

Diseño microelectrónico de controladores para convertidores conmutados continua-continua

Eduardo Alarcón Cot

Departamento de Ingeniería Electrónica (DEE)
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona (ETSETB)
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

Director de tesis doctoral : Dr. Alberto Poveda López

Tribunal

Prof. Jean Claude Marpinard (CNRS-LAAS Francia)
Prof. Luis Martínez-Salamero (ETSE-URV-Tarragona)
Prof. Francisco Duque-Carrillo (DEIE-Univ. Extremadura)
Dr. Alfonso Carlosena Cabeza (UPNA-Pamplona)
Dr. Jordi Madrenas Boadas (DEE-UPC-Barcelona)

Calificación : Sobresaliente *cum laude* por unanimidad del tribunal

RESUMEN

Introducción

Los circuitos convertidores de potencia conmutados continua-continua se caracterizan por ser sistemas con comportamiento dinámico no lineal. Este aspecto justifica la falta de existencia de un método estándar para controlar y modelar dichos sistemas. Es por ello que las propuestas de control convencionales están basadas en la aplicación de técnicas clásicas (o modernas) de realimentación lineal (o de estado), tras una fase previa de linealización en torno a un punto de equilibrio de las ecuaciones dinámicas no lineales que modelan el comportamiento del convertidor. Esta aproximación restringe considerablemente las capacidades dinámicas de aquellos sistemas conmutados de conversión de potencia.

Frente a esta situación, existen métodos de control que presentan notables prestaciones dinámicas debidas a la utilización de las variables de estado de dinámica rápida del convertidor, destacando, entre otros, el control de corriente, el control de un ciclo (one-cycle control) y el control en modo deslizamiento (sliding-mode control). Asimismo, el método de control basado en la inferencia difusa (fuzzy logic inference), además de ser susceptible de operar con variables de estado de dinámica rápida, permite aproximar leyes no lineales de control complejas, si bien presenta la dificultad de requerir una notable complejidad de procesado. A pesar de la aparente heterogeneidad en su descripción y la diversidad de origen histórico de estos métodos de control, todos ellos comparten el problema tecnológico de su implementación, dado que comparten la característica de operar con las variables de estado de dinámica rápida del convertidor. Una dificultad adicional para la implementación la establece el continuo incremento de la frecuencia de conmutación en dichos circuitos procesadores de potencia, con el fin de

conseguir una reducción en el peso y volumen de los elementos reactivos de almacenamiento energético, y que constituye un factor clave en las figuras de mérito de diseño de convertidores en aplicaciones aeroespaciales de alta potencia y portátiles de baja potencia. Esta tendencia tecnológica aumenta los requerimientos dinámicos de procesamiento de los circuitos electrónicos analógicos y digitales que implementan los métodos de control, vetando el uso de las anteriores estrategias de control no lineal.

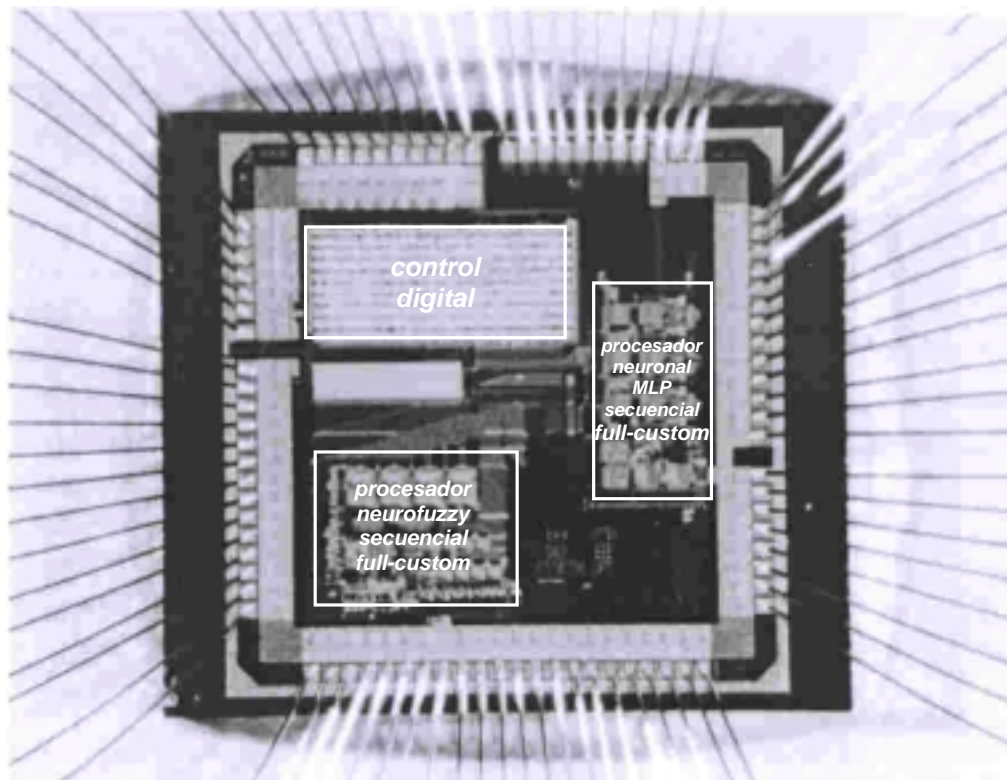
Con el advenimiento del procesamiento de señal analógico con operación en modo corriente, que constituye una nueva tendencia que está siendo aplicada con éxito en diversas áreas del diseño electrónico, se incrementan las posibilidades de implementación de métodos de control avanzados para convertidores conmutados, que, de otra manera, serían difíciles de implementar en cuanto a sus requerimientos dinámicos o su complejidad de procesamiento.

