

# 500kV 饱和铁芯型超导限流器稳态阻抗仿真方法研究

史正军, 程文锋, 宋萌, 梅桂华

广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州, 510080

## Simulation Method Research of the Steady-state Impedance of the 500kV Saturated Core Superconducting Fault Current Limiter

Zhengjun Shi, Wenfeng Chen, Meng Song, Guihua Mei

Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou, 510080, China

**摘要:** 由于饱和铁芯型限流器铁芯工作在交直流混合励磁并达到深度饱和状态, 采用传统的电抗器电磁仿真模型及方法计算出的稳态阻抗与实测值偏差很大, 这是长期困扰饱和铁芯型限流器设计工作的技术难点。本文通过大量的仿真研究和试验数据校核, 提出了采用了考虑硅钢片叠片方式的等效 BH 曲线测试方法, 和适应于非线性阻抗特性仿真的“电压源+内阻抗”电源激励模型, 并考虑了电抗系统中油箱及其它导磁材料组成的结构件的影响。改进后的仿真模型和方法大幅提高了限流器稳态阻抗仿真准确性, 并成功指导了 500kV 超导限流器样机的优化改造。

**关键词:** 仿真方法, 超导限流器, 饱和铁芯, 稳态阻抗。

**Abstract:** Because the iron core of the saturated iron core type FCL (Fault current limiter) is excited by both alternating current and direct current and reaches the state of deep saturation, the error of the steady-state impedance calculated by the traditional reactor electromagnetic simulation model and method is very large, which is the technical difficulty that perplex the design of the saturated core type FCL for a long time. In this paper, through a large number of simulation experiments and test data check, an equivalent BH curve test method is proposed, which considers the mode of silicon steel sheet stacking. An excitation model of "voltage source + internal impedance" is also proposed adapts to the nonlinear impedance characteristics, and the structural parts made of magnetic materials are considered. Finally, the improved simulation method greatly improves the accuracy of the simulation value of the steady-state impedance of the FCL, and successfully guides the optimization and improvement of the prototype of the 500kV superconducting FCL.

**Key words:** simulation method, superconducting fault current limiter (SFCL), saturated core, steady state impedance.

## 0. 引言

近年来, 广东电网的装机容量不断增大, 网架结构越来越密集, 珠三角地区 500kV 电网短路电流始终处于较高水平, 给电力设备带来较大的安全隐患, 限制短路电流的需求日益增大。传统的解决办法有调整电网结构及运行方式、采用传统限流设备等, 但不同程度降低了电网运行的可靠性和灵活性[6-8]。超导限流器具有稳态运行时损耗低、故障发生时能瞬间快速抑制故障电流的特点, 是解决目前大型电网故障电流超标问题的理想技术之一。目前, 国内外正在开展超导限流器的设备研制和应用研究, 配网级超导限流器产品已经投入商业运行[9-13]。

从 2011 年开始, 广东电网公司开展了 500kV 超导限流器样机研制和应用研究工作, 并于 2014 至 2017 承担了 863 计划课题“500kV 大容量超导限流器样机研制”, 成功研制了世界首台 500kV 高温超导限流器样机。

## 1. 饱和铁芯型超导限流器工作原理

饱和铁芯型超导限流器的原理见图 1, 主要包括三大部分, 即超导励磁线圈、交流铜线圈以及铁芯。其中, 铁芯由两个口字型铁芯组合而成, 中间两个铁芯柱重叠在一起组成直流铁芯柱。超导励磁线圈由独立直流电源供电, 放置在直流铁芯柱上, 利用超导材料的高载流特性在有限的空间内提供强大的直流励磁电流。两个交流线圈则

