

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.04.030

基于双饱和变压器模型的磁控电抗器仿真新方法

娄宝磊¹, 李晓明²

(1. 国网技术学院, 济南 250002; 2. 山东大学电气工程学院, 济南 250061)

摘要: 磁控电抗器以其控制灵活、稳定、可靠、可连续调节工作电流等优势在电力系统中得到了广泛应用,但目前对其工作原理的仿真方法存在过于复杂和繁琐的问题。为此,提出了一种基于双饱和变压器模型的磁控电抗器仿真新方法,即采用2个独立的多绕组变压器模拟磁控电抗器的工作原理,通过MATLAB软件对此方法进行了仿真验证。研究表明:该方法直观简单,不用考虑电抗器结构尺寸等参数,并能仿真各绕组、晶闸管和二极管等元器件的电压、电流及各绕组的磁链;基波电流(标么值)仿真值与理论计算值的相对误差小于 $\pm 1\%$,证明了该方法的有效性。

关键词: 磁控电抗器; 变压器; 仿真; MATLAB; 基波电流

New Method for Simulation of Magnetically Controlled Reactor Based on Double Saturated Transformers Model

LOU Baolei¹, LI Xiaoming²

(1. State Grid China Technology College, Jinan 250002, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Magnetically controlled reactor(MCR)has been widely used in electric power system,which owes to its advantages of flexible control, stability, reliability and continuous adjusting of working current, etc. However, the simulation methods for working principle of MCR are too complex and tedious at present. In response to this problem, a new method for simulation of MCR based on double saturated transformers model is proposed in this paper, that is, two independent multi-winding transformers are adopted to simulate the working principle of MCR, which is verified by means of MATLAB software. Research results show that, the proposed method is intuitive, simple, and immune to structural parameters of MCR. The voltage and current of MCR components such as winding, thyristor, diode and so on, as well as the magnetic linkage of each winding, can be simulated using this method. Furthermore, the relative error between simulated and calculated per-unit values of the fundamental current is less than $\pm 1\%$, which proves the validity of the proposed method.

Key words: magnetically controlled reactor; transformer; simulation; MATLAB; fundamental current

0 引言

随着超高压长距离输电电网的发展,磁控电抗器在电力系统中得到了广泛的应用^[1-4]。磁控电抗器结构可靠,维护简单,具有补偿线路无功、限制工频过电压、平滑调节工作电流、增大系统的稳定性、提高输电能力等诸多优点^[5-8]。如何对磁控电抗器的工作原理进行有效的建模与仿真是磁控电抗器研究中的重点关注问题之一,国内外学者

在这方面做了一些研究工作^[9-10]。文[11-14]基于等效概念推导得到了磁控电抗器的简明数学模型,并利用 MATLAB 软件对磁控电抗器的等效模型进行了仿真分析,然而磁控电抗器的 MATLAB 等效简化模型存在准确性不足的问题,并且无法模拟出真实流过晶闸管、二极管的电流。文[15-16]通过分析磁控电抗器的工作特性,建立了它在各种不同状态下的数学模型,并采用 PSCAD 进行了建模与仿真分析,由于 PSCAD 主要是分析励磁暂态过程,故不能完整地模拟出磁控电抗器的工作

特性。文[17]分析了可控电抗器的磁场,采用Ansys软件对其磁场分布及损耗特性进行了仿真分析,并考虑电抗器结构尺寸的影响等问题。文[18]研究磁饱和和可控电抗器的5种工作状态并建立各状态函数方程,采用编程求解各状态方程实现电抗器仿真,编程仿真程序工作大且繁琐。综上所述,目前对磁控电抗器工作原理的仿真方法存在过于复杂和繁琐的问题。为此,文中提出了一种基于双独立饱和变压器模型的磁控电抗器仿真新方法,即采用2个独立的多绕组变压器模拟磁控电抗器的工作原理,并通过MATLAB软件对该方法进行仿真验证。

1 参数关系

单相磁控电抗器的原理示意图见图1。图1中:铁心1、铁心2的等效磁路长度为 l ;等效磁路截面积为 A ;绕组匝数为 $N_A=N_1+N_2$;工作电压为 U_{AN} ;额定工作频率为 f_N ;工作电流为 i_A ;电抗器的额定容量为 S_{AN} ;绕组触头比为 $\delta=N_2/N_A$; N_A 匝绕组电阻为 R_A ; N_1 匝绕组电阻 R_1 为 $(1-\delta)R_A$; N_2 匝绕组电阻 R_2 为 δR_A ; V_n 为晶闸管; V_D 为二极管。

