

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.01.017

磁阀式可控电抗器关键参数研究

贺新营, 李琳

(华北电力大学新能源国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:文中针对磁阀式可控电抗器(magnetic-valve controllable reactor, MCR)设计和仿真中的关键参数进行分析与研究。若多级饱和磁阀式可控电抗器(multi-stage saturable magnetic-valve controllable reactor, MSMCR)磁阀截面积设计不当,会导致调节“盲区”的出现。为避免这一现象,推导得到了磁阀截面积的设计原则。MCR抽头比的计算直接关系到磁阀段铁心能否完全饱和,为确保MSMCR能够完全饱和,通过理论分析得到了其抽头比的计算公式。根据等效磁化曲线,提出了MSMCR仿真模型参数设定原则。利用MATLAB模型进行仿真计算,得到的结果与理论符合,说明参数设定的正确性。利用实际制作的双级磁阀电抗器模型进行试验,结果表明理论分析方法的有效性,对实际磁阀电抗器的设计有指导意义。

关键词:多级饱和磁阀电抗器;磁阀截面积;抽头比;模型参数

Study on the Key Parameters of Magnetic-valve Controllable Reactor

HE Xinying, LI Lin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper analyzes and studies the key parameters of magnetic-valve controllable reactor (MCR). The improper design of magnetic-valve section area will lead to control blind zone to a multi-stage saturable magnetic-valve controllable reactor (MSMCR). In order to avoid this phenomenon, the design principle of the section area of the magnetic-valve is derived. Whether fully saturated for the iron core of the magnetic valve section is directly related to the calculation of the MCR tap ratio. In order to ensure the full saturation of MSMCR, the calculation formula of the tap ratio is obtained by theoretical analysis. The parameters setting principle of MSMCR model is presented according to the equivalent $n-h$ curve. The simulation results of MATLAB are accord with the theoretical results, validating that the parameters setting are right. This paper also provides the experimental results of two-stage MCR to verify the effectiveness of the theoretical analysis, which has guidance meaning for the design of MCR in reality.

Key words: multi-stage saturable magnetic-valve reactor; magnetic-valve section area; tap ratio; model parameters

0 引言

近年来,作为坚强智能电网骨干网架的特高压线路飞速发展。中国境内目前共有17项在运、在建的特高压工程,“十二五”期间,通过特高压线路输送的电量累计达到了4 300亿kW·h。建设大容量、

高效率、远距离的特高压电网,可以有效实现电能的跨地区输送,促进全国范围的能源资源优化配置。

特高压交流线路剧烈变化的功率潮流、巨大的容性充电功率都给电网的无功补偿与电压调整提出了更高的要求。传统的无功功率补偿设备并不能很好地满足这一需求。可控并联电抗器可以随输送功率的变化而自动平滑的调节自身的输出容量,能够在线动态补偿充电功率,抑制潜供电流,提高电网运行可靠性,因而有着非常广阔的应用前景^[1-3]。

收稿日期:2017-07-19; 修回日期:2017-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277064)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51277064).

磁阀式可控电抗器(magnetic-valve controllable reactor, MCR)作为一种特殊结构的并联可控电抗器,能够实现自励磁,降低成本,因而引起人们的广泛关注。文[4-5]中提出了双级磁阀结构电抗器与多级磁阀结构电抗器,但是并没有说明MCR仿真模型的参数设定方法。文[6]中虽然给出了MCR模型参数计算的详细过程,但是没有对MSMCR仿真模型的参数计算进行研究。文[7-10]中针对MCR可能出现的调节“盲区”进行了研究,提出了一种连续式的磁阀结构,但是没有给出MSMCR的磁阀截面积的计算方法。MCR与电力变压器结构有诸多相似之处,因而两者设计方法相近,但是对MSMCR抽头比的计算方法,目前尚未有所研究。

文中主要是针对磁阀式电抗器设计与仿真中的关键参数计算展开研究。为避免调节“盲区”的出现,提出了磁阀截面积的设计方法。通过理论推导,得到MSMCR抽头比的计算公式。通过对磁阀段铁心进行等效,得到多级磁阀电抗器的仿真模型参数的计算方法。在理论计算的基础上,制作了双级磁阀电抗器模型并进行试验。通过理论计算结果、仿真结果与试验结果的对比来验证参数计算的有效性。

