

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Programa de Doctorado:
AUTOMATIZACIÓN AVANZADA Y ROBÓTICA

Tesis Doctoral

**ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA SISTEMAS
BILINEALES APLICADAS A LOS CONVERTIDORES
DE POTENCIA DC-DC.**

Mauricio García Esteban.

Director: Hebertt Sira-Ramírez

Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales.

marzo del 2000



Calificació: Excel·lent

Dr. Enric Fossas Colet

Dr. Robert Griñó Cusero

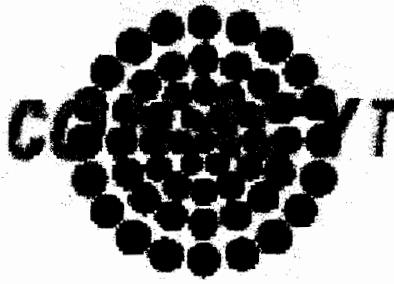
Dr. Romeo Ortega

Dr. Luis Martínez Salameo

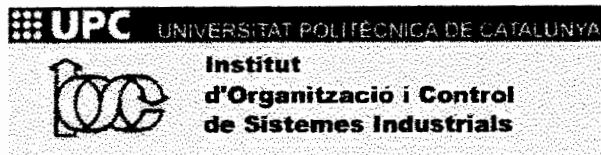
Dr. Francisco Guinjoan Gispert

Barcelona, 16 de marzo de 2001

Aquesta tesi ha estat enregistrada
amb el núm. 669



*Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología.
México*



Barcelona, España.



**UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES**

Mérida Venezuela



*Centro de Instrumentos.
Universidad Nacional Autónoma de México.*



*Instituto Tecnológico Autónomo
de México.*

A mis Padres, a quienes corresponde este triunfo.
A mi Esposa, Veronica Gabriela, y a mis hijos *Montserrat y*
***Fernando Miguel* por brindarme su apoyo,**
comprensión y estímulo.

Agradecimiento.

Es mi deseo hacer llegar mis más sinceras palabras de reconocimiento y gratitud al Prof. *Dr. Hebertt Sira Ramírez* por su valiosa ayuda como asesor en la elaboración de este proyecto.

El eterno agradecimiento al CONACYT, al Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales, de la UPC, a la Universidad de los Andes, en Venezuela, al Centro de Instrumentos, de la UNAM y al Instituto Tecnológico Autónomo de México, por haberme permitido el uso de sus instalaciones y equipo, así como la asesoría proporcionada para la realización de este trabajo.

A todas aquellas personas, que de alguna u otra manera, contribuyeron a la feliz culminación de este trabajo,

A Todos Gracias !

Contenido

| | | |
|------------|---|-----------|
| I | Introducción. | 1 |
| 1 | Planteamiento. | 3 |
| 2 | Objetivo. | 6 |
| 3 | Contenido de la tesis. | 6 |
| II | Modelos Promedios Euler–Lagrange de los Convertidores DC–DC. | 9 |
| 1 | Generalidades respecto a los Circuitos de Euler-Lagrange. | 10 |
| 2 | Convertidor “Boost”. | 10 |
| 2.1 | Modelo Regulado por Conmutación. | 11 |
| | Política de Control PWM | 12 |
| 2.2 | Formulación de Lagrange, Modelo Promedio PWM. | 12 |
| 2.3 | Realización del Modelo Promedio Ideal PWM. | 16 |
| 2.4 | Algunos Puntos Relevantes. | 17 |
| 3 | Convertidor “Buck–Boost”. | 20 |
| 3.1 | Modelo Regulado mediante Conmutación. | 20 |
| 3.2 | Formulación de Lagrange, Modelo Promedio PWM. | 21 |
| 3.3 | Algunos Puntos Relevantes. | 23 |
| 4 | Convertidor “Buck”. | 24 |
| III | Regulación Dinámica Adaptativa Controlando la Fase No–mínima en Convertidores DC-DC. | 29 |
| 1 | Regulación de Sistemas Inciertos de Fase No–mínima vía una Compensación Dinámica, Inestable a tramos. | 30 |
| 1.1 | Diseño de Compensadores Inestables No–lineales. | 31 |
| 1.2 | Estrategia de Reinicios para la Compensación Dinámica. | 34 |
| 1.3 | Adaptación Retroalimentada en Sistemas de Fase No–mínima. | 36 |
| 2 | Adaptación Dinámica, estabilizante, inestable a tramos en Convertidores DC–DC. | 39 |
| 2.1 | Circuito Convertidor “Boost” | 39 |
| 2.2 | Convertidor “Buck–Boost”. | 46 |
| IV | Adaptación Dinámica vía PWM en convertidores de potencia DC–DC, Método Backstepping | 51 |
| 1 | Linealización entrada-salida para convertidores de potencia DC–DC | 52 |
| 2 | Circuito Boost | 53 |

