversores. Circuito PSPICE para análisis de Montecarlo.....	32

Capítulo 2. Problemática del control modo corriente media de sistemas modulares de alimentación DC-DC y DC-AC.

2.1. Introducción.....	37
2.2. Características dinámicas del sistema DC-DC modular nominal.....	37
2.2.1. Descripción de la etapa de potencia.....	37
2.2.2. Descripción de la etapa de control ACC convencional.....	39
2.2.3. Ganancia de lazo. Frecuencia de cruce y márgenes de estabilidad.....	40
2.2.4. Características dinámicas en lazo cerrado del sistema DC-DC modular nominal.....	43
2.2.4.1. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado.....	43
2.2.4.2. Impedancia de salida en lazo cerrado.....	43
2.2.5. Notas sobre la variación del número de módulos en un sistema DC-DC modular.....	45
2.2.6. Simulación en gran señal del sistema DC-DC modular.....	50
2.2.6.1. Escalón en la tensión de entrada.....	51
2.2.6.2. Escalón en la carga.....	51
2.2.6.3. Conexión-desconexión de módulos.....	52
2.3. Características dinámicas del sistema DC-AC modular nominal.....	53
2.3.1. Descripción de la etapa de potencia.....	53
2.3.2. Descripción de la etapa de control modo corriente convencional.....	54
2.3.3. Ganancia de lazo. Frecuencia de cruce y márgenes de estabilidad.....	55

2.3.4. Características dinámicas en lazo cerrado del inversor nominal.....	59
2.3.4.1. Ancho de banda en lazo cerrado.	59
2.3.4.2. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado	59
2.3.4.3. Impedancia de salida en lazo cerrado	59
2.3.5. Notas sobre la variación del número de módulos en un sistema DC-AC modular	61
2.3.6. Notas sobre el efecto de la variación de la tensión de salida V_o	64
2.3.7. Notas sobre la impedancia de salida en lazo cerrado con carga no lineal.....	64
2.3.8. Simulación en gran señal del sistema DC-AC modular nominal	65
2.3.8.1. Escalón en la tensión de referencia senoidal	66
2.3.8.2. Escalón en la tensión de entrada.....	66
2.3.8.3. Escalón de carga resistiva	69
2.3.8.4. Carga no-lineal	69
2.3.8.5. Conexión-desconexión de módulos	71
2.4. Análisis de Montecarlo del sistema DC-DC modular. Prestaciones dinámicas ante cambios en la etapa de potencia	72
2.4.1. Descripción de las variaciones de la etapa de potencia (N, R, V_i , L, C...) del sistema DC-DC modular	72
2.4.2. Análisis de Montecarlo de las funciones de transferencia más importantes.....	73
2.4.2.1. Función de transferencia de la etapa de potencia VOC(s).....	73
2.4.2.2. Ganancia de lazo $T_v(s)$	74
2.4.2.3. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado $A_{ci}(s)$	74
2.4.2.4. Impedancia de salida en lazo cerrado $Z_{oci}(s)$	75
2.5. Análisis de Montecarlo del sistema DC-AC modular. Prestaciones dinámicas ante cambios en la etapa de potencia.	76
2.5.1. Descripción de las variaciones de la etapa de potencia (N, R, V_i , L, C, V_o ...) del sistema DC-AC modular	76
2.5.2. Análisis de Montecarlo de las funciones de transferencia más importantes.....	77
2.5.2.1. Función de transferencia de la etapa de potencia VOC(s).....	77
2.5.2.2. Ganancia de lazo $T_v(s)$	77
2.5.2.3. Función de transferencia en lazo cerrado VOR(s)	79
2.5.2.4. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado $A_{ci}(s)$	79
2.5.2.5. Impedancia de salida en lazo cerrado $Z_{oci}(s)$	81
2.6. Conclusiones sobre el control convencional de sistemas modulares de alimentación.....	81

Capítulo 3. Objetivos de la tesis

85

Capítulo 4. Desarrollo del control modo corriente robusto con seguimiento de modelo (RMF) tipo paso alto para el control de convertidores DC-DC modulares.

