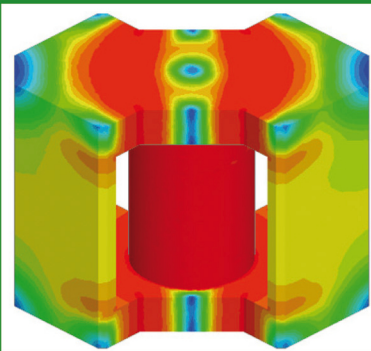
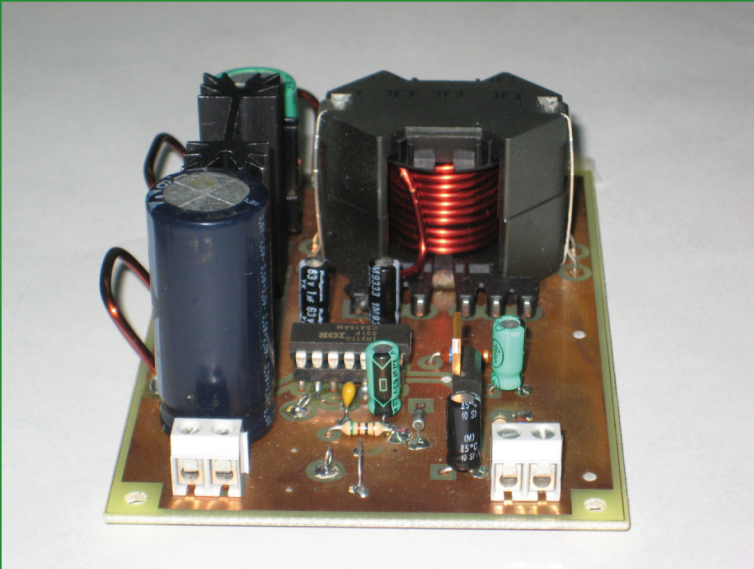


Modelado y Simulación del Comportamiento de Bobinas de Ferrita: Aplicación a Convertidores de Potencia



**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE
BOBINAS DE FERRITA: APLICACIÓN A
CONVERTIDORES DE POTENCIA**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE
BOBINAS DE FERRITA: APLICACIÓN A
CONVERTIDORES DE POTENCIA**

Por

ROSA ANA SALAS MERINO

**Licenciada en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de
Madrid**

**Profesora Doctora del Departamento de Tecnología Electrónica de
la Universidad Carlos III de Madrid**



Reservados todos los derechos. Queda rigurosamente prohibida, sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, bajo las sanciones establecidas de las leyes, la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento incluidos la reprografía y el tratamiento informático.

© 2012 MODELADO Y SIMULACIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DE BOBINAS DE FERRITA:
APLICACIÓN A CONVERTIDORES DE POTENCIA

© ROSA ANA SALAS MERINO

© 2012 Editorial: Vision Libros

C/ Magnolias 35 bis 28029 Madrid, España

Web: www.visionlibros.es Tel: 0034 91 3117696

ISBN: 978-84-9011-304-2

Descargado de: www.visionlibros.com

Disponible en papel y ebook

www.visionlibros.com

www.terrabooks.com

Pedidos a:

pedidos@visionnet.es

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de nuestro grupo editor envíe un correo electrónico a:

subscripción@visionnet.es

A mi familia

ÍNDICE

Prólogo	XXI
Teoría Electromagnética	1
1.1 Evolución de la teoría electromagnética.....	2
1.1.1. La teoría magnética en el mundo antiguo	2
1.1.2. El estudio sistemático y experimental y la revolución científica en el magnetismo	3
1.1.3. La convergencia entre el magnetismo y la electricidad: los primeros pasos de la teoría electromagnética	5
1.1.4. Teorías basadas en la teoría del electrón	6
1.1.5. El magnetismo desde el punto de vista de la mecánica cuántica.....	7
1.2 Teoría electromagnética	9
1.2.1. Ecuación del flujo magnético en función de la inducción magnética ____	9
1.2.2. Ecuación de relación entre la tensión y la intensidad de corriente en una bobina	10
1.2.3. Ley de Faraday	11
1.2.4. Ley de Lenz	12
1.2.5. Ley de Ampère	12
1.2.6. Ecuación constitutiva del medio y susceptibilidad magnética χ_m	13
1.2.7. Materiales no lineales: la histéresis	15
1.2.8. Clasificación de los materiales magnéticos	17
1.2.8.1. Las ferritas.....	20
Modelos de núcleos magnéticos no lineales	23
2.1 Modelado de núcleos magnéticos no lineales y la histéresis magnética	24
2.2 Modelo de Roshen	25
2.2.1. Principios del modelo	26
2.3 Modelo de Jiles-Atherton	29