反向串联后接入电网中,由于两个交流线圈对直流铁芯柱的励磁方向相反,巧妙的降低了超导励磁线圈需要承受的交流感应电压。

当电网正常运行时,饱和铁芯型限流器工作在稳态。图2为限流器稳态时的仿真模型图及铁芯中的磁场分布图,由图可见,限流器稳态工作时铁芯处于交直流同时励磁的复杂状态。

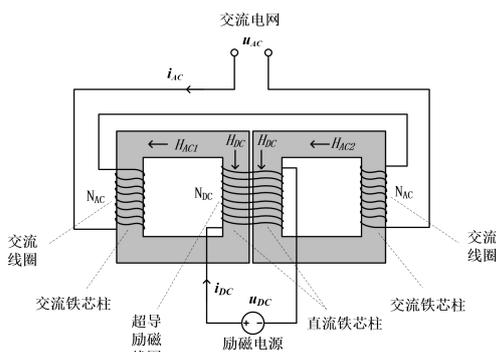


图1 饱和铁芯型超导限流器原理图

Fig.1 Schematic diagram of saturated iron core SFCL

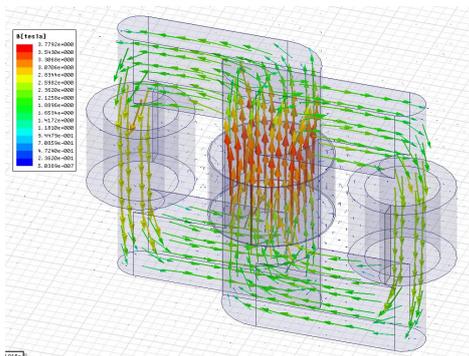


图2 饱和铁芯型超导限流器磁场分布

Fig.2 Schematic diagram of magnetic field distribution of saturated iron core SFCL

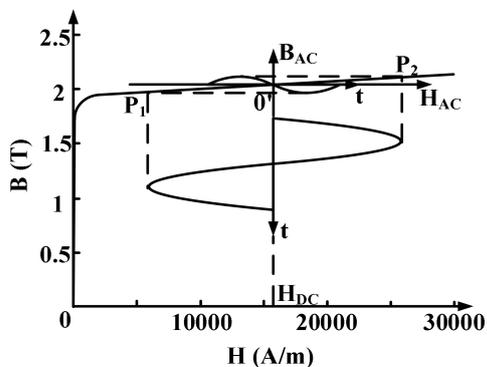


图3 铁芯材料 B-H 曲线及磁化过程

Fig.3 B-H curve and magnetization process of iron core material

为了更直观的分析,本文利用铁芯材料的 B-H 曲线来进行说明,如图3所示。限流器工作在稳态时超导励磁线圈中将通过较大的直流电流,该直流励磁将在铁芯中产生巨大的直流磁场强度  $H_{DC}$ 。两个交流线圈中流过的电流为电网正常运行时的电流,其在铁芯中产生的交流磁场强度用  $H_{AC}$  表示。由于  $H_{DC}$  远大于  $H_{AC}$ ,因而在二者共同作用下,铁芯在任意时刻都将始终处于深度饱和状态,即在铁芯 B-H 曲线的 P1 和 P2 之间。由于铁芯工作在 B-H 曲线的深度饱和区时,  $H_{AC}$  变化时对应的交流磁感应强度  $B_{AC}$  的变化范围很小,所以对应于磁链对时间变化率的感应电压很小,进而饱和铁芯型限流器的稳态电抗值很小。但随着通过限流器的交流工作电流的增大,交流磁感应强度  $B_{AC}$  的变化范围也会增大,铁芯甚至逐步退出饱和,呈现较大的稳态阻抗。为了防止限流器稳态阻抗超出运行要求,必须在设计阶段通过优化实现直流励磁线圈安匝数(线圈电流与匝数乘积)与交流线圈安匝数的匹配。

当电网发生短路故障后,饱和铁芯型限流器的直流励磁电源将会被切断,限流器进入限流态。在限流态下交流线圈将通过巨大的短路电流,在此交流电流作用下,铁芯将在 B-H 曲线的线性区和饱和区之间交替工作,而不是像稳态时一样始终处于饱和区。当铁芯工作在 B-H 曲线的线性区时,由于该区域磁导率很大,线圈对应的电感值很大,从而限流器的等效电抗值增大,实现故障限流作用。

## 2. 超导限流器稳态阻抗计算的难点

稳态阻抗是衡量限流器性能的最重要参数之一,本项目中 500kV 超导限流器样机的考核指标是额定电流(3150A)下稳态压降不超过 2%,即  $1.8\Omega$ 。为满足样机稳态阻抗指标,在设计阶段稳态阻抗计算的准确性极其重要。

由于铁芯饱和原因,通过限流器的交流电流  $i_{AC}$  和端电压  $u_{AC}$  均会发生畸变(如图4所示),限流器稳态阻抗  $Z$  定义为二者一个工频周期内有效值的比值,即:

$$Z = \frac{\int_0^T u_{AC}(t).dt}{\int_0^T i_{AC}(t).dt} \quad (1)$$

通过限流器的交流电流较大时,铁芯交替工作在不饱和/深度饱和状态,且受直流偏磁的影响,铁芯磁路非线性特征十分明显,漏磁的影响也不可忽略。传统的变压器或者电抗器设计的经验公式无法适用,因此主要依靠 ANSYS 等有限元计算软件进行仿真分析。有限元仿真技术是将一个研究对象剖分为一定数量的网格,然后通过迭代计算求解每个网格的物理量。

