

一种双功能变压器及其分析

李晓明

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 目前, 电力变压器与磁控电抗器这两种设备都是分别制造, 这两种设备分别有各自的铁芯, 占用面积比较大。提出一种双功能变压器, 用一台磁控电抗器的铁芯, 同时实现变压器与磁控电抗器两种功能。双功能变压器占用面积比较小。用 Matlab 仿真软件中的 Simulink 工具箱构建双功能变压器仿真模型, 对双功能变压器进行仿真分析。结果表明: 不论变压器铁芯饱和度的变化是多少, 引起变压器漏抗的变化不大于 7%。提出的双功能变压器可同时实现变压器与磁控电抗器两种功能。变压器模块运行对磁控电抗器模块工作影响很小; 磁控电抗器模块运行对变压器模块工作影响很小。

关键词: 双功能变压器; 变压器; 磁控电抗器; 仿真分析; Matlab

Double function transformer and its analysis

LI Xiaoming

(School of Electrical Engineering, Shandong Univesity, Jinan 250061, China)

Abstract: At present, the power transformer and the magnetically controllable reactor (MCR) are manufactured respectively, two devices have their own core respectively. Two devices occupied area is larger. The double function transformer which realizes the transformer and MCR two functions with a MCR core is proposed. The double function transformer occupied area is small. A simulation model based on MATLAB/Simulink is built and the double function transformer is simulated. The results show that no matter how much the change of the transformer core saturation is, the change of the transformer leakage reactance caused by it is not greater than 7%. The proposed double function transformer can realize transformer and MCR two functions at the same time. Transformer module operation has little impact on MCR module work; little impact on the transformer module working caused by MCR module run.

Key words: double-function transformer; transformer; magnetically controllable reactor; simulation analysis; Matlab

0 引言

电抗器在电力系统中有广泛的应用。在一部分应用领域, 电抗器的电抗值固定不变; 在许多应用领域, 需要电抗值能随着电力系统运行方式的变化而改变。磁控电抗器 (Magnetically Controllable Reactor, MCR) 是一种电抗值可以连续调节的电抗器^[1]。磁控电抗器通过连续调节闭环铁芯上直流线圈中直流电流的大小, 连续调节闭环铁芯的饱和程度, 实现连续调节闭环铁芯上交流线圈(电抗线圈)电抗值的大小。磁控电抗器应用于电力系统无功潮流连续调节与控制, 工频过电压抑制等领域^[2-11]。

电力变压器可把高电压变换为低电压, 也可把低电压变换为高电压。

以往, 电力变压器、磁控电抗器这两种设备都

是分别研究, 分别制造。两种设备分别都有较大的铁芯^[12-16]。如果一座变电站同时需要电力变压器、磁控电抗器这两种设备, 则两台设备总体占地面积大、总体铁芯重、总体价格高。

本文提出一种双功能变压器, 在一台磁控电抗器铁芯的基础上, 同时实现变压器与磁控电抗器两种功能。变压器运行与调节过程对磁控电抗器工作影响很小; 磁控电抗器运行与调节过程对变压器工作影响很小。并对这种双功能变压器进行仿真分析。

1 双功能变压器理论基础

电力变压器运行时, 变压器铁芯是不饱和的。磁控电抗器工作时, 磁控电抗器铁芯是饱和的。如果在一台磁控电抗器铁芯的基础上, 同时实现变压器与磁控电抗器两种功能, 变压器铁芯处于饱和状

态时,对变压器功能就必须没有负面影响,或者负面影响很小。

变压器的一个重要参数是漏磁的大小,工程上漏磁的大小用漏抗(或短路电压)的大小表述。所以,需要研究变压器铁芯处于不同饱和状态时,变压器漏抗的变化大小。为此,用 Matlab 仿真软件中的 Simulink 工具箱,构建变压器短路电压测量的仿真实验模型如图 1 所示。具体参数如下: T1 变压器容量=707.2 kVA,线圈 $L_1=10\ 000\ \text{V}$, $L_2=10\ 000\ \text{V}$, $L_3=10\ 000\ \text{V}$; T1 变压器线圈 $R=0.002\ \text{pu}$, $L=0.08\ \text{pu}$ 。T2 变压器参数与 T1 变压器相同。

图 1 中,为了避免交流磁通对直流系统产生影响,两台变压器一次交流线圈正向串联后连接交流电源,两台变压器二次交流线圈分别短接,两台变压器直流线圈反向串联后连接直流电源。