| | | |
|---|--|------------|
| 3 | Estrategia de Control retroalimentado adaptativo para la regulación Indirecta de la Salida de Voltaje en Convertidores DC-DC | 57 |
| 3.1 | Circuito Convertidor Boost | 57 |
| 3.2 | Resumen de las expresiones del controlador adaptativo | 62 |
| 3.3 | Convertidor buck-boost | 65 |
| 3.4 | Resumen de expresiones | 66 |
| V Metodología de Diseño en Base a Pasividad para Convertidores de Potencia DC-DC. | | 71 |
| 1 | Controladores en Base a Pasividad para Convertidores DC-DC. | 71 |
| 1.1 | Circuito "Boost". | 72 |
| | Regulación Directa del Voltaje de Salida. | 72 |
| | Regulación Indirecta del Voltaje de Salida. | 74 |
| | Algunos Puntos Relevantes. | 75 |
| 1.2 | Convertidor "Buck-Boost". | 78 |
| 1.3 | Convertidor "Buck". | 81 |
| 2 | Controladores Adaptativos en base a Pasividad para Convertidores DC-DC. | 83 |
| 2.1 | Convertidor "Boost". | 84 |
| 2.2 | Convertidor "Buck-Boost". | 88 |
| 2.3 | Convertidor "Buck". | 90 |
| 3 | Circuito Convertidor Boost en Cascada | 92 |
| 3.1 | Diseño del Control Adaptativo. | 95 |
| VI Discretización Exacta y Diseño de Controladores para Convertidores de Potencia DC-DC Derivados. | | 101 |
| 1 | Controladores mediante un Esquema de Discretización Exacta vía PWM. | 101 |
| 1.1 | Convertidor "Buck-Derivado". | 102 |
| | Discretización Exacta. | 103 |
| | Política de Control Estabilizante PWM. | 106 |
| 1.2 | Convertidor "Boost-Derivado". | 108 |
| | Discretización Exacta | 109 |
| | Política de Control Estabilizante Implícita PWM. | 111 |
| 1.3 | Circuito "Buck-Boost-Derivado". | 115 |
| 2 | Controladores vía Modulación de Frecuencia de Pulsos. | 118 |
| 2.1 | Convertidor "Buck-Derivado". | 119 |
| | Discretización Exacta. | 120 |
| | Una Política de Control PFM. | 123 |
| 2.2 | Convertidor "Boost-Derivado". | 126 |
| | Discretización Exacta | 127 |
| | Política de Control Estabilizante | 129 |
| 2.3 | Convertidor "Buck-Boost-Derivado". | 131 |
| 3 | Seguimiento de Señales vía Modelo Promedio en Tiempo Discreto. | 135 |
| 3.1 | Convertidor "Buck-Derivado". | 136 |

| | | |
|-----|---|------------|
| | Seguimiento de la Corriente Promedio de Entrada . . | 138 |
| 3.2 | Convertidor "Boost-Derivado". | 140 |
| | Seguimiento de la Corriente Promedio de Entrada . . | 140 |
| 3.3 | Convertidor "Buck-Boost-derivado". | 142 |
| | Discusión y Conclusiones. | 145 |
| | Apéndice. Bibliografía. | |

