

Research of Magnetically Controlled Reactor Field-Circuit Coupled Model Based on ANSYS*

Shishuo Zhao, Zhongdong Yin

State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing
Email: zhaoshishuo1988@yahoo.cn, yzd@ncepu.edu.cn

Received: Sep. 3rd, 2012; revised: Sep. 4th, 2012; accepted: Sep. 12th, 2012

Abstract: The physical coupled field of the 380 V/13A experimental prototype is systematically analyzed in this paper. A precise 2-D field-circuit coupled model is established in ANSYS platform which is based on finite element theory. Both magnetic circuit equations and electric circuit equations obeying specific circuit configuration are included in this field-circuit coupled model upon which it explicates the real electromagnetic transient process; and upon which an accurate computation of electromagnetic field intensity and electric magnetic induction intensity is given. Simulation results coincide with that of the basic principle's derivation through which the correctness of the field-circuit coupled model is substantiated. The 2-D field-circuit coupled model of 380 V/13A MCR prototype presented here is a solid foundation for reactor design and its performance analysis.

Keywords: Magnetically Controlled Reactor (MCR); Field-Circuit Coupled Model; Finite Element Analysis; Reactor Design

基于 ANSYS 的磁控电抗器场路耦合模型研究*

赵士硕, 尹忠东

华北电力大学, 新能源电力系统国家重点实验室, 北京
Email: zhaoshishuo1988@yahoo.cn, yzd@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2012 年 9 月 3 日; 修回日期: 2012 年 9 月 4 日; 录用日期: 2012 年 9 月 12 日

摘要: 本文对 380 V/13A 磁控电抗器样机耦合物理场进行了理论分析。基于有限元分析理论, 在 ANSYS 中建立了精确的样机 2-D 场路耦合模型。该场路耦合模型将电磁场方程和电磁装置所满足的电路方程直接耦合起来, 反映了磁控电抗器实际的电磁瞬态过程。根据建立的 2-D 场路耦合模型, 对小截面的磁场强度与磁感应强度进行了计算, 仿真结果与理论分析基本相符, 验证了磁路耦合仿真方法的正确性。本文所建立的 380 V/13A MCR 样机 2-D 场路耦合模型, 对电抗器的设计及性能分析有重要的指导作用。

关键词: 磁控电抗器; 场路耦合模型; 有限元分析; 电抗器设计

1. 引言

可控并联电抗器是灵活交流输电技术的重要组成部分, 可限制工频过电压、操作过电压, 动态补偿线路容性功率, 配以合适的中性点小电抗和一定的控制方式, 在线路发生单相接地故障时可加速潜供电弧的

熄灭, 抑制恢复电压, 提高单相重合闸成功率, 已经成为超高压、特别是特高压电网的核心技术之一^[1-5]。

磁控式并联电抗器属于可控电抗器的一类, 除了具有上述优点外, 还具有容量可大范围连续调节、可靠性高、综合成本低的显著特点, 因而有着广阔的应用前景^[6-9]。

可控电抗器的性能改善与电抗器铁芯结构有密

*基金项目: 十一五科技支撑项目: 电能质量复合控制技术及装置, 项目号: 2007BAA12B03。

切的联系。电抗器的容量与铁心体积及磁通密度紧密相关。电抗器运行时的损耗是一项重要的性能指标,损耗包括铁损、铜损和杂散损耗,在这些运行损耗中,除绕组的电阻损耗外,其余损耗都是由磁通产生的,因此通过改变铁心结构来控制磁路方向,对设计计算损耗具有重要意义。

在用有限元法分析可控电抗器的电磁场问题时,如果采用载流线圈模型,需要把线圈的电流密度(已知线圈中的电流分布情况)作为输入量,这种电流源供电模型不能精确地模拟实际的电磁设备。实际应用中,已知条件是输入电压,该问题实际是电压源激励的问题,需要把与绕组相联的外电路的电路方程作为有限元方程的约束方程,用以确定由于加源电压和电流而在电路中引起的电压和电流分布。这样建立的模型为电磁-电路耦合模型,该模型用经过改进的基于节点的分析方法来模拟电路分析,将电路与线圈或块状导体直接耦合来精确地模拟可控电抗器模型,电路和电磁区域通过一个或一组共用节点连接起来。有限元模型为电路提供必要的绕组电阻与电感,作为线圈或块状导体在电路中的阻抗^[10-12]。