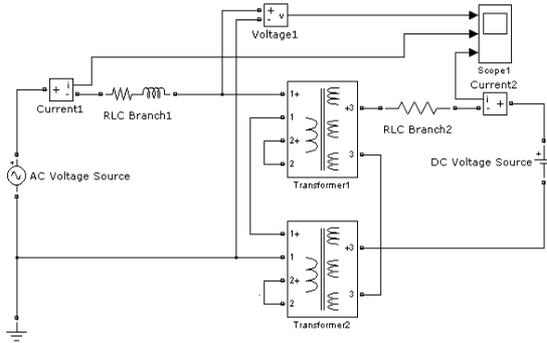


图 1 变压器铁芯饱和 Simulink 仿真模型

Fig. 1 Simulink model of the saturation of the magnetic core

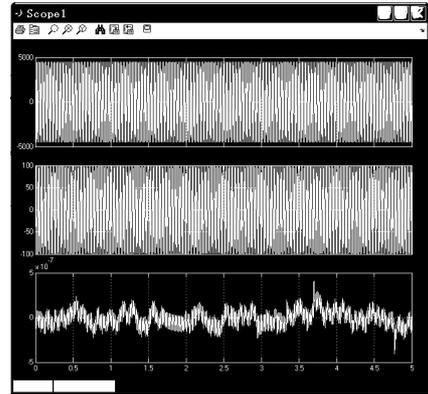
在直流电流等于零的条件下,测量得到短路电压 voltage1 波形、输入的交流电流 current1 波形、直流电流 current2 波形如图 2(a)所示。线圈 L1 输入额定电流 70.72 A(电流峰值 100 A)时,示波器显示电压峰值为 4 514 V。

计算: $\frac{4\ 514}{2\sqrt{2}} = 1\ 596$, 可知变压器短路电压为

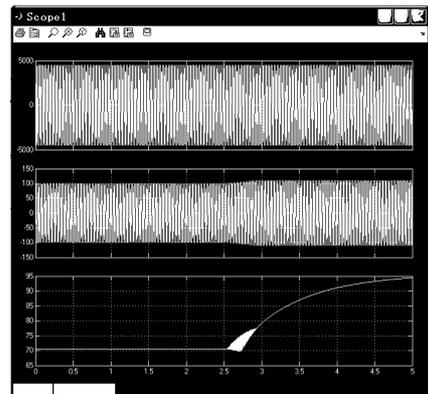
15.96%。

输入直流电流,测量得到短路电压 voltage1 波形、输入的交流电流 current1 波形、直流电流 current2 波形如图 2(b)所示。从图 2(b)可以看出,直流电流在 2.5 s 以前,直流电流 71 A,线圈 L1 输入额定交流电流 70.72 A(电流峰值 100 A),电压峰值 4 514 V。在 2.5 s 以前,变压器铁芯未饱和,线圈 L1 的激磁电抗使激磁电流线性上升,铁芯中性线上升的磁通在线圈 L2 产生直流电压,并在线圈 L2 产生直流电流,线圈 L2 的直流电流使直流线圈 L3 产生 71 A 直流电流。直流电流在 2.5 s 以后,直流电流从 100 A 开始上升,线圈 L1 输入电流峰值上升

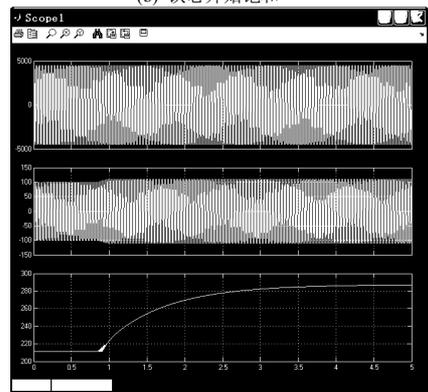
至 107 A,电压峰值 4 514 V 不变。电压峰值 4 514 V 不变是由于系统交流电源电压不变,系统阻抗 RL Branch1 很小所致。线圈 L1 输入交流电流峰值上升至 107 A,是由于变压器铁芯饱和,变压器漏抗变小所致。变压器漏抗减小 7%。



(a) 铁芯不饱和



(b) 铁芯开始饱和



(c) 铁芯深度饱和

图 2 电压、电流 Simulink 仿真波形

Fig. 2 Simulative waveforms of the voltage and currents

输入直流电流 285 A,测量得到短路电压 voltage1 波形、输入的交流电流 current1 波形、直流电流 current2 波形如图 2(c)所示。从图 2(c)可以看出,直流电流在 0.8 s 以前,直流电流峰值为 210 A,线圈