1 设计参数计算

1.1 本体结构与参数关系

单相双级磁阀式可控电抗器的本体结构见图1^[11-13]。图1中:每个铁心柱上的绕组总匝数为 N ,且 $N=2(N_1+N_2)$,自耦控制绕组匝数 $N=\delta N/2$; u 为工作电压; i 为工作电流; N 匝绕组电阻为 R 。电抗器接通电源后,给晶闸管施加触发脉冲,控制绕组在铁心中产生直流磁通 Φ_0 。由于交直流磁通同时存在,小截面段铁心饱和,且饱和程度随晶闸管导通角改变^[14-15]。因而,通过改变晶闸管的导通角可以改变磁阀电抗器的输出^[16]。

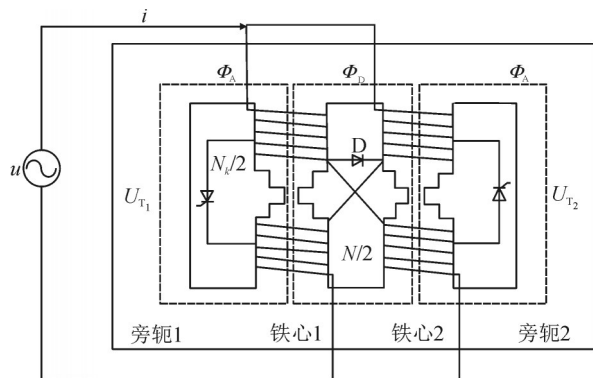


图1 双级磁阀本体结构图

Fig. 1 Body structure of two-stage MCR

磁阀式可控电抗器与电力变压器结构上存在诸多相似之处,因而其相关参数如铁心、绕组的计算可以参照电力变压器的计算方法。但是需要指出的是绕组导线截面积的选择要考虑控制电流,且不同级数磁阀电抗器控制电流不同,因而导线截面积也不同,最终得到的导线电阻 R 也不同。对于MCR的抽头比 δ ,则需要根据磁阀级数确定。

1.2 磁阀截面积计算

MCR的磁阀截面积是一个重要的设计参数,若选择不当,电抗器在调节输出时会出现调节“盲区”。为避免调节盲区的出现,需要明确MCR磁阀截面积的设计方法。以多级磁阀结构的MCR为例进行说明。多级磁阀结构示意图见图2。

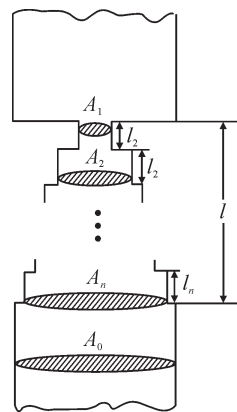


图2 多级磁阀结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of multi-stage magnetic-valve

对图2中的 n 级磁阀结构,取铁心柱截面为 A_0 ;第1级磁阀段铁心截面积为 A_1 ,长度为 l_1 ;第2级磁阀段铁心截面积为 A_2 ,长度为 l_2 ;第 k 级磁阀段铁心截面积为 A_k ,长度为 l_k ;第 $k+1$ 级磁阀段截面积为 A_{k+1} ,长度为 l_{k+1} ;第 n 级磁阀段铁心截面积为 A_n ,长度为 l_n ;磁阀段总长度为 l 。

所谓调节“盲区”,即为当晶闸管触发角改变时,MCR的输出电流维持在恒定值。调节盲区的出现存在2种情况,一种是在MCR的调节初期,由于第1级磁阀截面积选取不当造成;另一种出现在MCR的调节中期,原因是第 k 级磁阀饱和,而第 $k+1$ 级磁阀尚未达到饱和。

