

EU 正交铁心可控电抗器

牟宪民¹, 刘凤春¹, 王建赟², 纪延超²

- (1. 大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁省 大连市 116024;
2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

EU Ferrite Orthogonal Core Variable Inductor

MU Xian-min¹, LIU Feng-chun¹, WANG Jian-ze², JI Yan-chao²

- (1. Department of Electrical and Electronics Engineering, Dalian Instituted of University, Dalian 116024, Liaoning Province, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: Conventional ferrite orthogonal core (FOC) variable inductor worked in saturation state formed by a DC current control, so increases the harmonics in the AC current. A single-phase variable inductor and a three-phase variable inductor are presented based on EU ferrite orthogonal core. The single-phase EU core variable inductor reduces harmonic component of its output current resulted from unique structure. The three-phase EU core variable inductor contains seldom third harmonic component in output current. Simulated module is setup employed 3D nonlinear reluctance method, and the single phase and three phase EU core variable inductor prototype are made respectively. Their basic characteristics are also verified by simulation and experiment result respectively.

KEY WORDS: variable inductor; EU orthogonal core; magnetic equivalent circuit; harmonic current

摘要: 传统的正交铁心可控电抗器通过控制在正交铁心上的直流偏磁磁场间接控制交流磁场, 铁心工作在饱和区, 因此其工作电流中含有谐波。该文提出一种基于 EU 正交铁心的单相和三相正交可控电抗器。由于特殊的磁路结构, 单相 EU 正交铁心可控电抗器输出电流中的谐波得到了降低, 三相 EU 可控电抗器的输出电流中 3 次谐波成分很低。使用三维非线性磁阻模型建立了 EU 正交铁心的仿真模型进行仿真研究, 并分别制作了单相和三相 EU 正交铁心可控电抗器样机进行实验。仿真分析和实验结果均验证了新型 EU 正交铁心可控电抗器的谐波含量较传统正交铁心可控电抗器低的特点。

关键词: 可控电抗器; EU 正交铁心; 等效磁路; 谐波电流

0 引言

近年来, 多种可控电抗器被应用到静止无功补偿装置中^[1-6], 例如基于可控硅控制电抗器(thyristor

controlled reactor, TCR), 磁控电抗器(magnetic controlled reactor, MCR)等。其中, 磁控电抗器由于其控制简单, 可靠性高得到了广泛的关注^[7-10]。直流控制饱和式可控电抗器在调节过程中, 铁心工作在饱和区, 利用磁化曲线非线性的特点, 通过调节磁路中铁心的工作点, 可以调节等效电抗。直流控制可控电抗器的铁心工作在饱和状态, 因此其输出电流中含有大量的谐波成分^[11-17]。

正交铁心可控电抗器属于直流控制饱和式可控电抗器的一种, 传统的正交铁心可控电抗器其工作电流中含有一定的谐波成分。使用 2 个正交可控电抗器分别工作在正弦电压的半波可以降低其输出电流的谐波^[13], 这种方案增加了一个正交可控电抗器, 使成本增加。通过在铁心上开楔型气隙, 可在一定程度上降低其工作电流中的谐波^[18-19]。楔型气隙在可控电抗器的 2 个铁心的连接部分增加了不可靠因素, 同时楔型气隙需要较高的工艺保证其加工精度。

本文提出了具有 EU 铁心结构的正交可控电抗器, 具有谐波含量低的优点。按照工作绕组的配置不同, 将 EU 铁心可控电抗器分成单相和三相两种分别进行研究。

1 正交 EU 铁心可控电抗器

1.1 单相 EU 铁心可控电抗器配置

EU 铁心可控电抗器的铁心由一个 E 型铁心和 一个 U 型铁心相互正交装配在一起。在 E 型铁心和 U 型铁心之间存在 6 个接触部分。图 1 给出了实验室用于实验测试的铁心结构配置图。图中, 铁心使用厚度为 0.23 mm 取向硅钢片卷绕, 粘接并热处理后