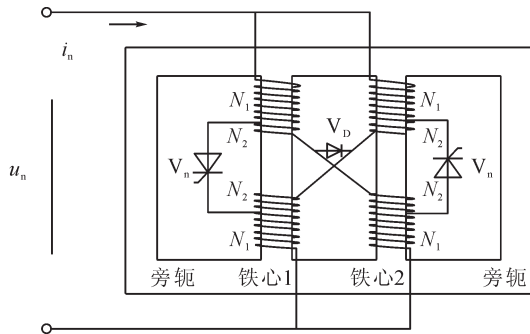


图1 磁控电抗器的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetically controlled reactor

文中采用双独立饱和变压器新分析法,变压器的参数满足关系。

1)变压器绕组电阻、额定电压、容量满足以下关系:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{(1-\delta)}{\delta}; \quad (1)$$

$$S_{1N}=S_{AN}(1-\delta)/4; \quad (2)$$

$$R_1=(1-\delta)R_A; \quad (3)$$

$$U_{1N}=U_{AN}(1-\delta)/2。 \quad (4)$$

式(1)–(4)中: U_{1N} 、 U_{2N} 分别为匝数 N_1 和 N_2 绕组的额定电压有效值; S_{1N} 为匝数 N_1 绕组的额定容量。

2)变压器铁心的磁饱和参数设置为^[19]

$$\psi = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} U_{AN}(1-\delta)}{4\pi f_N} & i_m=0 \\ \frac{\pi R_A(1+\delta)(1-\delta)\psi_{sm}}{2\sqrt{2}\delta U_{AN}} + \psi_s & i_m>0 \end{cases}。 \quad (5)$$

式(5)中: ψ_s 为铁心饱和磁链; i_m 为磁化电流。

2 建模与仿真

2.1 仿真模型

磁控电抗器的每个铁心及其绕组可以看作1个4绕组变压器,对于4绕组变压器可以用2个多绕组变压器模拟。采用MATLAB中多绕组变压器模拟磁控电抗器具有简单、直观的优点。MATLAB的仿真模型中提供了多绕组变压器模型(multi-winding transformer)。因此根据图1中所示的原理示意图,在MATLAB中仅仅采用2个多绕组变压器模型以及电源、晶闸管、二极管等模型便可以建立磁控电抗器的仿真模型。其中,2个完全一样的多绕组变压器模型是其核心模型。所建立的磁控电抗器仿真模型在形式上与图1所示磁控电抗器结构完全一致,直观简单,且图1中所有元器件的电压、电流的变化过程均可被仿真得出。

每一个多绕组变压器,变比设置为1:1,触头比值为100:1。不考虑漏磁,额定功率为60 MVA;频率为50 Hz,励磁阻抗为10 GΩ,变压器的额定电压为2 890 V;励磁电阻为0.002 3 Ω;铁心磁化饱和特性:磁化电流/磁链数据点为[0 0;0 1;1 2],构建的MATLAB仿真模型见图2。

触发器采用时间型脉冲发生器,工作周期与工作电源的周期相等,脉冲的延时 t 表示触发脉冲触发角,满足 $t=\alpha T/360^\circ$,参数设置见表1。

晶闸管采用默认参数设置;步长为0.001,选择可变步长求解器(variable-step)中的ode23tb,误差选择0.000 1。

2.2 仿真结果

磁控电抗器工作在10 kV正弦交流电压下,保持铁心的磁饱和特性不变,研究改变晶闸管的触发角时工作电流的变化。

1)当触发角为180°时,仿真结果见图3。从图3可以看出,工作电流幅值为0.003 47 A,接近于零,约等于控制电流幅值,波形呈现正弦波。原因是触发角为180°时,没有直流励磁电流,电抗器的电抗值非常大,工作电流非常小,不含有奇次谐波,只存在基波。