针对第1种情况,第1级磁阀截面积的设计要满足式(1)。式(1)中的 B_s 为铁心材料的饱和磁通密度, B_m 为交流磁通幅值。

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{B_m}{B_s} \quad (1)$$

对第2种情况,取铁心柱截面、第 k 级与第 $k+1$ 级磁阀段中的磁通密度满足式(2)。其中 B_{ka} 为交流磁通, B_{kd} 为直流磁通。

$$\begin{cases} B_0 = B_m \cos \omega t + B_{0d} \\ B_k = B_{ka} \cos \omega t + B_{kd} \\ B_{k+1} = B_{k+1,a} \cos \omega t + B_{k+1,d} \end{cases} \quad (2)$$

根据磁通连续性,第 k 级、第 $k+1$ 级磁阀段中的交流磁通与直流磁通满足式(3)。

$$\begin{cases} B_{ka} = \frac{A_0}{A_k} B_{0a} & B_{k+1,a} = \frac{A_0}{A_{k+1}} B_{0a} \\ B_{kd} = \frac{A_0}{A_k} B_{0d} & B_{k+1,d} = \frac{A_0}{A_{k+1}} B_{0d} \end{cases} \quad (3)$$

若令第 k 级磁阀段完全饱和,而第 $k+1$ 级磁阀段尚未饱和,则第 $k+1$ 级磁阀段内的磁通最大值应满足式(4),即

$$B_{k+1,m} = \frac{A_0}{A_{k+1}} B_m + \frac{A_0}{A_{k+1}} \left(\frac{A_k}{A_0} B_s + B_m \right) \leq B_s \quad (4)$$

化简后可以得到式(5)。即当第 k 级磁阀截面积与第 $k+1$ 级磁阀截面积的差值小于等于2倍的第1级磁阀截面积时,MSMCR在工作过程总不会出现调节盲区。

$$A_{k+1} - A_k \leq 2A_1 \quad (5)$$

1.3 抽头比计算

在计算控制绕组匝数时,应满足在晶闸管完全导通时,电抗器小截面铁心段完全饱和,此时电抗器的感抗值最小,有最大输出。以多级磁阀结构来说明抽头比的计算式。当晶闸管触发角 α 为 0° 时,第 n 级磁阀段铁心应完全饱和。完全饱和以后的磁阀段铁心相当于空气,根据磁通连续性有

(6)

式(6)中: B_{0d} 为铁心柱中的直流磁通密度; B_s 为铁心材料的饱和磁通密度; B_m 为交流磁通幅值^[17-20]。

对于磁阀式电抗器的第1级磁阀,在未通直流磁通时即应工作在临界饱和状态,因而 B_m 、 B_s 与 A_0 、 A_1 之间有如式(1)所示的关系,以避免电抗器初始调节时出现盲区。从而有

$$B_{0d} = \frac{A_1 + A_n}{A_0} B_s \quad (7)$$

$n=1$ 时即为单级磁阀电抗器。根据文[3],可以得到磁阀式电抗器的抽头比计算式,即

$$\delta = \frac{\pi R l B_{0d}}{2\mu_0 N U_m - \pi R l B_{0d}} \quad (8)$$

当磁阀段截面积确定后,可以根据式(7)、(8)得到电抗器的自耦抽头比计算式(9)。从前文的分析可知,当磁阀的级数不同时,得到的抽头比也是不同的。抽头比大小与磁阀面积和铁心材料有关。

$$\begin{cases} \delta = \frac{R^*}{1 - R^*} \\ R^* = \frac{R \cdot \frac{A_1 + A_n}{A_0} \pi l B_s}{2N\mu_0 U_m} \end{cases} \quad (9)$$