L1 输入额定电流为 70.72 A(电流峰值 100 A), 电压峰值为 4 514 V。在 0.8 s 以前, 变压器铁芯未饱和, 线圈 L1 的激磁电抗使激磁电流线形上升, 铁芯中线形上升的磁通在线圈 L2 产生直流电压, 并在线圈 L2 产生直流电流, 使直流线圈 L3 产生 210 A 直流电流。直流电流在 0.8 s 以后, 直流电流峰值从 100 A 开始上升, 线圈 L1 输入电流峰值上升至 107 A, 电压峰值 4 514 V 不变。电压峰值 4 514 V 不变是由于系统交流电源电压不变, 系统阻抗 R_L Branch1 很小所致。线圈 L1 输入电流峰值上升至 107 A, 是由于变压器饱和, 变压器漏抗变小所致。变压器铁芯深度饱和, 变压器漏抗变小 7%。

从上述分析可知, 不论变压器铁芯轻度饱和、中度饱和、还是深度饱和, 变压器漏抗变小 7% 后不再减小。

2 双功能变压器结构与工作原理

双功能变压器结构如图 3 所示, 铁芯 5 既是变压器线圈的铁芯, 也是磁控电抗器的铁芯, 铁芯 5 按照磁控电抗器的铁芯设计。端子 1、2 为双功能变压器一次线圈的两端, 端子 3、4 为双功能变压器二次线圈的两端。线圈 L5、L6、L7、L8、L9, 晶闸管 D1、D2, 二极管 D3, 晶闸管控制电路 6, 共同构成磁控电抗器直流电流产生与控制机构。

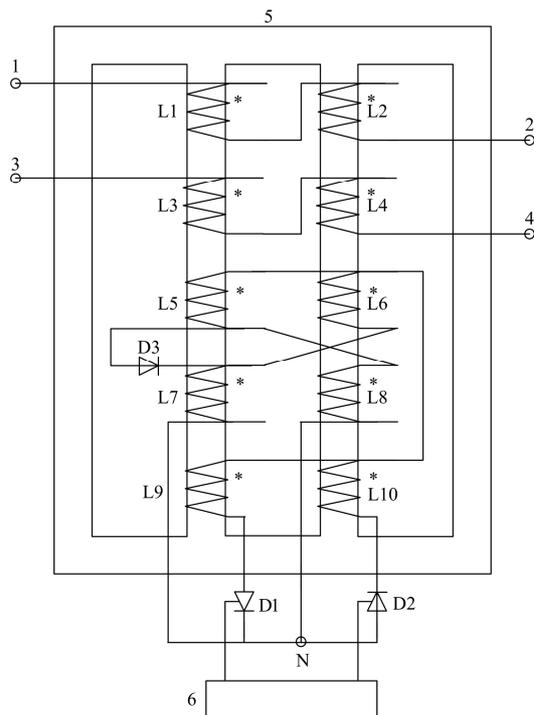


图 3 双功能变压器结构图

Fig. 3 Structure of the double function transformer

交流线圈 L1 与交流线圈 L2 的匝数相等, 交流线圈 L1 与交流线圈 L2 正向串联作为变压器一次线圈。交流线圈 L3 与交流线圈 L4 的匝数相等, 交流线圈 L3 与交流线圈 L4 正向串联作为变压器二次线圈。交流线圈 L1 与交流线圈 L3 的匝数比等于变压器一次线圈与二次线圈的变比。一次线圈与二次线圈实现双功能变压器的变压器功能。

交流线圈 L5、交流线圈 L6、交流线圈 L7、交流线圈 L8 的匝数相等。直流线圈 L9 与直流线圈 L10 的匝数相等。通过设计直流线圈匝数与交流线圈匝数的比例, 使晶闸管 D1、D2 在截止条件下, 晶闸管 D1、D2 两端获得 1% 系统交流额定电压。

晶闸管 D1 和晶闸管 D2 的触发端子分别连接控制电路 6, 控制电路 6 控制晶闸管 D1 和晶闸管 D2 触发角的大小, 实现连续调节晶闸管 D1 和晶闸管 D2 整流量的大小。