本文在 ANSYS 中建立了精确的样机 2-D 场路耦合模型。该场路耦合模型将电磁场方程和电磁装置所满足的电路方程直接耦合起来,反映了磁阀可控电抗器实际的电磁瞬态过程。为磁控电抗器铁芯磁路优化分析提供了准确的仿真模拟平台。

2. 耦合场分析

耦合场分析是指在有限元分析的过程中考虑了两种或者多种工程学科(物理场)的交叉作用和相互影响(耦合)。例如压电分析考虑了结构和电场的相互作用:它主要解决由于所施加的位移载荷引起的电压分布问题,反之亦然。其他的耦合场分析还有热-应力耦合分析,热-电耦合分析,流体-结构耦合分析,磁-热耦合分析和磁-结构耦合分析等等。

耦合场分析的过程依赖于所耦合的物理场,目前耦合场分析的方法有顺序耦合和直接耦合。顺序耦合方法包括两个或多个按一定顺序排列的分析,每一种属于某一物理场分析。通过将前一个分析的结果作为载荷施加到第二个分析中的方式进行耦合。典型的例子是热-应力顺序耦合分析,分析流程图如图 1,热

分析得到的节点温度作为体载荷施加到随后的结构分析中去。对于多场的相互作用非线性程度不是很高的情况,顺序耦合分析更灵活有效。直接耦合方法只包含一个分析,使用包含多场自由度的耦合单元。当耦合场之间的相互作用是高度非线性时,直接耦合具有优势,如环路-电磁分析等。

在仿真分析时,两种耦合场分析方法的主要应用场合为:

- 1) 顺序耦合法比较适用于单向顺序耦合;而直接耦合法比较适用多个物理分析间双向或迭代耦合;
- 2) 在顺序耦合法中,不同的物理分析将使用不同的文件名,便于后处理;在直接耦合法中,可以同一个文件中通过读入不同的物理环境,便可进行每一个物理环境后处理;
- 3) 在顺序耦合法中,在两个物理环境分析之间改变模型及其它参数才能进行下一步运算;在直接耦合法中,可以一次性将运算过程中需要的物理环境文件设置好,开始求解后机器自动运行,直到全部求解完成^[13]。

3. 磁控电抗器场间耦合分析

在磁阀式可控电抗器的耦合物理场仿真环境中,应用“集总”电阻、电源、电容和电感这类器件描述电气装置,应用等效的电感和电阻描述磁装置。在 ANSYS 软件中,电路建模器(Circuit Builder)可以方便地建立为磁装置分析的电路单元。

在进行电磁-电路耦合分析时,采用一般电路单元(CIRCU124)与 2-D 8 节点磁单元(PLANE53)。

在把电路与 2-D 轴对称有限元模型绞线圈源耦合到一起时,通过外电路给线圈施加电压或电流载荷。

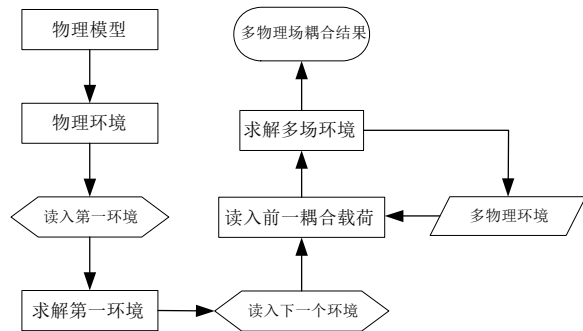


Figure 1. Flow chart for analysis of sequence coupled physical field
图 1. 顺序耦合物理场分析流程图

耦合是通过使用 PLANE53 绞线圈单元的一个节点作为 CIRCU124 绞线圈单元的 K 节点来完成的^[13-15]。如图 2 所示。

电路和电磁区域的自由度 CURR(电流)和 EMF(电动势降)需耦合在一起。CURR 表示线圈每匝的电流, EMF 表示通过线圈终端的电势降, 需要每一个自由度未知数是单值的。这样, 必须耦合线圈有限元区域所有节点的 CURR 自由度和 EMF 自由度。这样需要进行如下步骤的操作:

- 1) 创造 CIRCU124 绞线圈电路单元(KEYOPT(1)=5);
- 2) 创造有限元区域带有合适自由度选项的 PLANE53 绞线圈单元(KEYOPT(1)=3), 定义线圈实常数;
- 3) 把 CIRCU124 绞线圈单元的 K 点与有限元模型中线圈区域中的任意一个节点连接到一起;
- 4) 选择 PLANE53 线圈单元的所有节点, 然后耦合它们的 CURR 自由度和 EMF 自由度。

4. 磁控式电抗器有限元分析

由于可控电抗器为电压源激励, 在用有限元方法分析其电磁场问题时, 采用场路耦合方法, 建立导体电流、感应电动势与外施激励的关系方程, 以确定电流和电压的分布。由于可控电抗器铁心内的电磁场来源于线圈中的电流, 将电流未知化, 更为符合可控电抗器的实际运行情况。

可控电抗器场路耦合的线圈电路方程为:

$$[U] = [E] - [R][i] - [L] \frac{\partial [i]}{\partial t} \quad (1)$$

式中, $[U]$ 为线圈节点电压; $[E]$ 为线圈感应电动势; $[R]$ 为线圈电阻; $[L]$ 为线圈电感。

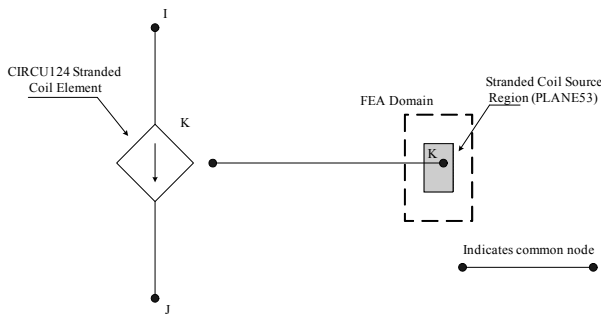


Figure 2. 2-dimension electric circuit coupled coil
图 2. 2-D 电路耦合绞线圈

线圈的感应电动势为:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d\left(n \int_S B dS\right)}{dt} = -\frac{d\left(n \int_{\Gamma} A dl\right)}{dt} = -n \int_{\Gamma} \frac{\partial A}{\partial t} dl \quad (2)$$

如果每匝线圈长度为 l_1 , 线圈剖分区域有 N_0 个剖分单元, 则线圈的平均感应电动势为:

$$\begin{aligned} E &= -\frac{1}{S} \int_S e dS = -\frac{n}{S} \int_S \left(\int_{\Gamma} \frac{\partial A}{\partial t} dl \right) dS = -\frac{nl_1}{S} \frac{\partial}{\partial t} \int_S A S \\ &= -\frac{nl_1}{S} \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{i=1}^{N_0} A_{xi} g_i \right) \\ &= -\frac{nl_1}{S} \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{i=1}^{N_0} (A_{xi} + A_{yi} + A_{zi}) \cdot g_i \right) \\ &= -\frac{g_i nl_1}{S} \sum_{i=1}^{N_0} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} A_{xi} \\ A_{yi} \\ A_{zi} \end{bmatrix} = [C_e] \frac{\partial [A]}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $[C_e]$ 为磁位 - 电势耦合的系数矩阵。

则可控电抗器的电路方程为:

$$[U] = [C_e] \cdot \frac{\partial [A]}{\partial t} - [R][i] - [L] \frac{\partial [i]}{\partial t} \quad (4)$$

如果忽略掉载流线圈的涡流, 将式(1)至式(4)联立, 便可得到场路耦合的矩阵方程^[16]:

$$\begin{cases} [S] \cdot [A] + [K] \cdot [i] = [0] \\ [U] = [C_e] \cdot \frac{\partial [A]}{\partial t} - [R][i] - [L] \frac{\partial [i]}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

在线圈与块状导体中, 有限元区域中线圈上的所有节点的电流自由度和电动势自由度都分别耦合起来。

5. ANSYS 场路耦合模型建立

根据现有的工业样机, 建立磁阀式可控电抗器的场路耦合模型。磁阀式可控电抗器激励为工频电压激励, 建立自由空间中的 2-D 磁阀式可控电抗器模型。场路耦合模型的建立分两步开展:

首先在 ANSYS 平台创建物理环境, 主要包括过滤图形界面、定义工作标题、定义单元类型选项、设置电磁单位制、定义材料特性的几个部分, 在文献 [16] 中有详细介绍。本文主要介绍在 ANSYS 中建立 380 V/13A 实验样机场路耦合模型的方法, 这主要包括建立模型、赋予特性、划分网络三个部分。