2 仿真模型参数

2.1 参数设定

根据文[3],磁阀式电抗器的抽头比取值一般很小,在此条件下可以推导得到简化后的磁阀式电抗器等效电路,见图3。

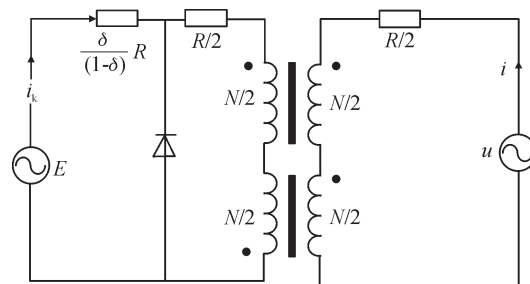


图3 磁阀式电抗器等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of MCR

等效电路由工作侧电路与控制侧电路构成。利用等效电路可以在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型,见图4。图(4)中的饱和电抗器由元件库中的多绕组饱和变压器模拟。其饱和特性通过设定元件的特定参数来予以实现。利用MATLAB搭建的仿真模型,摆脱了对实际电抗器结构尺寸等参数的依赖,操作简单,修改方便,占用内存小,能够很好的反应磁阀式电抗器的电气特性与输出特性。

多绕组饱和变压器需要设定的参数主要有:容量、原副边电压、饱和特性等。其中MCR磁阀结构的级数与长度主要体现在饱和特性参数的设定上。以双级磁阀电抗器为例说明饱和特性参数的设定方法。

令第1级磁阀段长度为 l_1 ,第2级磁阀长度为 l_2 ,磁阀总长度为 $l=l_1+l_2$ 。得到第1级磁阀段与第2级磁阀段的等效饱和磁密分别为

$$\begin{cases} B_{1es} = \frac{A_1}{A_0} B_s \\ B_{2es} = \frac{A_2}{A_0} B_s \end{cases} \quad (10)$$

根据磁通连续性,可以推导得到磁阀段的等效磁化曲线方程为

$$H_e = \begin{cases} 0 & |B_e| \leq B_{1es} \\ \frac{B_e - B_{1es}}{\mu_0} \frac{l_1}{l} & B_{1es} \leq B_e \leq B_{2es} \\ \frac{B_e - B_{1es} \frac{l_1}{l} - B_{2es} \frac{l_2}{l}}{\mu_0} & B_{2es} \leq B_e \\ \frac{B_e + B_{1es} \frac{l_1}{l}}{\mu_0} & -B_{2es} \leq B_e \leq -B_{1es} \\ \frac{B_e + B_{1es} \frac{l_1}{l} + \frac{S_2}{S_0} B_{2es} \frac{l_2}{l}}{\mu_0} & B_e \leq -B_{2es} \end{cases} \quad (11)$$