2)当触发角为0°时,仿真结果见图4。从图4可以看出,触发角为0°时,工作电流比触发角为45°、

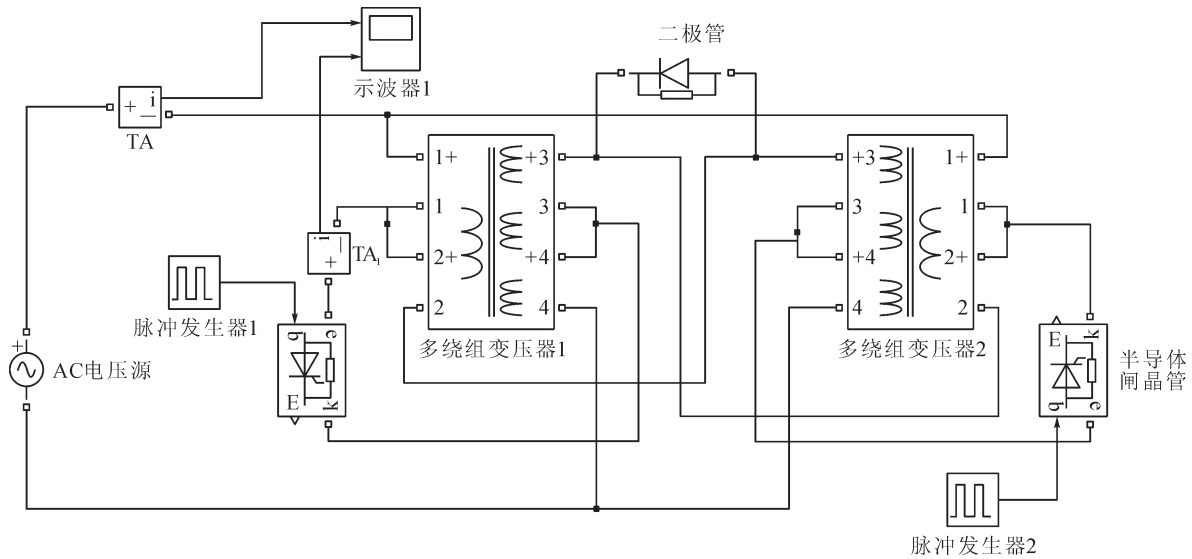


图2 磁控电抗器的 MATLAB 仿真模型

Fig. 2 MATLAB simulation model of magnetically controlled reactor

表1 脉冲发生器的参数

Table 1 Parameters of pulse generators

参数	脉冲发生器 1	脉冲发生器 2
幅值/V	1.000 0	1.000 0
脉冲周期/s	0.020 0	0.020 0
脉冲宽度/s	0.004 0	0.004 0
45°触发/s	0.002 5	0.012 5
90°触发/s	0.005 0	0.015 0
135°触发/s	0.007 5	0.017 5
180°触发/s	0.010 0	0.020 0

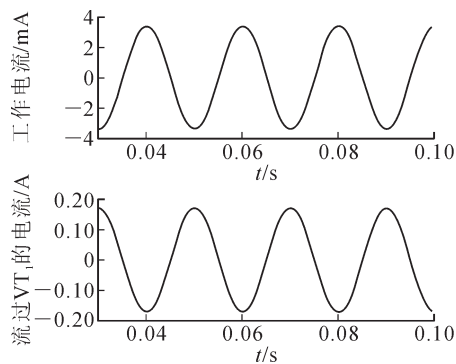


图3 触发角为 180°时磁控电抗器的工作电流和流过晶闸管 1 的电流

Fig. 3 Working current of magnetically controlled reactor and current flowing through thyristor 1 in 180° trigger

90°、135°时大,并且波形按照正弦波进行波动。因为在触发角为 0°时,控制电流达到最大值 0.003 47 A,铁心完全工作在饱和区,等效电抗器的电抗值为最小,工作电流达到最大值 568.1 A;此时铁心的磁导率为线性段,工作电流没有畸变,所以应该为正弦波,符合图 4 所示的波形。

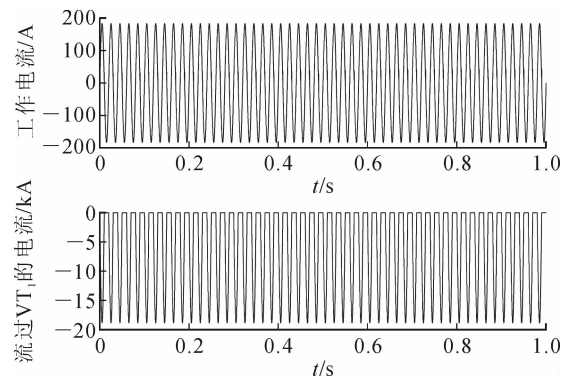


图4 触发角为 0°时磁控电抗器的工作电流和流过晶闸管 1 的电流

Fig. 4 Working current of magnetically controlled reactor and current flowing through thyristor 1 in 0° trigger