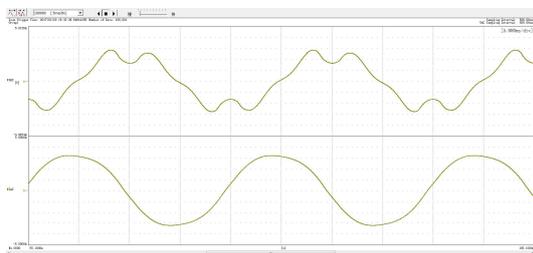


图4 超导限流器交流电压、电流录波图

Fig.4 AC voltage and current recording of S FCL

传统变压器和电抗器正常工作时铁芯不会饱和,磁通的方向基本上是沿着铁芯的走向,线圈漏磁通的比例很小,通过有限元仿真可以比较准确的计算出磁场分布。饱和铁芯型限流器的工作状态则较为复杂,如图3所示,铁芯在正常工作情况下就处于深度饱和状态,随着交流电流幅值的增大,铁芯在半个工频周期内退出饱和,另半个周期内仍然深度饱和。在交直流磁动势的共同作用下,磁场分布按照工频变化。由于交流线圈和直流励磁线圈位于不同的铁芯柱,耦合程度较低,大量磁通泄露到铁芯之外的空间,漏磁通相比主磁通比例升高。此时,如何描述铁芯的磁特性成为有限元仿真的关键,而铁芯磁特性不仅决定于铁芯材料,而且与铁芯结构形式、尺寸、铁芯制造工艺以及激磁方式有关。因此,有限元仿真的准确度高度依赖三维模型、材料属性、电源激励、仿真步长等设置条件的合理性,仿真难度显著加大。

由于缺乏相应试验数据对电磁仿真的结果进行校验,本项目前期采用的饱和铁芯型超导限流器电磁仿真的模型和方法不合理,随着交流电

流的增大,稳态阻抗计算值的误差逐步放大,导致研制的首台超导限流器样机稳态阻抗测试值远超设计值,研制工作一度陷入停顿。此后,项目研究团队深入研究和分析了稳态阻抗仿真的误差的来源。经过大量的仿真研究,并且有针对性的开展了 10kV 中型样机试验和 500kV 常导样机试验等,获取更多的试验数据,对电磁仿真模型和方法进行反复优化改进,最终找出了影响稳态阻抗仿真精度的关键因素。以下即对这些关键因素的分析。

### 3. 铁芯材料 B-H 曲线的获取

由于 500kV 超导限流器样机铁芯尺寸太大,必须采用多张硅钢片拼接的方式,如图5所示。由于片与片之间有很小的间隙,作为整体考虑材质是不连续的。样机铁芯采用的硅钢片材料为宝钢 B30P105,是典型的各向异性冷轧晶粒硅钢片,沿轧制方向的磁导率最大,垂直轧制方向的磁导率最小,因此铁芯在各个方向上的电磁性能明显不同,即“各向异性”。

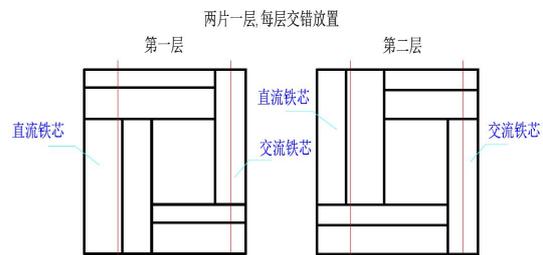


图5 铁芯叠片示意图

Fig.5 Schematic diagram of iron core lamination

为了准确分析饱和铁芯型限流器的特性,必须正确掌握铁芯磁化过程的基本特性及其影响因素。在电工技术中,研究人员常习惯用基本磁化曲线表示铁芯磁特性,并以它作为计算和分析的基础。对常规变压器和电抗器仿真研究时直接采用硅钢片厂家提供 B-H 曲线,该曲线是按照《GBT 3655-2008 用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的方法》进行测试的。该测试方法考虑了铁芯的叠片过程存在的气隙和取向硅钢片的各向异性的影响,一般能够正确反映变压器或者电抗器铁芯的磁特性。但对于本文讨论的饱和铁芯型限流器铁芯来说,铁芯叠置复杂、在更为复杂的激磁条件下工作,不能用一种磁特性来