双功能变压器一次线圈接入额定电压为 U_1 的电力系统。交流线圈 L1 与交流线圈 L2 有励磁电流流通, 在闭环铁芯 5 中产生交流磁通, 该交流磁通在交流线圈 L3 与交流线圈 L4 中产生感生电动势, 如果交流线圈 L3 与交流线圈 L4 构成的二次线圈连接负载, 则二次线圈为负载提供负荷电流。一次线圈与二次线圈实现双功能变压器的变压器功能。

交流线圈 L1 与交流线圈 L2 有励磁电流流通, 在闭环铁芯 5 中产生交流磁通; 该交流磁通在交流线圈 L5, 交流线圈 L6, 交流线圈 L7, 交流线圈 L8, 直流线圈 L9, 直流线圈 L10 中产生感生电动势, 由于直流线圈 L9 的匝数与交流线圈 L5 匝数的比例关系, 晶闸管 D1 和晶闸管 D2 两端有 1% U_1 交流额定电压存在。

当控制电路 6 控制晶闸管 D1 和晶闸管 D2 全截止时, 晶闸管 D1 和晶闸管 D2 整流电路不工作, 直流线圈 L9 和直流线圈 L10 中的直流电流等于零。双功能变压器一次线圈有最大电抗值 Z_{\max} 。

当控制电路 6 控制晶闸管 D1 和晶闸管 D2 全导通时, 流过直流线圈 L9 与直流线圈 L10 的直流电流达到最大设计值。双功能变压器一次线圈有最小电抗值 Z_{\min} 。

控制电路 6 控制晶闸管 D1 和晶闸管 D2 整流量的大小, 可控制直流线圈 L9 和直流线圈 L10 中直流电流的大小, 实现控制双功能变压器一次线圈电抗值的大小。控制电路 6 连续控制晶闸管 D1 和晶闸管 D2 整流量的大小, 可连续控制直流线圈 L9 和直流线圈 L10 中直流电流的大小, 实现双功能变压器一次线圈电抗值的连续调节, 双功能变压器一次线圈电抗值在最大值与最小值之间连续调节、变化。

磁控电抗器直流电流产生与控制机构与一次线圈(二次线圈)没有直接的电气连接,所以,变压器功能不会影响磁控电抗器的电抗值。反之,磁控电抗器直流电流不论多大,对变压器漏抗的影响也不会大于7%。

图3中,D3为续流二极管,续流二极管的分析是公共知识,不再赘述。可以在忽略续流二极管D3的条件下,研究双功能变压器的基本工作原理。

3 双功能变压器仿真分析

用Matlab仿真软件中的Simulink工具箱,构建图3所示双功能变压器仿真模型如图4所示。具体参数如下:AC Voltage Source=10 000 V; T1 变压器容量=707.2 kVA,线圈 L1=5 000 V, L2=2 500 V, L3=2 000 V, L4=2 000 V, L5=3 900 V。T2 变压器参数与T1 变压器相同。

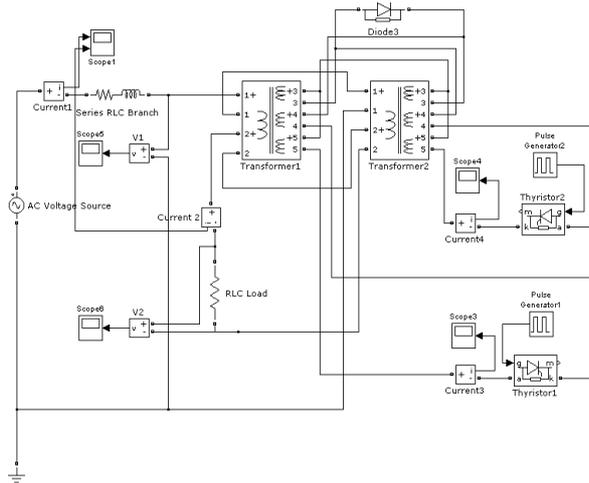


图4 双功能变压器 Simulink 仿真模型

Fig. 4 Simulink model of the double function transformer

在磁控电抗器直流电流等于零条件下,测量双功能变压器线圈L1的交流电流current1波形与线圈L2的交流电流current2波形如图5(a)所示。从图5(a)可以看出线圈L2的交流电流峰值约 2.8×10^2 A,线圈L1的交流电流峰值约 1.4×10^2 A。双功能变压器的一次线圈与二次线圈变比为2:1。该电流为有功电流。