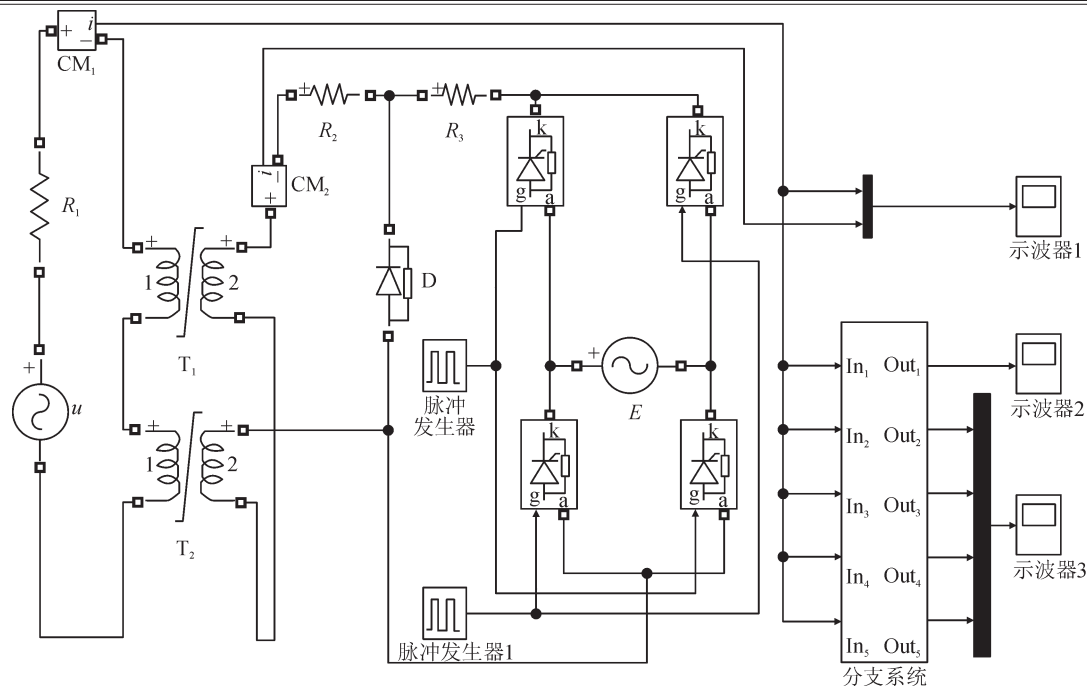


图4 磁阀式电抗器仿真模型

Fig. 4 Simulation model of MCR

取磁链基准值与磁化电流基准值分别为

$$\begin{cases} \psi_{\text{base}} = \frac{U}{2\pi f_n} \sqrt{2} \\ I_{\text{base}} = \frac{S_n}{U} \sqrt{2} \end{cases} \quad (12)$$

取磁链为 ψ_e ,磁化电流为 I_e ,有

$$\begin{cases} \psi_e = NB_e A_0 \\ i_e = \frac{2H_e l}{N} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(12)、(13)可以得到磁密基准值与磁场强度基准值分别为

$$\begin{cases} B_{\text{base}} = \frac{\psi_{\text{base}}}{NA_0} \\ H_{\text{base}} = \frac{Ni_{\text{base}}}{2l} \end{cases} \quad (14)$$

从而有

$$\begin{cases} \psi_e^* = B_e^* \\ i_e^* = H_e^* \end{cases} \quad (15)$$

结合式(11)与式(15),就可以得到双级磁阀式电抗器模型元件 T_1 、 T_2 的饱和特性参数为

$$\left[0, 0; 0, 1; \frac{l_1}{l} \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right), \frac{A_2}{A_1}; \frac{l_1}{l} \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right) + 1, \frac{A_2}{A_1} + 1 \right].$$

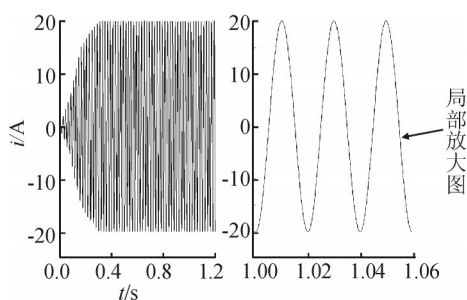
对多级磁阀电抗器,经过等效化简,同样可以得到类似式(11)的磁阀段等效磁化曲线方程,进而就可以确定相应的饱和特性参数。

2.2 仿真结果

根据图4的仿真模型,建立5 400 VA、380 V的双级磁阀电抗器仿真模型。令 $l_1=l_2$, $A_1=A_2/2=A_0/3$,得

到饱和特性参数为 $[0, 0; 0, 1; 0.5, 2; 1.5, 3]$ 。其他参数为: $R_1=R_2=0.425 \Omega$, $R_3=0.036 6 \Omega$, $E_k=23.18 \text{ V}$, $u=537.401 \text{ V}$, T_1 与 T_2 一、二次侧电压190 V,容量2 700 VA。

触发角 α 为 0° 时仿真得到的工作电流波形见图5。右侧为波形放大图。通过傅里叶分解模块可以得到工频电流的有效值为14.22 A,与理论计算值14.21 A基本一致,说明仿真模型参数的设定是正确的。改变触发脉冲的延迟时间,可以得到不同触发角时的工作电流。工作电流与触发角间的变化关系见图6。从图6可以看出,在双级磁阀电抗器的输出调节过程中,没有出现调节“盲区”。

图5 0° 触发角时工作电流Fig. 5 Working current when trigger angle is 0°

需要指出的是,不同级数的磁阀电抗器仿真模型虽然相同,但是饱和特性参数、控制电压 E 、电阻 R_1 、 R_2 与 R_3 均不同。因而利用图4所示模型进行不同级数磁阀电抗器仿真计算时,需要对前述各项参数重新进行调整计算。