3)当触发角为 45°时,仿真结果见图 5。从图 5 可以看出,触发角为 45°时,工作电流比触发角为 90°、135°时大,比触发角为 0°时小,波形不是完整的正弦波,因为铁心工作在部分饱和段,所以电流波形含有谐波。

4)当触发角为 90°时,仿真结果见图 6。从图 6 可以看出,触发角为 90°时,工作电流比触发角为 135°时大,比触发角为 0°、45°时小;波形的畸变率比触发角为 135°时大,比触发角为 0°、45°时小。原因是此时控制电流比触发角为 0°、45°时小,铁心工作饱和段部分比触发角为 0°、45°时少,等效电抗比触发角为 0°、45°时大,所以畸变率和工作电流比触发角为 0°、45°时小。

5)当触发角为 135°时,仿真结果见图 7。

在工作绕组施加正弦电压的情况下,当 α 较大时,控制电流较小,由于铁心的非线性,工作绕组的

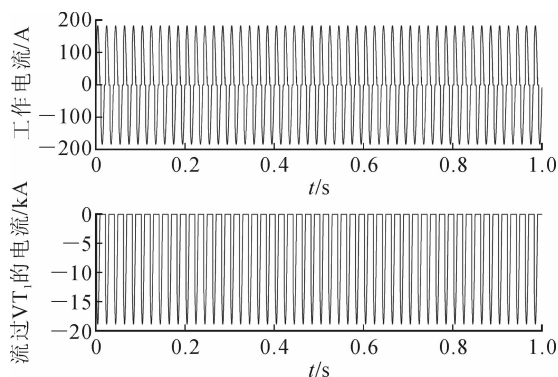


图5 触发角为45°时磁控电抗器的工作电流和流过晶闸管1的电流

Fig. 5 Working current of magnetically controlled reactor and current flowing through thyristor 1 in 45° trigger

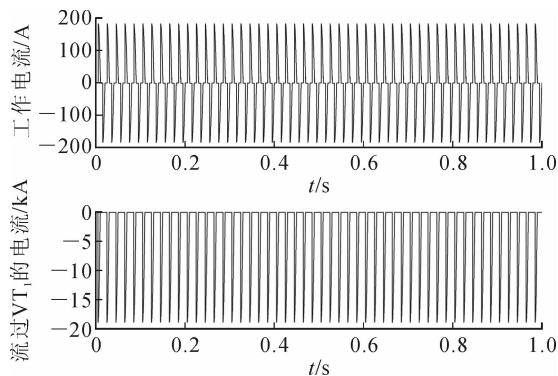


图6 触发角为90°时磁控电抗器的工作电流和流过晶闸管1的电流

Fig. 6 Working current of magnetically controlled reactor and current flowing through thyristor 1 in 90° trigger

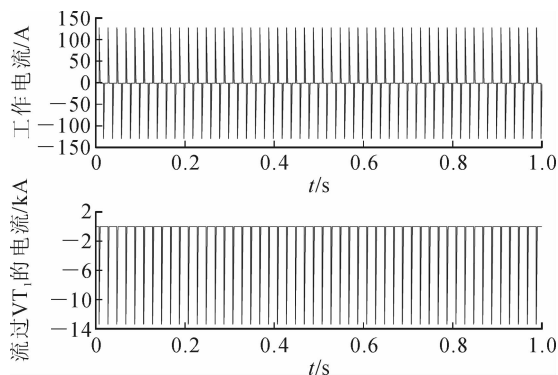


图7 触发角为135°时磁控电抗器的工作电流和流过晶闸管1的电流

Fig. 7 Working current of magnetically controlled reactor and current flowing through thyristor 1 in 135° trigger

电流波形有畸变,谐波成分含量较多;随着 α 减小,控制电流将增加,在整个工作周期中,铁心有更多的时间工作在饱和状态,工作绕组的电流波形畸变

率减小,谐波成分含量减小,越来越接近正弦波,而随着铁心工作在饱和状态的时间增多,铁心等效磁导率变小,电抗器电抗值变小,工作绕组电流随着增大;当 α 达到0时,控制电流最大,使得在一周期中铁心完全工作在饱和区,工作电流没有畸变,为正弦波,电抗器的电抗值达到最小,绕组的工作电流达到最大值。