制作成型。

E 型铁心上的 3 个心柱和 U 型铁心的 2 个心柱可用来安装绕组。按照绕组的安装和连接方式不同，EU 铁心可控电抗器可分为单相和三相。

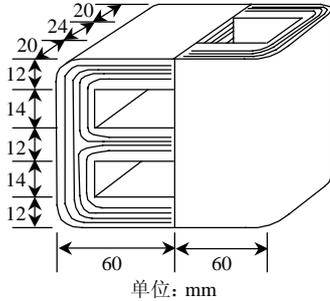


图 1 EU 铁心结构配置图
Fig. 1 Configuration of EU core

单相EU铁心可控电抗器的配置如图 2(a)所示，在U型铁心的 2 个心柱上安装直流控制绕组，在E型铁心的 2 个外侧心柱上安装交流工作绕组。图 2(b)给出了单相EU铁心可控电抗器的电气符号，其中 N_{ac} 为交流工作绕组的匝数， N_{dc} 为直流控制绕组的匝数。图 3 给出了单相EU铁心可控电抗器的实物照片。

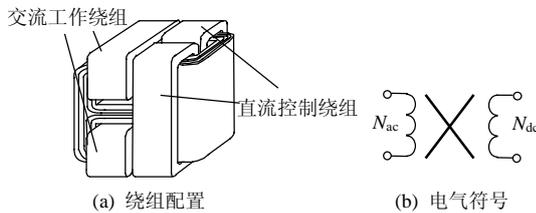


图 2 单相 EU 铁心可控电抗器的绕组配置和电气符号
Fig. 2 Configuration and symbol of single-phase EU core variable inductor

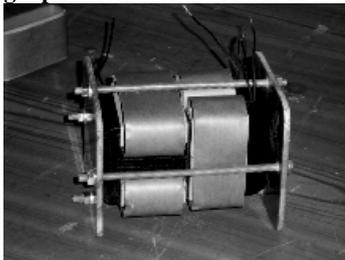


图 3 单相 EU 铁心可控电抗器照片

Fig. 3 Picture of single-phase EU core variable inductor

1.2 三相 EU 铁心可控电抗器配置

三相EU铁心可控电抗器的配置如图 4(a)所示，在U型铁心的 2 个心柱上安装直流控制绕组，在E型铁心的心柱上分别安装三相交流工作绕组。图 4(b) 给出了三相EU铁心可控电抗器的电气符号，其中 N_a 、 N_b 和 N_c 分别为交流三相工作绕组的匝数， N_{dc} 为直流控制绕组的匝数。图 5 给出了三相EU铁心可控电抗器的实物照片。

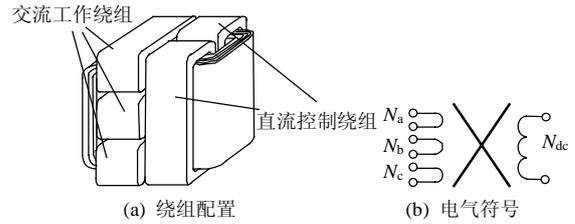


图 4 三相 EU 铁心可控电抗器的绕组配置和电气符号
Fig. 4 Configuration and symbol of three-phase EU core variable inductor

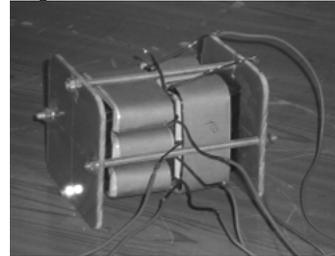


图 5 三相 EU 铁心可控电抗器照片

Fig. 5 Picture of three-phase EU core variable inductor

2 单相正交 EU 铁心可控电抗器

2.1 等效磁路和基本方程

图 3 给出了单相EU铁心可控电抗器的等效磁路，其忽略了工作在线形区的磁阻，仅包括由E型和U型 2 个铁心接触处形成的 6 个工作在非线性的磁阻，如图 6(a)所示。交流工作绕组和直流控制绕组的磁通分布别为 ϕ_{ac} 和 ϕ_{dc} ，磁动势分别为 F_{ac} 和 F_{dc} ，接触处的磁阻分别为 $R_1 \sim R_6$ ，其上降落的磁动势为 $F_1 \sim F_6$ ，通过的磁通为 $\phi_1 \sim \phi_6$ 。