4.1. Introducción.....	89
------------------------	----

4.2. Diagrama de bloques completo del control modo corriente robusto con seguimiento de modelo tipo paso alto para el control de convertidores DC-DC modulares.....	89
4.3. Descripción del lazo RMF basado en modelo de referencia paso-alto.....	90
4.3.1. Lazo robusto interno: $T_{int}(s)$	91
4.3.2. Función de transferencia “vista” por el regulador de tensión: $VOU(s)$	92
4.3.3. Condición de robustez: Elección de $VOC_{ref}(s)$ y diseño del lazo $T_{int}(s)$	93
4.3.4. Consideraciones relativas al ruido de conmutación en el diseño del lazo $T_{int}(s)$	96
4.3.5. Diseño del regulador de tensión $G_v(s)$	96
4.3.6. Regulador de tensión equivalente $G_{v,eq}(s)$ y lazo de tensión equivalente $T_{v,eq}(s)$	97
4.3.7. Mejora del rechazo a perturbaciones.....	98
4.4. Implementación del control RMF paso-alto en un sistema DC-DC modular Buck.....	99
4.4.1. Etapa de potencia nominal.....	100
4.4.2. Diseño de los controladores auxiliares.....	101
4.4.3. Ganancia de lazo equivalente. Frecuencia de cruce y márgenes de estabilidad.....	104
4.4.4. Estudio de las prestaciones dinámicas obtenidas con control RMF paso-alto.....	106
4.4.4.1. Características dinámicas en lazo cerrado del sistema DC-DC con control RMF paso-alto.....	106
4.4.4.1.1. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado.....	106
4.4.4.1.2. Impedancia de salida en lazo cerrado.....	106
4.4.4.2. Simulación en gran señal del sistema DC-DC modular con control RMF paso-alto.....	109
4.4.4.2.1. Escalón en la tensión de entrada.....	109
4.4.4.2.2. Escalón en la carga.....	110
4.4.4.2.3. Conexión-desconexión de módulos.....	110
4.5. Análisis de Montecarlo de las funciones de transferencia más importantes.....	112
4.5.1. Función de transferencia de la etapa de potencia modificada $VOU(s)$	112
4.5.2. Ganancia de lazo $T_v(s)$	112
4.5.3. Ganancia de lazo equivalente $T_{v,eq}(s)$	114
4.5.4. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado $A_{cl}(s)$	114
4.5.5. Impedancia de salida en lazo cerrado $Z_{ocl}(s)$	114
4.6. Conclusiones sobre el control RMF paso-alto.....	116

Capítulo 5. Desarrollo del control modo corriente robusto con seguimiento de modelo (RMF) tipo paso bajo para el control de convertidores DC-DC modulares.

5.1. Introducción.....	121
5.2. Diagrama de bloques completo del control modo corriente robusto con seguimiento de modelo tipo paso bajo para el control de convertidores DC-DC modulares.....	122
5.3. Descripción del lazo RMF basado en modelo de referencia paso-bajo.....	123
5.3.1. Lazo interno $T_{int}(s)$ y lazo de referencia $T_{ref}(s)$	123
5.3.2. Función de transferencia “vista” por el regulador de tensión: $VOU(s)$	124
5.3.3. Diseño del lazo $T_{int}(s)$ y elección de $VOC_{ref}(s)$	124
5.3.4. Diseño del regulador de tensión $G_v(s)$	126

5.3.5. Regulador de tensión equivalente $G_{v,eq}(s)$ y lazo de tensión equivalente $T_{v,eq}(s)$	127
5.3.6. Mejora del rechazo a perturbaciones	128
5.3.7. Procedimiento de diseño del control RMF paso-bajo.....	129
5.4. Implementación del control RMF paso-bajo en un sistema DC-DC modular Buck	130
5.4.1. Etapa de potencia nominal.....	130
5.4.2. Diseño de los controladores auxiliares.....	131
5.4.3. Ganancia de lazo equivalente. Frecuencia de cruce y márgenes de estabilidad.....	133
5.4.4. Estudio de las prestaciones dinámicas obtenidas con control RMF paso-bajo	135
5.4.4.1. Características dinámicas en lazo cerrado del sistema DC-DC con control RMF paso-bajo	135
5.4.4.1.1. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado.....	135
5.4.4.1.2. Impedancia de salida en lazo cerrado	136
5.4.4.2. Simulación en gran señal del sistema DC-DC modular con control RMF paso-bajo.....	139
5.4.4.2.1. Escalón en la tensión de entrada	139
5.4.4.2.2. Escalón en la carga	139
5.4.4.2.3. Conexión-desconexión de módulos.....	141
5.5. Análisis de Montecarlo de las funciones de transferencia más importantes	142
5.5.1. Función de transferencia de la etapa de potencia modificada VOU(s).....	142
5.5.2. Ganancia del lazo externo $T_v(s)$	142
5.5.3. Ganancia del lazo equivalente $T_{v,eq}(s)$	144
5.5.4. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado $A_{ci}(s)$	144
5.5.5. Impedancia de salida en lazo cerrado $Z_{oci}(s)$	146
5.6. Conclusiones sobre el control RMF paso-bajo	146
5.7. Comparativa RMF paso-alto vs. RMF paso-bajo.....	147

Capítulo 6. Desarrollo del control modo corriente RMF paso-bajo para el control de inversores modulares.