本文所模拟的磁控电抗器本体如图 3 所示, 额定

工作电压为 380 V，额定工作电流为 13 A。其中 L_1 、 L_3 、 L_4 、 L_6 为工作绕组， L_2 与 L_5 为控制绕组。绕组分之所以分为六部分是为了用来扩展实验的目的，这样可以实现工作绕组的任意串并联，而且还可以用于自励磁控电抗器的实验。图 4 为依照试验样机尺寸在 ANSYS 环境中建立的模型。

随后设置网格密度：根据有限元分析理论，并考虑现有计算机的运算速度及模型不同部分的精度要求，设置 MCR 本体部分每厘米 5 个有限元划分单元，空气部分每厘米 2 个有限元划分单元，有限元类型为三角形格式，并且采用自由划分，划分后的模型如图 5 所示。

所建立的 MCR 样机模型电路部分单元如图 6 所示，其中，V1 和 I1 分别为交流电压源和直流电流源，N1、N2、N11、N12、N7、N8、N5、N6 为交流工作线圈，其中 N1、N2 为左上线圈的两个剖面，N11、N12 为右下线圈的两个剖面，N7、N8 为右上线圈的两个剖面，N5、N6 为左下线圈的两个剖面，各线圈的两个剖面均满足电流大小相等、方向相反。R1、R11、R7、R5 为四个线圈的电阻，均为 0.6 欧姆。N3、N4、N9、N10 为直流控制线圈，N3 和 N4、N9 和 N10 各为同一线圈的两个平面，R3、R9 为两线圈的电阻，也为 0.6 欧姆^[17-19]。

6. 场路耦合模型仿真结果

在磁阀可控电抗器工作时，电抗器的铁心同时被交直流磁场磁化，铁心的磁工作状态覆盖了基本磁化曲线中不饱和区以及饱和区的很大范围。这种情况下的动态磁回线不再是对称的，利用基本磁化曲线不能表示同时有交流与直流激磁的铁心特性，为了计算和分析方便，这种激磁情况的磁特性以交直流同时磁化曲线族 $H_m = f(H_m, H_y)$ 表示。对 0.35 mm 冷轧无取向硅钢片的 B-H 曲线数学模型函数 $H = \phi(B)$ 拟合时，寻找如下所示的目标函数，分子、分母分别为多项式^[4]。

$$H = \phi(B) = \frac{\sum_{i=0}^n a_i B^i}{B_n + \sum_{j=0}^{n-1} b_j B^j} \quad (6)$$

为了确定目标函数的系数 a_i 和 b_j ，采用最小二乘

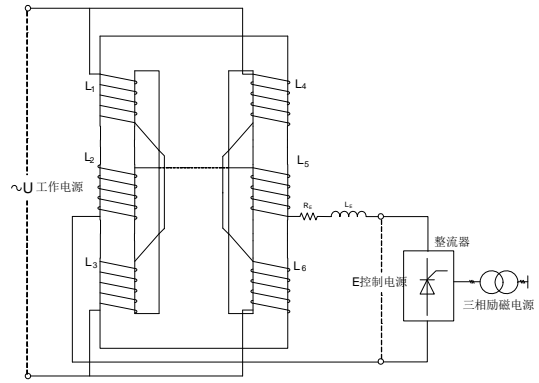


Figure 3. 380 V/13A MCR prototype connection diagram
图 3. 380 V/13A 实验样机接线图

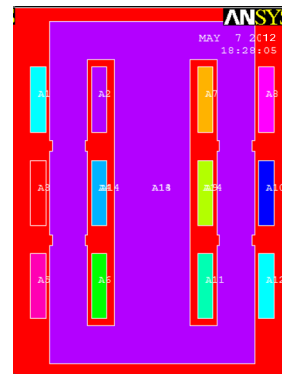


Figure 4. 380 V/13A MCR prototype simulation model in ANSYS platform
图 4. 380 V/13A 实验样机 ANSYS 模型