2.3.1. Teoría de los dominios magnéticos	29
2.3.2. Principios del modelo	31
Modelo de Roshen: Implementación y Resultados	37
3.1 Fundamentos del modelo teórico de Roshen.....	38
3.2 Implementación del modelo	39
3.2.1. Bloque S-Function: Parámetros de E/S utilizados	40
3.2.2. Esquema del modelo realizado en Simulink	42
3.3 Caracterización y resultados de la simulación con Simulink-Matlab.....	43
3.3.1. Material 3C90	44
3.3.2. Material 3R1	46
Modelo de Jiles-Atherton: Implementación y Resultados	49
4.1 Fundamentos del modelo teórico de Jiles-Atherton	50
4.2 Obtención de los parámetros del modelo de Jiles-Atherton a partir de medidas experimentales.....	52
4.3 Cálculo de los parámetros característicos del modelo de Jiles-Atherton y resolución de la ecuación diferencial que los describe.....	55
4.3.1. Procedimiento de cálculo de los parámetros k , a , c y α	55
4.3.2. Resolución de la ecuación diferencial característica del modelo de Jiles- Atherton	57
4.4 Caracterización y resultados de la simulación con Matlab.....	59
4.4.1. Simulaciones a la frecuencia de 50 Hz	60
4.4.1.1. Material 3C90.....	60
4.4.2. Simulaciones a la frecuencia de 20 kHz	62
4.4.2.1. Material 3C90.....	62
4.5 Influencia de la variación de los parámetros k , a , c y α en la forma del ciclo de histéresis	64
4.5.1. Variación de M_s	65
4.5.2. Variación de k	66
4.5.3. Variación de a	67
4.5.4. Variación de c	67

4.5.5. Variación de α	68
Aplicación de ambos modelos a la simulación de convertidores de potencia	71
5.1 Aplicación de los modelos de Roshen y Jiles-Atherton a la simulación electrónica de convertidores de CC/CC utilizando PSIM.....	72
5.2 Resultados de las simulaciones	75
5.2.1. Simulaciones empleando el modelo de <i>Roshen</i>	77
5.2.2. Simulaciones empleando el modelo de <i>Jiles-Atherton</i>	81
5.2.3. Comparación de ambos modelos: modelo de Roshen y modelo de Jiles-Atherton	85
Medidas experimentales	87
6.1 Circuitos electrónicos para la medida de ciclos de histéresis	88
6.1.1. Circuito electrónico utilizado para la medida de ciclos de histéresis a 50 Hz de frecuencia	88
6.1.2. Circuito electrónico utilizado para la medida de ciclos de histéresis a la frecuencia de 20 kHz	90
6.2 Circuito electrónico empleado para las medidas con excitación no sinusoidal....	91
Validación experimental.....	93
7.1 Validación experimental del modelo de Roshen	94
7.1.1. Validación experimental a la frecuencia de 50 Hz	95
7.1.1.1. Material 3C90.....	95
7.1.1.2. Material 3R1.....	98
7.1.2. Validación experimental a la frecuencia de 20 kHz	100
7.1.2.1. Material 3C90.....	100
7.1.2.2. Material 3R1.....	102
7.2 Sensibilidad del modelo de Roshen frente al parámetro H_s	104
7.2.1. Material 3C90 a la frecuencia de 50 Hz	105
7.2.2. Material 3C90 a la frecuencia de 20 kHz	106
7.2.3. Material 3R1 a la frecuencia de 50 Hz	108
7.2.4. Material 3R1 a la frecuencia de 20 kHz	110