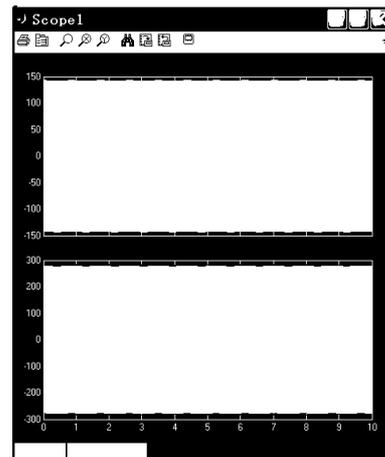
在变压器线圈L2的负载电流等于零条件下,测量磁控电抗器功能。测量双功能变压器线圈L1的交流电流波形与线圈L2的交流电流波形如图5(b)所示。磁控电抗器暂态响应时间为6s,6s以后线圈L1的交流电流峰值约为 1.4×10^2 A。该电流为无功电流。

线圈L2的负载与图5(a)的一样,磁控电抗器的状态与图5(b)的一样。测量双功能变压器线圈L1

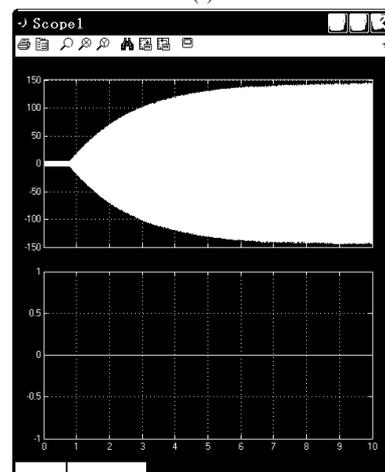
的交流电流波形与线圈L2的交流电流波形如图5(c)所示。可见,线圈L2的交流电流峰值约 2.8×10^2 A。图5(c)所示线圈L2的交流电流峰值与图5(a)所示线圈L2的交流电流峰值相同,该电流为有功电流。线圈L1的交流电流为有功电流与无功电流的综合值。磁控电抗器暂态响应时间为6s,6s以后线圈L1的交流电流峰值理论上应是 2.0×10^2 A,但是,图5(c)所示线圈L1的交流电流峰值是 1.75×10^2 A。对图5(c)所示线圈L1的交流电流波形进行放大,如图5(d)所示。从图5(d)可以看出,理论值与实际值不相符合的原因是:图5(c)线圈L1的交流电流中含有三次谐波,三次谐波把线圈L1的交流电流峰值削低了。如果滤除图5(c)、图5(d)中的三次谐波,线圈L1的交流电流峰值就可达到理论值 2.0×10^2 A。

双功能变压器减小高次谐波的方法有待进一步研究。

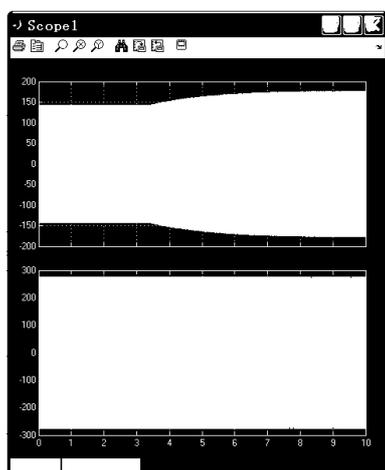
仿真说明,双功能变压器在一台磁控电抗器铁芯的基础上,可以同时实现变压器与磁控电抗器两种功能。变压器运行对磁控电抗器工作影响很小;磁控电抗器运行与调节对变压器工作影响很小。



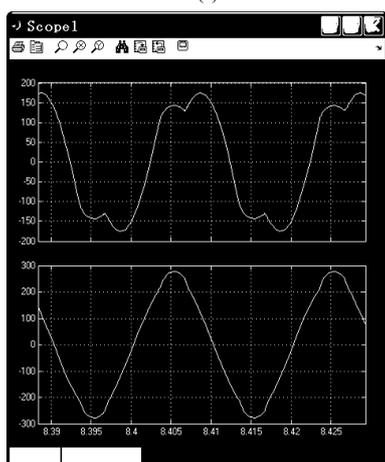
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 双功能变压器仿真实验电流波形

Fig. 5 Simulative waveforms of the double function transformer

4 总结

不论变压器铁芯饱和度的变化是多少,引起变压器漏抗的变化不大于 7%。双功能变压器在一台磁控电抗器铁芯的基础上,同时实现变压器与磁控电抗器两种功能。变压器运行对磁控电抗器工作影响很小;磁控电抗器运行与调节对变压器工作影响很小。

参考文献

- [1] 蔡宣三,高越农.可控饱和电抗器—原理、设计与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [2] 陈柏超,陈维贤.超高压可控电抗器限压特性及谐波分析[J].中国电机工程学报,1997,17(2):122-125,56.
CHEN Baichao, CHEN Weixian. Analyses of harmonics and overvoltage limitation characteristics of EHV controlled reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(2): 122-125, 56.
- [3] 黄晓胜,史欢,田翠华.基于磁控电抗器的无功电压

控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 99-102.