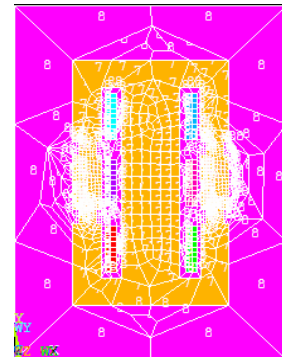


Figure 5. Finite element model of the prototype dissected by ANSYS

图 5. 经过 ANSYS 剖分的样机有限元模型

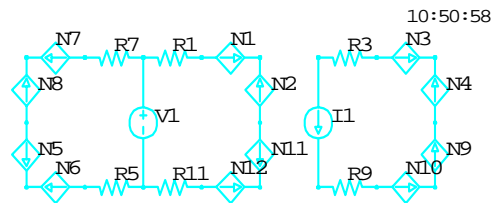


Figure 6. Circuit part of field-circuit coupled model
图 6. 场路耦合电路单元

方标准。进行有理分式拟合后得到目标函数：

$$H = \phi(B) = \frac{a_0 + a_1B + a_2B^2 + a_3B^3}{b_0 + b_1B + b_2B^2 + b_3B^3} \quad (7)$$

式中： $a_0 = 14.14$ ， $a_1 = 262.8$ ， $a_2 = -269.6$ ， $a_3 = 69.45$ ， $b_0 = 9.709$ ， $b_1 = -7.001$ ， $b_2 = -0.8974$ ， $b_3 = 1$ 。

对于交直流励磁共同作用下的磁阀可控电抗器，其铁心内部磁感应强度 B 为直流磁感应强度 B_0 与交流磁感应强度 B_1 之和，即 $B = B_0 + B_1 = B_0 + B_m \sin \omega t = 1.3 + 0.18 \sin \omega t$ (其中 $\omega = 2\pi f$ ， $f = 50 \text{ Hz}$)。0.35 mm 冷轧无取向硅钢片的基本磁化曲线关系为：

$$H = \phi(B) = \frac{a_0 + a_1B + a_2B^2 + a_3B^3}{b_0 + b_1B + b_2B^2 + b_3B^3} \quad (8)$$

$$= \frac{14.14 + 262.8B - 269.6B^2 + 69.45B^3}{9.709 - 7.001B - 0.8974B^2 + B^3}$$

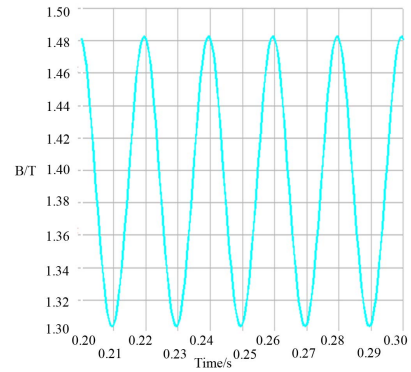
根据式(8)，可以得到磁场强度 H 的最大值与最小值分别为 1350 A/m 和 920 A/m。基于所建的磁阀可控电抗器场路模型，仿真所得到的 B 和 H 在 0.2 s~0.3 s 内的变化如图 7 所示。

比较图 3 和图 4 铁心内部磁感应强度与磁场强度示意图，铁心内部磁感应强度 $B = B_0 + B_1 = B_0 + B_m \sin \omega t = 1.3 + 0.18 \sin \omega t$ 最大与最小值分别为 1.3T 与 1.48T。同样，磁场强度 $H = H_0 + H_1 = H_0 + H_m \sin \omega t = 920 + 430 \sin \omega t$ 最大值和最小值分别为 920 A/m 和 1350 A/m。对小截面的磁感应强度及磁场强度的解析值与仿真值对比分析见表 1。

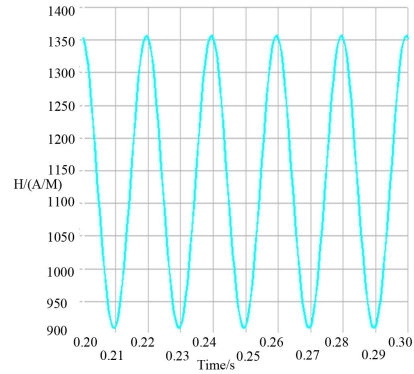
从表 1 可以看出，磁场强度的解析值与仿真值存在着误差，其最大值与最小值的误差分别为 3.56% 与 0.7%。此误差产生的原因在于：1) 解析表达式是由基本磁化曲线上离散点作曲线拟合得到，拟合曲线与实际曲线存在误差在情理之中。2) ANSYS 仿真中铁心内部每一个单元磁感应强度和磁场强度都不尽相同，所观察的单元不同，势必带来磁场强度的不同。但 3.56% 与 0.7% 的误差在可接受范围内，符合实际工程分析需求，该场路耦合模型有其应用价值。