7.3 Validación experimental del modelo de Jiles-Atherton	113
7.3.1. Validación experimental a la frecuencia de 50 Hz	114
7.3.1.1. Material 3C90.....	114
7.3.2. Validación experimental a la frecuencia de 20 kHz	117
7.3.2.1. Material 3C90.....	117
7.4 Validación experimental de ambos modelos aplicados a un convertidor-reductor de CC/CC.....	120
7.4.1. Material 3C90 a la frecuencia de 20 kHz	121
7.5 Conclusiones de la validación experimental	125
7.5.1 Generación de ciclos de histéresis	125
7.5.2 Simulación del comportamiento de convertidores de potencia de CC/CC reductores.....	126
Conclusiones y Trabajo Futuro	127
8.1 Conclusiones.....	128
8.2 Trabajo Futuro	130

Lista de Figuras

Figura i.1: Esquema del proceso seguido desde el modelo a la simulación electrónica.	XXIV
--	------

Capítulo 1: Teoría Electromagnética

Figura 1.1: Bobina toroidal de N espiras por las que circula una intensidad de corriente i	11
Figura 1.2: Sentidos de la corriente inducida en una bobina por la variación de flujo magnético creada por el acercamiento/alejamiento de un imán a la misma	12
Figura 1.3: Proceso de histéresis magnética y sus puntos más significativos	16
Figura 1.4: Algunos tipos de geometrías posibles de una ferrita: (a) Geometría toroidal. (b) Geometría ER. (c) Geometría RM.	20

Capítulo 2: Modelos de núcleos magnéticos

Figura 2.1: Ciclo máximo en el que se muestran sus parámetros característicos	25
Figura 2.2: Ciclo con $B > B_{olimite}$	28
Figura 2.3: Ciclo con $B < B_{olimite}$ y $B << B_s$	28

Capítulo 3: Modelo de Roshen. Implementación y Resultados

Figura 3.1: Esquema de Entradas y Salidas del bloque S-Function	39
Figura 3.2: Esquema de Entradas y Salidas del bloque S-Function	41
Figura 3.3: Esquema completo del modelo implementado en Simulink	42
Figura 3.4: Ciclo de histéresis del material 3C90 simulado con un valor $B_p = 0.046$ T	44
Figura 3.5: Ciclo de histéresis del material 3C90 simulado con un valor $B_p \approx 0.2$ T	44
Figura 3.6: Ciclo de histéresis del material 3C90 simulado con un valor $B_p = B_s = 0.44$ T	45
Figura 3.7: Familia de ciclos de histéresis del material 3C90	45
Figura 3.8: Ciclo de histéresis del material 3R1 simulado con un valor $B_p = 0.0463$ T	46

Figura 3.9: Ciclo de histéresis del material 3R1 simulado con un valor $B_p \approx 0.2$ T	46
Figura 3.10: Ciclo de histéresis del material 3R1 simulado con un valor $B_p = B_s = 0.39$ T	47
Figura 3.11: Familia de ciclos de histéresis del material 3R1	47

Capítulo 4: Modelo de Jiles-Atherton. Implementación y Resultados

Figura 4.1: Puntos y pendientes de interés en el ciclo de histéresis.	53
Figura 4.2: Ciclo de histéresis del material 3C90 simulado con un valor $B_p = 0.0375$ T a 50 Hz	61
Figura 4.3: Ciclo de histéresis del material 3C90 simulado con un valor $B_p = 0.167$ T a 50 Hz	61
Figura 4.4: Ciclo de histéresis del material 3C90 simulado con un valor $B_p = 0.451$ T a 50 Hz	62
Figura 4.5: Ciclo de histéresis del material 3C90 simulado con un valor $B_p = 0.079$ T a 20 kHz	63
Figura 4.6: Ciclo de histéresis del material 3C90 simulado con un valor $B_p = 0.312$ T a 20 kHz	63
Figura 4.7: Ciclo de histéresis del material 3C90 simulado con un valor $B_p = 0.45$ T a 20 kHz	64
Figura 4.8: Ciclos de histéresis simulados para diferentes valores de M_s ($M_s = 288000$, 360000 y 432000 A/m)	65
Figura 4.9: Ciclos de histéresis simulados para diferentes valores de k	66
Figura 4.10: Ciclos de histéresis simulados para diferentes valores de a	67
Figura 4.11: Ciclos de histéresis simulados para diferentes valores de c	68
Figura 4.12: Ciclos de histéresis simulados para diferentes valores de α	68

Capítulo 5: Aplicación de ambos modelos a la simulación de convertidores de potencia

Figura 5.1: Convertidor reductor de CC/CC diseñado en PSIM utilizado para validar los modelos	72
Figura 5.2: Flujo de información entre PSIM y Simulink	73
Figura 5.3: (a) Slink_in. (b) Slink_out	74