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Circuito: Boost, Buck-Boost, Buck | 7 |
| 2.1 | Circuito Convertidor "Boost" | 11 |
| 2.2 | Función de Posición del Interruptor mediante una Política PWM. | 12 |
| 2.3 | Circuito Convertidor "Boost" ($u = 1$). | 13 |
| 2.4 | Circuito Convertidor "Boost" ($u = 0$). | 13 |
| 2.5 | Circuito Equivalente del Modelo Promedio PWM del Convertidor "Boost". | 16 |
| 2.6 | Transformador Ideal que Representa la Función Promedio PWM de Po- sición del Interruptor. | 17 |
| 2.7 | Dinámica de los Ceros del Convertidor "Boost", al Tomar Como Salida al Voltaje Promedio. | 18 |
| 2.8 | Dinámica de los Ceros del Convertidor "Boost", al Tomar Como Salida a la Corriente Promedio. | 19 |
| 2.9 | Circuito Convertidor "Buck-Boost" | 21 |
| 2.10 | Circuito Equivalente del Modelo Promedio PWM del Convertidor "Buck- Boost" | 23 |
| 2.11 | Circuito Convertidor "Buck". | 25 |
| 2.12 | Circuito Equivalente del Modelo Promedio PWM del Convertidor "Buck". | 26 |
| 3.1 | Diagrama de Fase local para una posible dinámica de los ceros de primer orden inestable. | 34 |
| 3.2 | Circuito Convertidor "Boost" | 39 |
| 3.3 | Esquema de Control retroalimentado PWM, adaptativo, dinámico, in- estable para convertidores DC-DC. | 44 |
| 3.4 | Trayectorias del estado controladas adaptativas no-lineales, reinicios de la entrada de la razón de trabajo inestable, y perturbación estocástica externa, para el ejemplo del convertidor "boost". | 45 |
| 3.5 | Convertidor "Buck-Boost" | 46 |
| 3.6 | Trayectorias del estado controladas adaptativas no-lineales, y reinicios de la entrada de la razón, de trabajo inestable, perturbación estocástica externa, para el ejemplo del convertidor "Buck-boost" | 50 |
| 4.1 | Esquema de Linealización entrada-salida. | 53 |
| 4.2 | Circuito Convertidor "Boost" | 54 |
| 4.3 | Convertidor "Boost", promedio. | 57 |
| 4.4 | Resultado de las Simulaciones, Trayectorias Adaptativas de los Estado. . | 64 |
| 4.5 | Circuito Convertidor "Buck-Boost" | 65 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.6 | Resultados de la Simulación en el Circuito "Buck-Boost". | 68 |
| 5.1 | Esquema de Control Retroalimentado PWM, en Base a Pasividad, para la Regulación Indirecta del Voltaje de Salida en Convertidores de Potencia DC-DC. | 76 |
| 5.2 | Simulaciones Resultantes para la Evaluación del Comportamiento del Controlador Indirecto PWM, en el Convertidor "Boost" Perturbado. . . . | 78 |
| 5.3 | Simulaciones Resultantes para la Evaluación del Comportamiento del Controlador Indirecto PWM, en el Convertidor "Buck-Boost" Perturbado. | 81 |
| 5.4 | Simulaciones Resultantes para la Evaluación del Comportamiento del Controlador Directo PWM, en el Convertidor "Buck" perturbado. | 83 |
| 5.5 | Resultados de la simulación para la Evaluación del Comportamiento del Controlador Adaptativo Indirecto en el Convertidor "Boost". | 87 |
| 5.6 | Resultados de la simulación para la Evaluación del Comportamiento del Controlador Adaptativo Indirecto en el Convertidor "Buck-Boost". . . . | 89 |
| 5.7 | Resultados de la simulación para la Evaluación del Comportamiento del Controlador Adaptativo Indirecto en el Convertidor "Buck". | 91 |
| 5.8 | Convertidores "Boost" en Cascada. | 92 |
| 5.9 | Resultados de la Simulación para la Evaluación del Comportamiento del Controlador Adaptativo Indirecto en el Convertidor Multivariable "Boost". | 100 |
| 6.1 | Circuito Convertidor "Buck-Derivado". | 102 |
| 6.2 | Función de Posición del Interruptor mediante una Política PWM. | 103 |
| 6.3 | Trayectoria del Estado Controlado vía PWM. | 104 |
| 6.4 | Esquema de Regulación para el Convertidor "Buck-Derivado" en Base a una Discretización Exacta. | 107 |
| 6.5 | Resultados de la Simulación del Convertidor "Buck-Derivado", mediante PWM. | 108 |
| 6.6 | Circuito Convertidor "Boost-Derivado". | 108 |
| 6.7 | Esquema de Regulación Mediante PWM para el Convertidor "Boost-Derivado", en base a una Discretización Exacta. | 113 |
| 6.8 | Resultados de la Simulación para la Estabilización mediante PWM, del Convertidor "Boost-Derivado". | 114 |
| 6.9 | Circuito del Convertidor "Buck-Boost-Derivado". | 115 |
| 6.10 | Resultados de la Simulación para la Estabilización mediante PWM del Convertidor "Buck-Boost-Derivado". | 118 |
| 6.11 | Función de Posición del Interruptor Mediante una Política PFM. | 120 |
| 6.12 | Trayectoria del Estado Controlado vía PFM | 122 |
| 6.13 | Esquema de Regulación para el Convertidor "Buck-Derivado" en Base a una Discretización Exacta PFM. | 124 |
| 6.14 | Política de Control, Ciclo de Trabajo. | 125 |
| 6.15 | Resultados de la simulación del Convertidor "Buck-Derivado", mediante PFM. | 126 |
| 6.16 | Resultados de la Simulación del Convertidor "Boost-Derivado", mediante PFM. | 131 |

| | |
|---|-----|
| 6.17 Resultados de la Simulación del Convertidor "Buck-Boost-Derivado", mediante PFM. | 134 |
| 6.18 Esquema de Regulación mediante PWM, en Tiempo Discreto para el Problema del Seguimiento de una Señal en Convertidores de Potencia DC-DC. | 136 |
| 6.19 Señal Deseada Trapezoidal de la Corriente de Entrada. | 139 |
| 6.20 Resultados de Simulación para el Problema de Seguimiento, en el "Con- vertidor Buck-Derivado". | 139 |
| 6.21 Resultados de Simulación para el Problema de Seguimiento, en el Con- vertidor "Boost-Derivado". | 141 |
| 6.22 Resultados de Simulación para el Problema de Seguimiento, en el Con- vertidor "Buck-Boost-Derivado". | 143 |