7. 结论

本文首先对 380 V/13A 磁控电抗器样机耦合物理场进行了理论分析。基于有限元分析理论，在 ANSYS 中建立了精确的样机 2-D 场路耦合模型。该场路耦合



(a) 小截面磁感应强度 B 变化



(b) 小截面磁场强度 H 变化

Figure 7. Simulation results of field-circuit model
图 7. 场路耦合模型仿真结果

Table 1. Comparison of electric magnetic induction intensity B and magnetic field intensity H for magnetic valve
表 1. 铁心小截面处磁感应强度 B 与磁场强度 H 比较

物理量	范围	解析式结果	仿真结果	误差
磁感应强度 B (T)	最大值	1.48	1.48	0
	最小值	1.30	1.30	0
磁场强度 H (A/m)	最大值	1398	1350	3.56%
	最小值	927	920	0.7%

模型将电磁场方程和电磁装置所满足的电路方程直接耦合起来，反映了磁控电抗器实际的电磁瞬态过程。根据建立的 2-D 场路耦合模型，对小截面的磁场强度与磁感应强度进行了计算，仿真结果与理论分析基本相符，验证了磁路耦合仿真方法的正确性。

参考文献 (References)

- [1] 冯桥. 交流可控电抗器磁场的数值分析与控制电路设计[D]. 浙江大学, 2002.
- [2] 田铭兴, 励庆孚. 变压器式可控电抗器的磁场和参数计算[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 656-658.
- [3] 张榴晨, 徐松. 有限元法在电磁计算中的应用[M]. 北京: 中

- 国铁道出版社, 1996.
- [4] R. Mehasni, M. Feliachi and M. E. Latreche. Effect of the magnetic dipole interaction on the capture efficiency in open gradient magnetic separation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(8): 3488-3493.
- [5] 金建铭, 王建国, 译. 电磁场有限元方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [6] 尹忠东, 刘虹, 陈柏超, 陈维贤. 磁阀式可控电抗器的研究[J]. *变压器*, 1998, 35(7): 1-4.
- [7] 刘虹. 裂芯式可控电抗器研究[D]. 武汉水利电力大学, 1995.
- [8] 周腊吾. 新型特高压可控电抗器的理论及应用[D]. 湖南大学, 2008.
- [9] 刘涤尘, 陈柏超, 田翠华等. 新型可控电抗器在电网中的应用与选型分析[J]. *电网技术*, 1999, 24(2): 56-59.
- [10] Z. Q. Wang, Z. D. Yin, L. X. Zhou, Z. J. Wang and L. R. Ma. Study on controllable reactor magnetic structure and loss based on ANSYS. In *Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Xi'an, May 2009, 201-205.
- [11] 潘启军, 马伟明, 赵治华, 康军. 磁场测量方法的发展及应用[J]. *电工技术学报*, 2005, 20(3): 7-13.
- [12] Z.-J. Zhang, S.-Y. Ren and X.-X. Zhou. FEM analysis of shielding effectiveness of magnetic shield of comparator by ANSYS program. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Ottawa, 2002.
- [13] H. W. Dommel (加拿大), 著, 李永庄, 林集明, 曾昭华, 译. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [14] 卢铁兵, 冯晗, 崔翔. 基于上流有限元法对高压直流输电线路下合成电场的研究[J]. *电网技术*, 2008, 32(2): 13-16.
- [15] Z. Q. Wang, Z. D. Yin and Z. Y. Xie. Study on magnetic circuit structure of magnetic valve controllable reactor based on ANSYS. In *Proceedings of 2009 International Conference on Energy and Environment Technology*, Guilin, October 2009, 317-320.
- [16] 颜威利, 杨庆新, 汪友华. 电气工程电磁场数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [17] 潘艳霞. 新型磁控开关型故障限流器研究[D]. 上海交通大学, 2008.
- [18] 周勤勇, 郭强, 卜广全, 班连庚. 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. *电机工程学报*, 2007, 27(7): 1-6.
- [19] M. X. Tian, Q. F. Li. A controllable reactor of transformer type. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(4): 1718-1726.