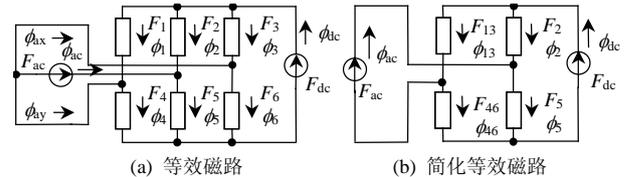


图 6 单相 EU 铁心可控电抗器等效磁路及其简化磁路
Fig. 6 Magnetic equivalent circuit and brief circuit of single-phase EU core variable inductor

利用基本的磁路定律可将其简化为仅包括 4 个磁阻的简化磁路模型，如图 6(b)所示。这文献[4]中的等效磁路具有相同的拓扑结构，若将 E 型铁心的中间心柱的截面积等于两个边柱的面积之和，则磁路与文献[4]中的磁路将具有相同的对称性，可采用相同的分析方法进行分析。获得的基本方程如为

$$\begin{cases} F_{ac} - F_5 - F_{46} = 0 \\ F_{dc} + F_2 + F_5 = 0 \\ F_{dc} + F_{13} + F_{46} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \phi_{dc} - \phi_2 - \phi_{13} = 0 \\ \phi_{dc} - \phi_{46} - \phi_5 = 0 \\ \phi_{ac} - \phi_2 - \phi_5 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 ϕ_{13} 、 ϕ_{46} 为磁阻 R_{13} 、 R_{46} 中的磁通。

2.2 仿真和实验结果

由文献[16]中的三维磁阻网络分析方法和图1中给出的铁心数据,将EU铁心分成每部分由6个正交磁阻构成的68个块,构造单相EU铁心可控电抗器的磁阻仿真模型。选择直流控制绕组匝数 $N_{dc}=290$,交流工作绕组匝数 $N_{ac}=300$,按照图7对所建立的仿真模型进行测试,调节交流调压器,使交流工作绕组的工作电压 $U_{ac}=48\text{ V}$ 。通过对给定的控制绕组施加不同的激励可得到不同的测试结果。

按照仿真模型制作单相EU铁心正交可控电抗器,并使用与仿真模型相同的测试条件进行实验研究。

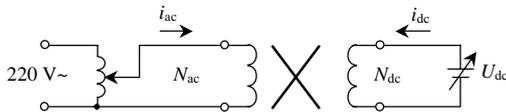


图7 单相EU铁心可控电抗器仿真和实验电路原理图
Fig. 7 Simulation and experiment circuit of single phase EU core variable inductor

图8给出了单相EU可控电抗器谐波含量的实验结果。可以看出,相比传统的正交铁心可控电抗器^[6],单相EU可控电抗器由于E、U型铁心的6个接触部分的磁阻工作在不同的饱和状态,其谐波含量较低。

图9给出了单相EU可控电抗器控制特性的仿真和实验结果,二者符合较好,线性度较好。图10

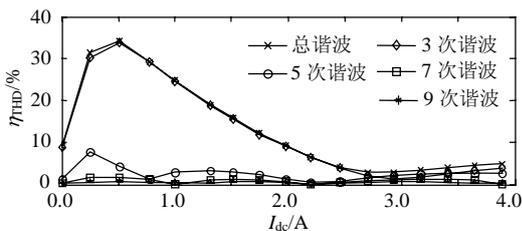


图8 单相EU铁心可控电抗器谐波含量实验结果
Fig. 8 Harmonic components of experiment result of single phase EU core variable inductor

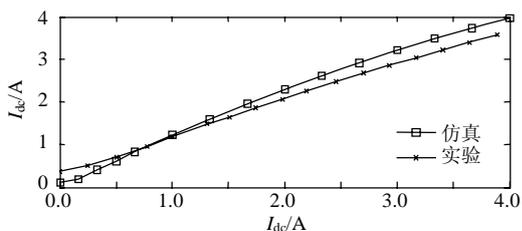


图9 单相EU铁心可控电抗器控制特性仿真和实验结果
Fig. 9 Simulation and experiment control characteristic result of single phase EU core variable inductor