6.1. Introducción.....	151
6.2. Diagrama de bloques completo del control modo corriente robusto con seguimiento de modelo tipo paso bajo para el control de convertidores DC-AC modulares	152
6.3. Descripción del lazo RMF basado en modelo de referencia paso-bajo	154
6.3.1. Lazo interno $T_{int}(s)$ y lazo de referencia $T_{ref}(s)$	154
6.3.2. Función de transferencia “vista” por el regulador externo	155
6.3.3. Diseño del regulador externo $G(s)$	155
6.3.4. Regulador equivalente $G_{eq}(s)$ y lazo equivalente $T_{eq}(s)$	156
6.3.5. Procedimiento de diseño del control RMF paso-bajo.....	157
6.3.6. Mejora del rechazo a perturbaciones.....	160
6.4. Implementación del control RMF paso-bajo en un sistema DC-AC modular.....	161
6.4.1. Etapa de potencia nominal.....	162
6.4.2. Diseño de los controladores	162

6.4.3. Ganancias de lazo equivalentes. Frecuencias de cruce y márgenes de estabilidad.....	167
6.4.4. Estudio de las prestaciones dinámicas obtenidas con control RMF paso-bajo	171
6.4.4.1. Características dinámicas en lazo cerrado del sistema DC-AC con control RMF paso-bajo	171
6.4.4.1.1. Ancho de banda en lazo cerrado.....	171
6.4.4.1.2. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado.....	171
6.4.4.1.3. Impedancia de salida en lazo cerrado	172
6.4.4.2. Simulación en gran señal del sistema DC-DC modular con control RMF paso-alto	175
6.4.4.2.1. Escalón en la tensión de referencia	175
6.4.4.2.2. Escalón en la tensión de entrada	177
6.4.4.2.3. Escalón en la carga	177
6.4.4.2.4. Carga no-lineal.....	177
6.4.4.2.5. Conexión-desconexión de módulos	180
6.5. Análisis de Montecarlo de las funciones de transferencia más importantes	182
6.5.1. Función de transferencia de la etapa de potencia VOC(s).....	182
6.5.2. Ganancias de lazo externas $T_{ext,i}(s)$ y $T_{ext,v}(s)$	183
6.5.3. Ganancias de lazo equivalentes $T_{eq,i}(s)$ y $T_{eq,v}(s)$	184
6.5.4. Función de transferencia en lazo cerrado VOR(s)	184
6.5.5. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado $A_{cl}(s)$	186
6.5.6. Impedancia de salida en lazo cerrado $Z_{ocl}(s)$	186
6.6. Conclusiones sobre el control RMF paso-bajo	188

Capítulo 7. Materiales empleados

7.1. Software.....	193
7.2. Material de laboratorio	193
7.3. Prototipos experimentales.....	194

Capítulo 8. Resultados experimentales

8.1. Introducción.....	215
8.2. Sistema modular DC-DC con control RMF paso-alto.....	215
8.2.1. Consideraciones previas.....	215
8.2.2. Ganancias de lazo $T_v(s)$ y $T_{v,RMF}(s)$	217
8.2.2.1. Conducción continua (CCM)	218
8.2.2.2. Conducción discontinua (DCM)	218
8.2.3. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado $A_{cl}(s)$ y $A_{cl,RMF}(s)$	222
8.2.4. Impedancia de salida en lazo cerrado $Z_{ocl}(s)$ y $Z_{ocl,RMF}(s)$	224
8.2.5. Escalones de carga.....	224
8.3. Sistema modular DC-DC con control RMF paso-bajo	227

8.3.1. Consideraciones previas.....	227
8.3.2. Ganancias de lazo $T_v(s)$ y $T_{v,RMF}(s)$	228
8.3.2.1. Conducción continua (CCM)	228
8.3.2.2. Conducción discontinua (DCM)	231
8.3.3. Audiosusceptibilidad en lazo cerrado $A_{cl}(s)$ y $A_{cl,RMF}(s)$	231
8.3.4. Impedancia de salida en lazo cerrado $Z_{ocl}(s)$ y $Z_{ocl,RMF}(s)$	234
8.3.5. Escalones de carga.....	237
8.4. Sistema modular DC-AC con control RMF paso-bajo.....	239
8.4.1. Consideraciones previas.....	239
8.4.2. Escalones de carga.....	242
8.4.3. Carga no lineal.....	244
8.4.4. Seguimiento de la señal de referencia de corriente.....	247
Capítulo 9. Conclusiones y futuras líneas de investigación	
9.1. Conclusiones	251
9.2. Futuras líneas de investigación	256
Referencias	259
Publicaciones derivadas de la tesis	263