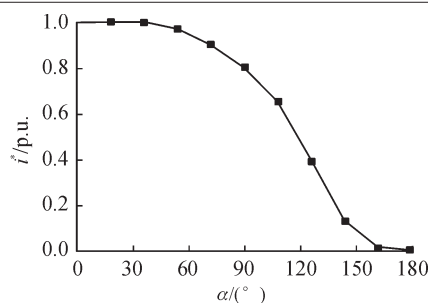


图6 工作电流变化曲线

Fig. 6 Curve of working current

3 试验研究

笔者制作了一台容量 5 400 VA、工作电压 380 V 的双级磁阀电抗器模型,见图 7。取第 1 级磁阀截面积为铁心柱截面积的 1/3,第 2 级磁阀截面积为铁心柱截面积的 2/3,1、2 级磁阀段长度相等,根据式(9)计算得到抽头比为 0.041 35。由于制作的模型铁心中存在切割的气隙,根据空载时的工作电流可以计算得到气隙长度。考虑切割气隙后,模型的最大工作电流计算值为 15.54 A。测得晶闸管完全导通时工作电流为 16.10 A,误差为 3.6%。这证明根据式(9)计算得到的抽头比能够确保电抗器的双级磁阀完全饱和,即电抗器能达到设计的输出容量。

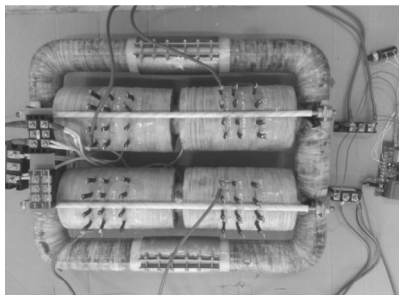


图7 双级磁阀电抗器模型

Fig. 7 Prototype of two-stage MCR

改变晶闸管触发脉冲,得到工作电流标么值与脉冲触发角之间的关系,见图 8。从图 8 中可以看出,当磁阀截面积选择合适时,电抗器不会出现调节“盲区”。

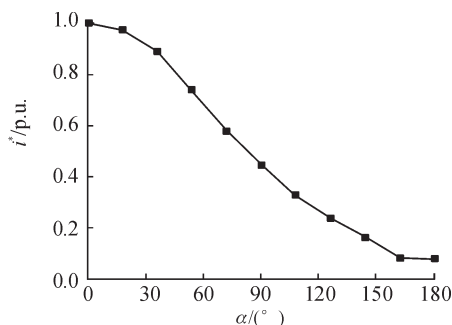


图8 实测电流变化曲线

Fig. 8 Curve of measured working current

4 结语

文中研究了磁阀式电抗器设计与仿真中的关键参数。为避免调节“盲区”的出现,确定了磁阀截面积的计算原则。通过理论分析,提出了磁阀式电抗器抽头比的具有普遍适用性的计算公式。同时对多级磁阀电抗器的仿真模型进行研究,通过建立磁阀段等效磁化曲线方程,确定了磁阀电抗器仿真元件的参数。利用模型计算得到的仿真结果与理论计算结果一致,验证了仿真模型参数设定的合理性。为验证磁阀式电抗器抽头比参数计算式的正确性,制作了试验模型。试验结果与理论计算结果相吻合,证明了计算式的有效性。

参考文献:

- [1] 郑涛,赵彦杰.超/特高压可控并联电抗器关键技术综述[J].电力系统自动化,2014,42(7):127-135.
ZHENG Tao, ZHAO Yanjie. Overview of key techniques of EHV/UHV controllable shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 42(7):127-135.
- [2] 周腊吾.新型特高压可控电抗器的理论及应用[D].长沙:湖南大学,2008.
ZHOU Lawu. The theory and it's application on new type ultra-high voltage controlled reactor[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [3] 陈柏超.新型可控饱和电抗器理论及应用[M].武汉:武汉水利大学出版社,1999.
CHEN Baichao. Theory and application of new type controlled saturable reactor[M]. Wuhan: Wuhan Water Power University Press, 1999.
- [4] 田翠华,陈柏超.低谐波双级饱和磁控电抗器研究[J].电工技术学报,2006,21(1):19-23
TIAN Cuihua, CHEN Baichao. Study of low distortion two-stage saturable magnetically controlled reactor[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1):19-23.
- [5] 陈绪轩,田翠华,陈柏超,等.多级饱和磁阀式可控电抗器谐波分析数学模型[J].电工技术学报,2011,26(3):57-64.
CHEN Xuxuan, TIAN Cuihua, CHEN Baichao, et al. Mathematical model for harmonics analysis of the multi-stage saturable magneti-valve controllable reactor[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3):57-64.
- [6] 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.
- [7] CHEN B, GAO Y, NAGATA M, et al. Investigation on harmonics suppression of saturable magnetically controlled reactor using nonlinear magnetic field analysis[C]//2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications(ICEF). [S.l.]: IEEE, 2012: 1-4.
- [8] 陈绪轩, 陈柏超, 田翠华, 等. 双级饱和磁控电抗器谐波抑制优化技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 71-75.
CHEN Xuxuan, CHEN Baichao, TIAN Cuihua, et al. Optimization technique of harmonic suppression for TSMCR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 71-75.
- [9] 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建模方法[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 transformer models of MATLAB[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 78-81.
- [10] 王异凡, 陈国柱, 张 曙. 一种连续磁阀式消弧线圈及其数学模型[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 239-245.
WANG Yifan, CHEN Guozhu, ZHANG Shu. A continuously magnetic valve arc-suppression coil and its modeling[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 239-245.
- [11] 吴 茜, 蔡 旭, 徐 波. 具有两级磁阀的消弧线圈关键参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 224-230.
WU Xi, CAI Xu, XU Bo. Design of key parameters about two-stage magnetic valve arc-suppression coil[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 224-230.
- [12] AMIN M R, DAS T. An investigation on harmonic features of MSCR using MATLAB/Simulink[J]. International Journal of Signal Processing, 2014, 7(1): 145-154.
- [13] 徐 杰, 刘在祥, 洪乃刚. 低谐波双级饱和叠形磁控电抗器[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 816-819.
XU Jie, LIU Zaixiang, HONG Naigang. Analysis of low distortion two-stage saturation combine type magnetically controlled reactor[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 816-819.
- [14] 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 and simulation analysis of magnetically - saturated controllable reactors[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6): 64-67.
- [15] WANG Y F, CHEN G Z. A multi-valve controlled saturable reactor and its harmonic optimization[J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2014, 33(4): 44.
- [16] 罗隆福, 陈 波, 许加柱. 磁饱和可控电抗器等效模型在设计中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 70-74.
LUO Longfu, CHEN Bo, XU Jiazhu. Application of equivalent physical model of magnetically saturated controllable reactor in the design[J]. Proceedings of the CSU- EPSA, 2011, 23(5): 70-74.
- [17] 官瑞杨, 魏新劳, 聂洪岩. 铁心电抗器气隙等效导磁面积计算[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(4): 6-11.
GUAN Ruiyang, WEI Xinlao, NIE Hongyan. The calculation of air equivalent cross-sectional area in core reactor[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19(4): 6-11.
- [18] 陈 湘, 童 泽, 欧阳广. 磁饱和式可控电抗器的工作特性及仿真研究[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 53-56.
CHEN Xiang, TONG Ze, OUYANG Guang. Operational characteristics and simulation of the magnetic - saturated controllable reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 53-56.
- [19] 邢军强, 安 振, 陈 雷. 磁控式并联电抗器数值计算研究[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 93-97.
XING Junqiang, AN Zhen, CHEN Lei. Study on numerical calculation of magnetically controlled shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 93-97.
- [20] 田翠华, 陈柏超. 磁控电抗器在750 kV系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 31-37.
TIAN Cuihua, CHEN Baichao. Application of magnetically controlled reactor in 750 kV power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 31-37.

贺新营(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统设备电磁研究。

李 琳(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场数值计算方法及其应用、电力系统电磁兼容、先进输电技术。