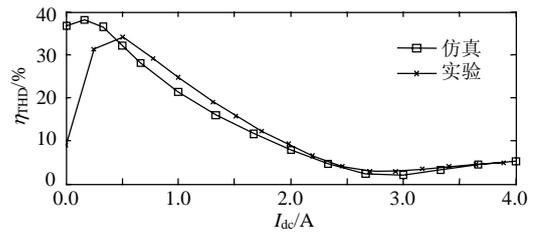


图10 单相EU铁心可控电抗器总谐波畸变率仿真和实验结果
Fig. 10 Simulation and experiment THD result of single phase EU core variable inductor

给出了单相EU可控电抗器总谐波畸变率的仿真和实验结果,二者在大部分范围内符合较好。为简化仿真模型的仿真速度,仿真模型中的铁心材料使用了基本磁化曲线数据,由于磁化曲线数据和实际的铁心材料差别,仿真数据和实验数据之间存在一定的偏差。

3 三相正交EU铁心可控电抗器

3.1 等效磁路和基本方程

图11给出了三相EU铁心可控电抗器的等效磁路。同单相EU铁心可控电抗器类似,等效磁路忽略了工作在线形区的磁阻,仅包括由E型和U型两个铁心接触处形成的6个工作在非线性的磁阻。交流工作绕组和直流控制绕组的磁通分布别为 ϕ_a 、 ϕ_b 、 ϕ_c 和 ϕ_{dc} ,磁动势分别为 F_a 、 F_b 、 F_c 和 F_{dc} 。接触处的磁阻分别为 $R_1 \sim R_6$,其上降落的磁动势为 $F_1 \sim F_6$,通过的磁通为 $\phi_1 \sim \phi_6$ 。

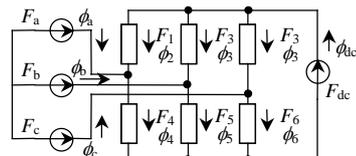


图11 单相EU铁心可控电抗器等效磁路及其简化磁路
Fig. 11 Magnetic equivalent circuit of three-phase EU core variable inductor
由磁路基本定律可获得磁路基本方程

$$\begin{cases} F_a + F_6 - F_4 - F_c = 0 \\ F_b + F_5 - F_4 - F_c = 0 \\ F_b - F_2 + F_1 - F_c = 0 \\ F_a - F_3 + F_1 - F_c = 0 \\ F_2 + F_1 + F_4 = 0 \\ \phi_a = \phi_6 - \phi_3 \\ \phi_b = \phi_5 - \phi_2 \\ \phi_c = \phi_4 - \phi_1 \\ \phi_{dc} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \\ \phi_{dc} = \phi_4 + \phi_5 + \phi_6 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \phi_a = \phi_6 - \phi_3 \\ \phi_b = \phi_5 - \phi_2 \\ \phi_c = \phi_4 - \phi_1 \\ \phi_{dc} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \\ \phi_{dc} = \phi_4 + \phi_5 + \phi_6 \end{cases} \quad (4)$$

3.2 仿真和实验结果

选定直流控制绕组匝数 $N_a=N_b=N_c=50$ ，交流工作绕组匝数为 $N_{dc}=300$ 。与单相EU铁心可控电抗器仿真和实验方法类似，建立相同的仿真模型和实验模型，并使用相同的测试条件，按照图 12 调节调压器，使工作绕组电压 $U_a=U_b=U_c=15\text{ V}$ ，进行实验研究。将可控电抗器交流工作绕组连接成星型，实验结果如图 13~15 所示。

图 13 给出了三相 EU 可控电抗器谐波含量的实验结果。可以看出，由于 E 型铁心和 U 型铁心构成的特殊磁路结构，三相 EU 可控电抗器的 3 次谐波

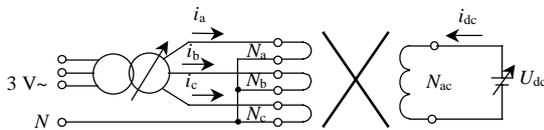


图 12 三相 EU 铁心可控电抗器仿真和实验电路原理图
Fig. 12 Simulation and experiment circuit of three-phase EU core variable inductor