Contenido

A tenor de los anteriores argumentos, esta tesis doctoral se inscribe dentro de la aproximación conjunta entre el área de conversión conmutada de potencia, la teoría de control y el diseño microelectrónico analógico. Concretamente se plantea la propuesta de diversos circuitos controladores microelectrónicos, como combinación sinérgica de una serie de métodos de control de altas prestaciones para convertidores conmutados continua-continua y la metodología de procesamiento de señal analógico en modo corriente, conjunción de la que se derivan estructuras circuitales de elevadas prestaciones dinámicas.

Como trabajo de carácter autocontenido asociado a la tesis se presenta un estudio exhaustivo sobre las características analíticas de los sistemas difusos (fuzzy systems). Tras presentar los fundamentos de la teoría de conjuntos difusos y la lógica difusa, se establece (planteando una tipología comparativa entre los distintos métodos de inferencia, definiciones de implicación y métodos de defuzzyficación), un modelo analítico de la operación de un sistema completo de inferencia difusa, que permite su equiparación funcional y estructural con distintos paradigmas de aproximación funcional y redes de procesamiento paralelo. Posteriormente, y tras la formulación de un modelo unificado denominado sistema de agregación local, se establecen tres justificaciones matemáticas de carácter demostrativo, si bien que constructivo (en base a una descripción ortogonal sobre espacios de Hilbert, en base al concepto de delta generalizada y según una descripción de la reconstrucción de una función muestreada en un espacio multidimensional), que permiten inferir resultados cualitativos y cuantitativos sobre las propiedades de aproximación de funciones multidimensionales no lineales que ostentan los sistemas que admiten dicho modelo. Frente a la anterior perspectiva homegénea, el estudio de los sistemas difusos Takagi-Sugeno, interpretados como la conjunción de, por una parte, una subdivisión en zonas localizadas disjuntas del espacio, y por otra parte, la asignación de modelos locales (en particular, afines, lo que permite establecer un paralelismo con los modelos lineales a tramos PWL), que son interpolados, pone de relieve las manifiestas virtudes que dicho modelo difuso presenta y que le confieren una clara ventaja frente a los demás métodos de aproximación. Se presenta un método de síntesis sustentado en la anterior descripción, que permite recuperar parte de los resultados conocidos en cuanto al análisis, modelado y síntesis de sistemas lineales. A continuación, y con la inclusión de una descripción dinámica en el sistema, se demuestra la propiedad que aquellos sistemas difusos de modelos locales presentan como aproximadores universales de sistemas dinámicos no lineales arbitrarios. En particular, se formaliza su estudio como sistemas de control PID no lineal, sistemas compensadores dinámicos no lineales arbitrarios y sistemas de realimentación de estado no lineal arbitraria. Como extensión al estudio de las propiedades de modelado o aproximación óptima de sistemas dinámicos no lineales se establecen analogías y disimilitudes con las descripciones de sistemas en base a series de Volterra o los modelos de Wiener.

El anterior estudio cristaliza, tras la contrastación de las diferentes posibilidades en cuanto a la implementación microelectrónica de los controladores difusos, en la concepción, diseño e implementación de un circuito integrado mixto digital analógico CMOS de procesamiento difuso según el modelo Takagi-Sugeno de orden uno (mostrado en la figura), cuya arquitectura se fundamenta en un funcionamiento secuencial, y cuyo procesamiento se realiza principalmente en modo corriente.



Microfotografía del Circuito Integrado de Aplicación Específica Neurofuzzy

Se presenta asimismo la aplicación de técnicas de procesado analógico en modo corriente al diseño tanto de controladores de un ciclo como controladores para el establecimiento de lazos de control de corriente. Tras analizar los requerimientos de procesado de dichos métodos de control, se fundamenta su adecuación a la síntesis en modo corriente y se describen sendas estructuras circuitales CMOS verificadas en base a simulaciones completas a nivel de transistor. Por su parte se plantea el estudio de los requerimientos de procesado asociados a la implementación del control en modo de deslizamiento, considerando en general una descripción no lineal de las superficies de deslizamiento, y en concreto se establece una extensión de la interpretación del control difuso con el fin de incluir el control en modo deslizamiento zonal. A nivel circuital, se justifica la adecuación de las estrategias de control en modo deslizamiento a su implementación analógica, y, en particular, a su implementación en modo corriente. Como aplicación específica, el capítulo desemboca en la descripción completa de un circuito microelectrónico BiCMOS de control en modo deslizamiento para la generación de señal sinusoidal en un convertidor de potencia conmutado de tipo BUCK.