综合表示它在各种情况下的铁芯磁化过程，每个具体的激磁条件都需要相应的磁特性来表示其物理过程[1]。如果直接采用硅钢片厂家提供的B-H曲线进行稳态仿真可能会带来不可忽略的误差。原因主要有两点：1、标准爱泼斯坦方圈测量方法中硅钢片的连接采用固定的“双搭接方式”，硅钢片的尺寸是固定，不能完全代表硅钢片复杂拼接叠置方式下磁化特性；2、测量没有考虑直流偏磁的影响，这与饱和铁芯型限流器铁芯工作状态有很大不同。

爱泼斯坦方圈测量方法本质上是对铁芯磁性能的等效测量方法，但对于大尺寸饱和铁芯型限流器而言具有局限性。本文基于改进的爱泼斯坦方圈测量方法，提出新的等效B-H曲线用于饱和铁芯型超导限流的稳态仿真。首先，在标准爱泼斯坦方圈测量方法基础上，考虑实际多层拼接的铁芯硅钢片叠片方式，采用多种硅钢片连接方式对B30P105型硅钢片进行测量，获得一系列B-H曲线[2]。其次，将测量得到的多组B-H曲线用于ANSYS Maxwell的三维瞬态场仿真模型中进行计算，观察稳态阻抗仿真值与实测值之间的误差变化规律，并适当对B-H曲线进行修正，获得仿真误差最小的等效B-H曲线。图6和图7是最终采用的等效B-H曲线与厂家（宝钢）提供的B-H曲线之间的对比，从曲线图可以看出，虽然二者趋于相同的磁感应强度，但等效曲线的上升速度明显慢于后者。

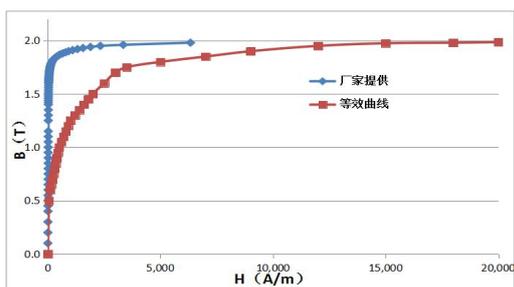


图6 两组B-H曲线对比图(0<H<20000)

Fig.6 Comparison of B-H curves (0<H<20000)

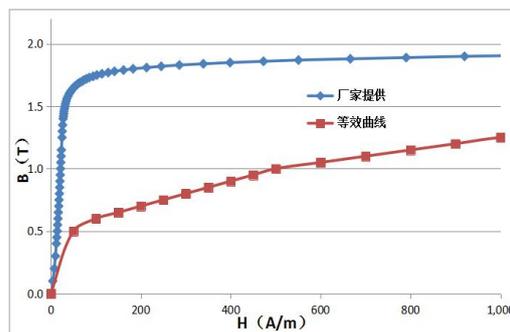


图7 两组B-H曲线对比图(0<H<1000)

Fig.7 Comparison of B-H curves (0<H<1000)

#### 4.激励源的设定方法

ANSYS Maxwell的三维瞬态场仿真时需设置激励源，主要有电压源和电流源两类。由于限流器在稳态下交流电压电流波形均发生了一定程度的畸变（见图4），因此交流电源的激励不宜设置为正弦变化的电流源，而是模拟实际的试验电源，采用正弦电压源+内阻抗的形式，如图8所示。如果采用采用正弦变化的电流源，则随着交流电流的增大，仿真得到的交流电压波形与实际波形之间的偏差越来越大，导致稳态阻抗仿真误差增大。

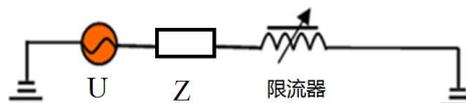


图8 仿真采用的电源激励模型

Fig.8 Power supply excitation model for simulation

采用电压源模型仿真时，务必维持电源内阻抗（以电抗为主）基本不变，逐步调整电源内电势幅值，这与试验时发电机的调整模式是相似的。如果不按照上述规律进行匹配，而任意设定电压源和内阻，则稳态阻抗仿真值与实测值可能存在较大的误差。表1展示了超导限流器样机稳态阻抗仿真时电压源激励的设定值。

表1 超导限流器样机稳态阻抗仿真条件及结果

Tab.1 Simulation conditions and results of steady-state impedance of SFCL

序号	电源电压/V	电源内阻/ $\Omega$	交流电流仿真值/A	交流电压仿真值/V	稳态阻抗仿真值/ $\Omega$
1	500	0.7	422	201	0.48
2	800	0.7	674	323	0.48