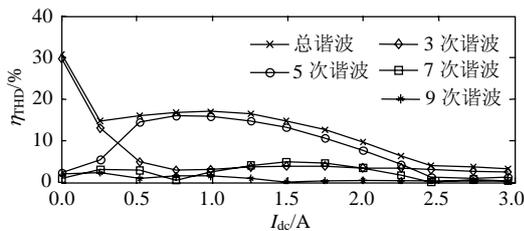


图 13 三相 EU 铁心可控电抗器谐波含量实验结果
Fig. 13 Harmonic components of experiment result of three-phase EU core variable inductor

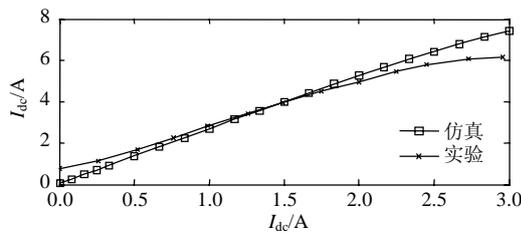


图 14 三相 EU 铁心可控电抗器控制特性仿真和实验结果
Fig. 14 Simulation and experiment control characteristic result of three-phase EU core variable inductor

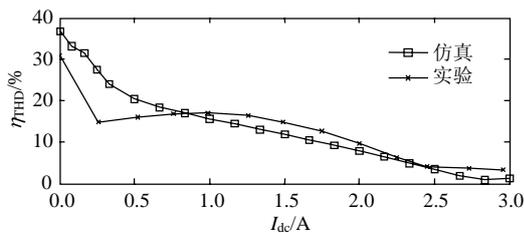


图 15 三相 EU 铁心可控电抗器总谐波畸变率仿真和实验结果
Fig. 15 Simulation and experiment THD result of three-phase EU core variable inductor

含量很低，这主要是由于磁通的 3 次谐波分量不能在铁心中形成闭合的回路。由于 3 次谐波含量很小，所以在三相 EU 可控电抗器的工作绕组中，5 次谐波成为主要的谐波成分。

图 14 给出了三相 EU 铁心可控电抗器控制特性的仿真和实验结果，二者符合较好，线性度较好。图 15 给出了三相 EU 铁心可控电抗器总谐波畸变率的仿真和实验结果，二者在大部分范围内符合较好。由于三相 EU 铁心电抗器的铁心结构限制，工作绕组匝数较小，施加较小电压时工作绕组中的电流很大，所以铁心局部进入饱和区，图中表现为控制电流较小的时候谐波电流和总谐波畸变率较大。

4 结论

本文提出了基于 EU 铁心正交可控电抗器，配置不同的绕组形式可得到 2 种常用的单相和三相可控电抗器模型。利用三维磁路放着模型和实验结果，分别获得了单相和三相 EU 铁心可控电抗器的谐波特性和控制特性。新型的 EU 铁心可控电抗器与传统的相比具有以下优点：a) 单相 EU 铁心可控电抗器具有谐波含量低的特点；b) 三相 EU 铁心可控电抗器又有特殊的磁路结构，三次谐波含量非常低；c) 三相 EU 铁心可控电抗器使其三相工作绕组受同一个控制绕组控制，具有可靠性高、一致性好和使用方便的优点。

参考文献

- [1] 陈振虎, 梁继勇, 黄祥伟. 基于磁控电抗器的电力系统动态无功补偿装置的设计及应用[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 82-84.
Chen Zhenhu, Liang Jiyong, Huang Xiangwei. Design and application of variety reactive power compensator based on magnetic controlled reactor[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 82-84(in Chinese).
- [2] Su J, Chen C. Static VAR compensator control for power systems with nonlinear loads[C]. IEE Proceeding of Generation, Transmission and Distribution, 2004, 1(154): 78-82.
- [3] 纪飞峰, Mansoor, 解大, 等. 有源电力滤波器与直流偏磁式静止无功补偿器综合补偿系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 77-83.
Ji Feifeng, Mansoor, Xie Da, et al. Study on combined compensation structure of an active power filter and a DC-bias magnetic var compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 77-83(in Chinese).
- [4] Maeda I O, Sakamoto M, Mitamura M, et al. Development of 3-phase 100 kVA orthogonal-core type variable inductor with sinusoidal output. Magnetics[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(4): 2066-2068.
- [5] Tellinen J, Jarvik J. Minimization of higher harmonics in high power saturated reactors for AC power transmission lines[C]. Power