Figura 5.4: Módulo o bloque “SimCoupler”	74
Figura 5.5: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 4$ V	77
Figura 5.6: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 4$ V	77
Figura 5.7: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 6$ V	78
Figura 5.8: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 8$ V	78
Figura 5.9: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 9$ V	79
Figura 5.10: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 10$ V	79
Figura 5.11: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 4$ V	81
Figura 5.12: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 4$ V	81
Figura 5.13: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 6$ V	82
Figura 5.14: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 8$ V	82
Figura 5.15: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 9$ V	83
Figura 5.16: Intensidad en la bobina i_b y tensión de salida V_o para $V_{in} = 10$ V	83
Figura 5.17: Comparación de la variación de la corriente media de la bobina y de su rizado obtenidos de los modelos de Roshen y Jiles-Atherton	85

Capítulo 6: Medidas experimentales

Figura 6.1: Circuito electrónico utilizado para la medida de ciclos de histéresis a 50 Hz	89
Figura 6.2: Circuito electrónico utilizado para la medida de ciclos de histéresis a 20 kHz	90
Figura 6.3: Esquema eléctrico de medida utilizado con excitación no sinusoidal	91

Capítulo 7: Validación experimental

Figura 7.1: Validación del modelo de Roshen para el material 3C90, a $f = 50$ Hz y con $B_p = 0.0175$ T	96
Figura 7.2: Validación del modelo de Roshen para el material 3C90, a $f = 50$ Hz y con $B_p \approx 0.44$ T	96
Figura 7.3: Error (%) del punto máximo de los ciclos simulados con respecto al ciclo experimental del material 3C90 a 50 Hz	97
Figura 7.4: Validación del modelo de Roshen para el material 3R1, a $f = 50$ Hz y con $B_p \approx 0.02$ T	98

Figura 7.5: Validación del modelo de Roshen para el material 3R1, a $f = 50$ Hz y con $B_p \approx 0.37$ T _____	98
Figura 7.6: Error (%) del punto máximo de los ciclos simulados con respecto al ciclo experimental del material 3R1 a 50 Hz _____	99
Figura 7.7: Validación del modelo de Roshen para el material 3C90, a $f = 20$ kHz y con $B_p = 0.026$ T _____	100
Figura 7.8: Validación del modelo de Roshen para el material 3C90, a $f = 20$ kHz y con $B_p \approx 0.44$ T _____	100
Figura 7.9: Error (%) del punto máximo de los ciclos simulados con respecto al ciclo experimental del material 3C90 a 20 kHz _____	101
Figura 7.10: Validación del modelo de Roshen para el material 3R1, a $f = 20$ kHz y con $B_p \approx 0.058$ T _____	102
Figura 7.11: Validación del modelo de Roshen para el material 3R1, a $f = 20$ kHz y con $B_p \approx 0.325$ T _____	102
Figura 7.12: Error (%) del punto máximo de los ciclos simulados con respecto al ciclo experimental del material 3R1 a 20 kHz _____	103
Figura 7.13: Influencia del parámetro H_s en los ciclos de histéresis para $B_p = 0.0175$ T _____	105
Figura 7.14: Influencia del parámetro H_s en los ciclos de histéresis para $B_p \approx 0.44$ T _____	105
Figura 7.15: Variación del error (%) con respecto a H_s , para el material 3C90 a la frecuencia de 50 Hz _____	106
Figura 7.16: Influencia del parámetro H_s en los ciclos de histéresis para $B_p = 0.0262$ T _____	107
Figura 7.17: Influencia del parámetro H_s en los ciclos de histéresis para $B_p = 0.44$ T _____	107
Figura 7.18: Variación del error (%) respecto a H_s para el material 3C90 a la frecuencia de 20 kHz _____	108
Figura 7.19: Influencia del parámetro H_s en los ciclos de histéresis para $B_p \approx 0.02$ T _____	109
Figura 7.20: Influencia del parámetro H_s en los ciclos de histéresis para $B_p = 0.3681$ T _____	109
Figura 7.21: Variación frente a H_s del error para el material 3R1 a la frecuencia de 50 Hz _____	110
Figura 7.22: Influencia del parámetro H_s en los ciclos de histéresis para $B_p = 0.058$ T _____	111