3 检验函数校验

为验证模拟等效的正确性,文中提出了以电流有效值标幺值为指标的检验函数。电流有效值的标幺值校验法参考文[20]:

$$I_{1m}^* = (\beta - \sin\beta) / (2\pi); \quad (6)$$

$$\beta = 2\arccos(1 - B_d/B_s); \quad (7)$$

$$\cos\alpha = 2 \left(\sin\frac{\beta}{2} - \frac{\beta}{2} \cos\frac{\beta}{2} \right) / (\pi - 1). \quad (8)$$

式(6)~(8)中: I_{1m}^* 是磁控电抗器工作电流基波幅值标幺值; β 是铁心在一个周期内饱和的时间; B_d 是直流偏磁; B_s 是铁心磁化曲线的饱和值; α 是触发角。

联立式(6)~(8),采用 MATLAB 编程求解出0°、45°、90°、135°、180°触发时的基波工作电流,结果见表2。由此可得到基波工作电流有效值(标幺值)与触发角的函数关系,见图8。

表2 基波工作电流与触发角的关系

Table 2 Relationship between fundamental current and trigger angle

kp ₁ 触发角/(°)	工作电流/A
0	129.400 000
45	123.400 000
90	91.470 000
135	38.690 000
180	0.005 183

注:kp₂触发角和kp₁相差180°。

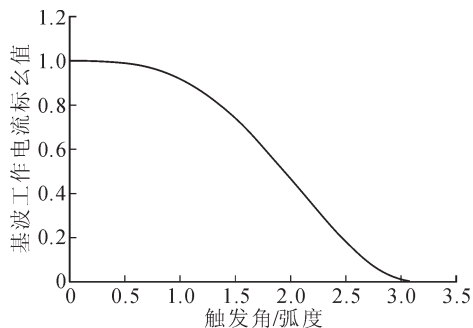


图8 基波工作电流与触发角的关系

Fig. 8 Fundamental current versus trigger angle

根据表2的值计算出基波工作电流的标幺值,

见表 3。

表 3 磁控电抗器的控制特性

Table 3 Control characteristics of magnetically controlled reactor

k_{p1} 触发角/弧度	理论值/p.u.	仿真值/p.u.	相对误差/%
0	1.00	1.000 0	0.00
$\pi/4$	0.95	0.953 5	0.30
$\pi/2$	0.71	0.707 3	0.38
$3\pi/4$	0.30	0.301 5	-0.50
π	0.00	0.000 0	0.00

从表 3 可以看出,基波工作电流仿真值与理论值的相对误差小于 $\pm 1\%$ 。误差原因分析如下:

- 1)采用此方法建模,数据都是近似处理;
- 2)采用 ode45 算法存在误差。

总之,上述的仿真波形符合理论,基波的最大值, 0° 、 45° 、 90° 、 135° 和 180° 触发时,对应的基波电流与通过公式计算所得的数值具有较好的一致性,验证了文中提出方法的有效性。

4 结论

1)文中针对目前磁控电抗器工作原理仿真存在过于复杂和繁琐的问题,提出了一种基于双饱和变压器模型的磁控电抗器仿真新方法,并采用 MATLAB 软件进行了仿真验证。结果表明:方法简单直观,无需分析磁控电抗器各工作状态,不考虑电抗器结构尺寸等参数,并能仿真各绕组、晶闸管和二极管等元器件的电压、电流及各绕组的磁链。

2)文中提出了工作电流标么值校验法,基波电流(标么值)仿真值与理论计算值的相对误差小于 $\pm 1\%$,证明了方法的有效性。

3)文中提出的磁控电抗器仿真方法具有直观简单、准确有效、工程实用的特点,为磁控电抗器工作原理的仿真分析提供了一种有效的方法。

参考文献:

- [1] 石鹏太,田铭兴,王兴龙. 连续饱和型磁控电抗器数学模型及谐波的数值计算[J]. 高压电器,2015,51(7):20-25. SHI Pengtai, TIAN Mingxing, WANG Xinglong. Mathematical model and harmonics numerical calculation of continuous saturable magnetic-value controllable reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 20-25.
- [2] 余梦泽,陈柏超,田翠华,等. 采用磁控电抗器的静止型高压动态无功补偿装置[J]. 高电压技术,2009,35(7):1770-1775. YU Mengze, CHEN Baichao, TIAN Cuihua, et al. High voltage static var reactive power compensator using shunt magnetically controllable reactor[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1770-1775.
- [3] 邓占锋,王 轩,周 飞. 超高压磁控式并联电抗器仿真建模方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(36):108-113. DENG Zhanfeng, WANG Xuan, ZHOU Fei. Modeling of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(36): 108-113.
- [4] 王 轩,邓占锋,于坤山,等. 超高压磁控式并联电抗器稳态特性[J]. 中国电机工程学报,2008,28(33):104-109. WANG Xuan, DENG Zhanfeng, YU Kunshan, et al. Steady-state characteristics of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 104-109.
- [5] 周 平. 磁控电抗器无功补偿技术在电力系统中的应用[D]. 杭州:浙江大学,2012. ZHOU Ping. Application of magnetic controllable reactor of reactive power compensation in power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [6] 邵家云. 磁控电抗器在电力系统中的应用研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2009. SHAO Jiayun. Study on application of magnetic controllable reactor in power system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
- [7] 王宝安,金丽莉,罗亚桥,等. 基于磁控电抗器的动态无功补偿装置[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):97-100. WANG Bao'an, JIN Lili, LUO Yaqiao, et al. Dynamic reactive power compensation equipment based on magnetically controlled reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 97-100.
- [8] 李和明,刘海鹏,尹忠东. 基于磁控电抗器的控制系统设计[J]. 高电压技术,2014,40(1):275-281. LI Heming, LIU Haipeng, YIN Zhongdong. Design of control system based on magnetically controlled reactor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 275-281.
- [9] 赵士硕,尹忠东,王 轩. 磁控电抗器仿真模型与实验研究[J]. 电气技术,2013,32(1):52-55. ZHAO Shishuo, YIN Zhongdong, WANG Xuan. Simulation model and experimental study of magnetic control reactor [J]. Electric Technology, 2013, 32(1): 52-55.
- [10] 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.
- [11] 田铭兴,励庆孚. 磁饱和式可控电抗器的等效电路及仿真分析[J]. 电工技术学报,2003,18(6):64-67. TIAN Mingxing, LI Qingfu. An equivalent circuit and simulation analysis of magnetically-saturated controllable reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

- 2003,18(6):64-67.
- [12] 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.
- 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.
- [13] 田铭兴,杨雪淞,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.
- [14] 尹忠东. 磁阀式可控电抗器的理论研究及应用[D]. 武汉:武汉水利电力大学,1996.
- YIN Zhongdong. Magnetic valve controllable reactor theory research and application[D]. Wuhan:Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering,1996.
- [15] 陈伯超. 新型饱和可控电抗器理路及应用[M]. 武汉:武汉水利水电大学出版社,1999:70-93.
- CHEN Baichao.New concept of saturation controlled reactor and its application[M]. Wuhan:Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering Press,1999:70-93.
- [16] 郑伟杰,周孝信. 基于动态磁阻的磁控式并联电抗器等效电抗暂态模型[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):1-6.
- ZHENG Weijie,ZHOU Xiaoxin. Equivalent electro-magnetic transient model based on dynamic reluctance for magnetically controlled shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):1-6.
- [17] 王子强,伊忠东,周丽霞,等. 基于 ANSYS 的可控电抗器磁结构与损耗分析[J]. 电网技术,2010,34(4):168-172.
- WANG Ziqiang,YI Zhongdong,ZHOU Lixia,et al. Magnetic structure of controllable reactor and loss analysis based on Ansys[J]. Power System Technology,2010,34(4):168-172.
- [18] 马元浩,王秀莲,李泉富. 磁饱和式可控电抗器的原理及特性分析[J]. 沈阳理工大学学报,2007,26(5):47-49.
- MA Yuanhao,WANG Xiulian,LI Quanfu. Principle and characteristic analysis of magnetically controlled saturated reactor[J]. Transactions of Shenyang Ligong University,2007,26(5):47-49.
- [19] 田铭兴,杨秀川,杨雪淞. 基于 MATLAB 多绕组变压器模型的磁饱和式可控电抗器仿真模型方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):78-81.
- TIAN Mingxing,YANG Xiuchuan,YANG Xuesong. Modeling of magnetically saturation controllable reactor based on multi-winding transformer models of MATLAB[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):78-81.
- [20] 杨 坡. 磁阀式可控电抗器磁路模型分析与实验研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.
- YANG Po. Research on magnetic circuit model and experiments of magnetic valve controllable reactor[D]. Beijing:North China Electric Power University,2011.
- 姜宝磊(1986—),男,硕士,中级讲师,主要从事电力系统继电保护的研究。
- 李晓明(1956—),男,本科,副教授,主要从事电网智能保护与控制的研究。