- Quality'98, Hyderabad, India, 1998.
- [6] 周腊吾, 徐勇, 朱青, 等. 新型可控电抗器的工作原理与选型分析[J]. 变压器, 2003, 40(8): 1-5.
Zhou Lawu, Xu Yong, Zhu Qing, et al. Type selection analysis and principle of new controllable reactor[J]. Transformer, 2003, 40(8): 1-5(in Chinese).
- [7] 李民族, 朱国荣, 李颖, 等. 变耦式可控电抗特性、机理及应用[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 49-54.
Li Minzu, Zhu Guorong, Li Ying, et al. Characteristics, mechanism and application of thyristor controlled reactance series compensation by adjustable coupling[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 49-54(in Chinese).
- [8] 田铭兴, 励庆孚, 王曙鸿. 磁饱和式可控电抗器的等效物理模型及其数学模型[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 18-21, 35.
Tian Mingxing, Li Qingfu, Wang Shuhong. An equivalent physical model and a mathematical model of the controlled saturable reactor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 18-21, 35(in Chinese).
- [9] 周勤勇, 郭强, 卜广全, 等. 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 1-6.
Zhou Qinyong, Guo Qiang, Bu Guangquan, et al. Application of controllable reactors in China's power grid at extra and ultra voltage level [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 1-6(in Chinese).
- [10] Arturi C M. A thermodynamic approach to energy conversion in parametric transformers[C]. IEEE 39th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Ames, IA, 1996.
- [11] Tajima K, Kaga A, Anazawa Y, et al. One method for calculating flux-MMF relationship of orthogonal-core[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(6): 3219-3221.
- [12] 牟宪民, 王建曠, 魏晓霞, 等. 新型正交铁心可控电抗器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 57-62.
Mu Xianmin, Wang Jianze, Wei Xiaoxia, et al. Novel ferrite orthogonal core controllable reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 57-62(in Chinese).
- [13] Nakamura K, Ichinokura O, Maeda M, et al. Analysis of orthogonal-core type linear variable inductor and application to VAR compensator[J]. IEEE Transaction on Magnetics. 2000, 36(5): 3565-3567.
- [14] 陈柏超, 田翠华, 梁柏华, 等. 单相可控电抗器的一种谐波抑制原理及实现[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 63-67.
Chen Baichao, Tian Cuihua, Liang Baihua, et al. Principle and implementation of a harmonic depression approach for single phase controlled saturable reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 63-67(in Chinese).
- [15] Meiksin Z H. Comparison of orthogonal- and parallel-flux variable inductors[J]. IEEE Transaction on Industry Application. 1974, 10(3): 417-423.
- [16] Oka H, Biringer P. Control characteristic analysis of a ferrite orthogonal core[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1990, 26(5): 2888-2893.
- [17] Ichinokura O, Maeda M, Sakamoto M. Development of 3-phase 100 kVA orthogonal-core type variable inductor with sinusoidal output[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1998, 34(3): 2066-2068.
- [18] Ichinokura O, Jinzenji T, Tajima K. A new variable inductor for VAR compensation[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1993, 29(6): 3225-3227.
- [19] Nakamura K, Yoshida H, Ichinokura O. Electromagnetic and thermal coupled analysis of ferrite orthogonal-core based on three-dimensional reluctance and thermal-resistance network model [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2004, 40(4): 2050-2052.



牟宪民

收稿日期: 2009-04-29。

作者简介:

牟宪民(1973—), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为用户电力技术, muxm@dlut.edu.cn;

刘凤春(1962—), 女, 副教授, 研究方向为电机及电力拖动;

王建曠(1972—), 男, 副教授, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

纪延超(1962—), 男, 教授, 研究方向为电力系统无功补偿。

(责任编辑 张玉荣)