3	1000	0.7	838	406	0.48
4	1500	0.7	1222	637	0.52
5	2000	0.7	1574	891	0.57
6	2500	0.7	1898	1166	0.61
7	3000	0.7	2185	1472	0.67
8	3500	0.7	2429	1815	0.75
9	4000	0.7	2638	2186	0.83
10	4500	0.7	2823	2574	0.91
11	5500	0.7	3151	3377	1.07

注：电源电压为峰值，交流电流、电压仿真为有效值。

## 5 结构件中导磁材料的影响

500kV 超导限流器样机的夹件、拉板为磁导率很低的钢材（型号 20Mn23Al），建模时予以忽略（通过试验测量了夹件上附加线圈的感应电压，证实了夹件内部磁感应强度是很低的）。但油箱及油箱内壁的加强筋和定位钉的材料均为 Q345B 型钢材，其导磁性能虽不如铁芯材料但远强于空气，对磁路的影响不可忽略，因此建模时应予以考虑。通过磁路分析可知，由于铁芯距离油箱顶部和底部距离较近，导磁材料组成的定位钉和油箱底部的加强筋导致铁芯与油箱形成“磁短路”。部分直流励磁磁通由中间的铁芯柱经油箱形成回路，未与交流绕组耦合形成主磁通，这部分漏磁通进一步降低了交流铁芯的饱和程度，从而导致稳态阻抗升高。仿真对比结果表明，定位钉和加强筋等导磁材料组成的结构件，对稳态阻抗仿真值可产生最高 30% 的偏差。图 9 是根据厂家提供的设计参数和图纸，在 ANSYS Maxwell 仿真软件平台上建立了包含油箱的 3D 仿真模型，该模型增加了油箱加强筋、定位钉等铁芯以外的导磁材料。

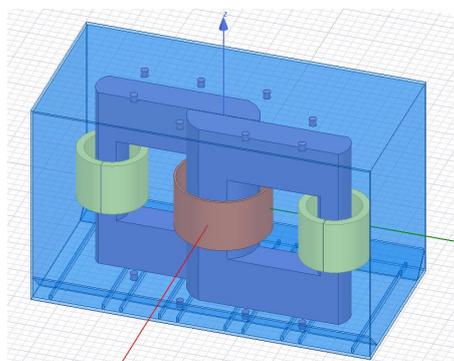


图 9 500kV 超导限流器样机三维仿真模型

Fig.9 Simulation model of 500kV SFCL prototype

## 6 其他影响因素

除上述 3 个关键影响因素外，使用 ANSYS Maxwell 仿真时需采用合理的网格剖分方法，设定合适的仿真步长与精度。

超导限流器稳态仿真需要利用 ANSYS Maxwell 的瞬态场求解器，但瞬态仿真时无法自适应剖分网格，因此首先在静磁场下采用自动剖分网格，计算瞬态场时将剖分好的网格导入。静磁场求解时设置能量误差不超过 0.5%，每次细分网格增加 30% 的网格数，最终总网格数约为 24 万。

仿真步长和非线性残差的设置会影响仿真精度，但步长和非线性残差设置太小会导致仿真时间过长，降低仿真效率。本文设定的仿真步长（time step）为 0.5ms，非线性残差（nonlinear residual）取  $10^{-8}$ 。

## 7 应用效果

项目研究团队通过大量的补充试验和上千次的仿真研究，找出了稳态阻抗仿真误差的主要来源，并针对性的提出了有效解决办法，大大提高了饱和铁芯型限流器稳态阻抗的仿真精度。

在此基础上，研究团队对限流器样机的电抗系统提出了优化改进方案，并重新设计和制造了交流绕组。最终项目研制的 500kV 超导限流器样机通过了 863 课题验收，其额定电流（3150A）下稳态阻抗远低于考核指标（ $1.8\Omega$ ），且实测结果仿真结果十分吻合，如图 10、图 11 所示。