HUANG Xiaosheng, SHI Huan, TIAN Cuihua. Reactive power and voltage control based on MCR in substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 99-102.

- [4] LIU Haipeng, YIN Zhongdong, DUAN Shaomi. Magnetically controlled reactor tap ratio optimization research[J]. Advanced Materials Research, 2013: 805-806, 1017-1021.
- [5] 田铭兴,杨雪松,顾生杰,等.基于Matlab的磁饱和式可控电抗器的仿真模型参数及过渡时间分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 47-51.
TIAN Mingxing, YANG Xuesong, GU Shengjie, et al. Analysis of simulation model parameters and transition time based on MATLAB for magnetically-saturated controllable reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 47-51.
- [6] CHEN Xuxuan, CHEN Baichao, TIAN Cuihua, et al. Modeling and harmonic optimization of a two-stage saturable magnetically controlled reactor for an arc suppression coil[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2824-2831.
- [7] CHEN Xuxuan, CHEN Jianxun, CHEN Baichao. Harmonic optimization for the multi-stage saturable magnetically controlled reactor using particle swarm optimization algorithm[C] // Proceedings of the 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2014, October 20, 2014: 1804-1809.
- [8] 耿涛,赵金.改进低通滤波器的瞬时无功功率谐波电流检测方法[J].电力系统保护与控制,2009,37(6): 53-56.
GENG Tao, ZHAO Jin. Instantaneous reactive power theory harmonic detection method based on improved low-pass filter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 53-56.
- [9] 郑海涛,郑昕,吴兴全,等.大型并网风电场和光伏电站内动态无功补偿的应用技术分析[J].电力系统保护与控制,2014,42(16): 149-154.
ZHENG Haitao, ZHENG Xin, WU Xingquan, et al. Technical analysis of dynamic reactive power compensation equipment applied in large-scale grid connected wind power plant and photovoltaic substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 149-154.
- [10] 刘宝稳,李晓波.基于失谐量的消弧线圈跟踪调谐方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(5): 6-9.
LIU Baowen, LI Xiaobo. New type of automatic tuning arc-suppression coil based on detuning size[J]. Power

- System Protection and Control, 2013, 41(5): 6-9.
- [11] 付伟, 刘天琪, 李兴源, 等. 静止无功补偿器运行特性分析和控制方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 147-154.
- FU Wei, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static VAR compensator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 147-154.
- [12] 赵士硕, 尹忠东, 刘海鹏. 快速响应磁控电抗器的新结构与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 149-155.
- ZHAO Shishuo, YIN Zhongdong, LIU Haipeng. Physical design and control method of fast response magnetically controlled reactors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 149-155.
- [13] 魏云冰, 李涛, 张国亮, 等. 基于瞬时无功功率理论的磁控电抗器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 117-120.
- WEI Yunbing, LI Tao, ZHANG Guoliang, et al. A control method for the magnetic-valve controllable reactor based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 117-120.
- [14] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.
- XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.
- [15] 宋江保, 王贺萍, 张战永, 等. 三相磁阀式可控电抗器的分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 20-22.
- SONG Jiangbao, WANG Heping, ZHANG Zhanyong, et al. Analytical study of controllable reactor based on three-phase magnetism valve type[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 20-22.
- [16] 雷晰, 邓占锋, 徐桂芝, 等. 磁控型可控并联电抗器研究与实践[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊 1): 225-231.
- LEI Xi, DENG Zhanfeng, XU Guizhi, et al. Research and practice of magnetically controlled shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 225-231.

收稿日期: 2015-07-22

作者简介:

李晓明(1956-), 男, 副教授, 主要从事电力系统保护与控制、电力系统及其自动化的教学与研究工作。E-mail: lixm@sdu.edu.cn

(编辑 周金梅)