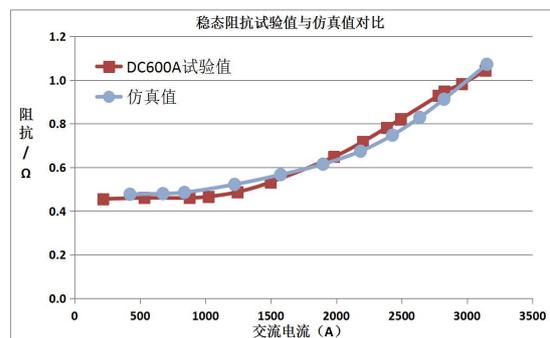


图 10 稳态阻抗仿真值与试验值对比图

（直流励磁 600A）

Fig.10 Comparison diagram of steady-state impedance simulation value and test value (DC excitation 600A)

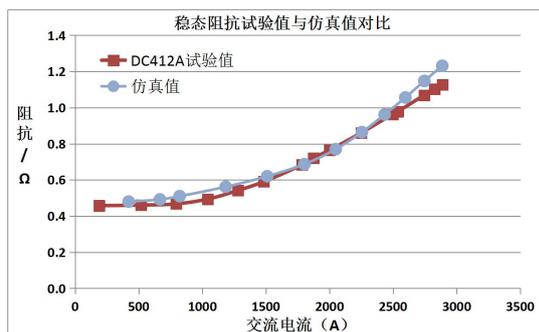


图 11 稳态阻抗仿真值与试验值对比图  
(直流励磁 412A)

Fig.11 Comparison diagram of steady-state impedance simulation value and test value (DC excitation 412A)

## 8 结论

本文通过仿真研究提出了饱和铁芯型超导限流器稳态仿真应注意的关键因素:

1、由于饱和铁芯型限流器铁芯激磁状态复杂和非常规叠片方式等原因,采用标准爱泼斯坦方圈测量方法取得的硅钢片 B-H 曲线不能完全代表其铁芯的磁性能,稳态仿真时可采用等效 B-H 降低仿真误差;

2、电源激励设置应采用电压源+内阻抗的形式,且应按照试验时电源电压变化规律进行设置;

3、应考虑导磁材料组成的结构件对磁路的影响,建立正确的三维模型;

本文总结提出的仿真方法在 500kV 超导限流器样机研制中得到了试验验证,并有效的指导了样机电抗系统的优化改造,取得了很好的效果。

## 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:水利水电出版社,2008.
- [2]程文锋,史正军.基于爱泼斯坦方圈测试的硅钢片磁化曲线特性分析.变压器,2017,12
- [3]Lin Ye, M. Majoros, and et al., System Studies of the Superconducting Fault Current Limiter in Electrical Distribution Grids [J], IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007, 17(2): 2339-2342.
- [4]张晚英,周辉,胡雪峰等.新型饱和铁芯高温超导限流器的实验研究.中国电机工程学报,2015,3(52):494-501.
- [5]Y. Cai, S. Okuda, and et al., Study on Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter [J], IEEE Trans. Appl. Supercond., 2010, 20(3): 1127-1130.
- [6]庞晓刚,龚伟志,洪辉等.饱和铁芯型超导限流器.超导技术,2012,40(6):34-39.
- [7]J. B. Cui et al., Safety Considerations in the Design, Fabrication, Testing, and Operation of the DC Bias Coil of a Saturated Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter [J], IEEE Trans. Appl. Supercond., 2013, 23(3): 5600704.
- [8]H. Kang, C. Lee, and et al., Development of a 13.2 kV/630 A (8.3 MVA) High Temperature Superconducting Fault Current Limiter [J], IEEE Trans. Appl. Supercond., 2008, 18(2): 628-631.
- [9]金涛,徐颖,周世平等.饱和铁芯型超导限流器研究进展综述.超导技术,2012,41(1):13-18.
- [10]M. Noel, and M. Steurer, High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status [J], Supercond. Sci. Technol., 2007, 20: R15-R29.
- [11]Jeffrey W. Moscrop, Experimental Analysis of the Magnetic Flux Characteristics of Saturated Core Fault Current Limiters [J], IEEE Trans. Magn., 2013, 49(2): 874-882.
- [12]A. Abramovitz, K. Smedley, and et al., Prototyping and Testing of a 15 kV/1.2 kA Saturable Core HTS Fault Current Limiter [J], IEEE Trans. Power Del., 2013, 28(3): 1271-1279.
- [13]J. Knott and J. Moscrop, Increasing Energy Efficiency of Saturated-Core Fault Current Limiters With Permanent Magnets [J], IEEE Trans. Magn., 2013, 49(7): 4132-4136.

### 作者简介

史正军(1983—),男,高级工程师,硕士研究生,主要从事超导电力装置开发、电网新技术应用等方面的研究工作。联系电话:020-85124620, Email: shizhengjun@gddky.csg.cn.