

饱和铁芯型高温超导故障限流器漏磁场分析与 等效磁路模型的建立

罗映红 郝溪 黄林柯 李重阳 史冬蓓
(兰州交通大学 自动化与电气工程学院 兰州 730070)

摘要 在分析饱和铁芯型高温超导故障限流器(Saturated iron-core superconducting fault current limiter, SISFCL)基本结构的基础上,建立由44个双饼组成的单螺管型超导绕组的限流器三维模型;利用三维有限元方法(Finite element method, FEM)计算限流器漏磁感应强度的大小和方向,得到了漏磁的分布特点;采用磁场分割的方法建立了考虑漏磁影响的SISFCL等效磁路模型;最后将仿真计算结果与实测结果进行对比,验证了所建立的等效磁路模型的有效性。

关键词 饱和铁芯型高温超导故障限流器, 漏磁场, 磁场分割, 等效磁路建模

中图分类号 TL929

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rj.33.060801

Leakage magnetic field analysis and magnetic circuit modeling of a saturated iron-core superconducting fault current limiter

LUO Yinghong HAO Xi HUANG Linke LI Chongyang SHI Dongbei

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT In this paper, the basic structure of saturated iron-core superconducting fault current limiter (SISFCL) was analyzed and 3D model of the limiter whose superconducting coil was comprised of 44 double pancake rings was established. The magnetic flux leakage distribution of the limiter was calculated by using the finite element method (FEM), the distribution characteristics of leakage magnetic field was analyzed. The equivalent magnetic circuit model was built with magnetic field division method with the magnetic flux leakage. The simulation was compared with the test results. The results show that the equivalent magnetic circuit model is valid. This has a certain reference value for the design and application of SISFCL.

KEYWORDS Saturated iron-core superconducting fault current limiter (SISFCL), Leakage magnetic field, Magnetic field division, Magnetic circuit model

CLC TL929

基金资助: 金川公司预研基金(JCYY2013003)项目资助

第一作者: 罗映红, 女, 1961年1月出生, 教授, 研究方向为电磁干扰与电磁兼容, 电工与电子技术

通讯作者: 郝溪, 女, 1990年6月出生, 2013年毕业于西安工程大学, 现为兰州交通大学硕士研究生, 研究方向为饱和铁芯型超导限流器电磁辐射分析, E-mail: 644704570@qq.com

收稿日期: 初稿 2015-07-23; 修回 2015-09-14

Supported by the Foundation of the Jinchuan Group Ltd. (No. JCYY2013003)

First author: LUO Yinghong, female, was born in January 1961; now is a professor at Lanzhou Jiaotong University, devoting to electromagnetic interference and electromagnetic compatibility, electrical and electronic technology

Corresponding author: HAO Xi, female, was born in June 1990; graduated from Xi'an Polytechnic University in 2013; now is a master candidate in Lanzhou Jiaotong University, majoring in analysis of electromagnetic radiation of saturated iron-core superconducting fault current limiter, E-mail: 644704570@qq.com

Received 23 July 2015; accepted 14 September 2015

电网规模的扩大和互联程度的提高,使过大的短路电流成为影响电网安全、稳定、高效运行的重要影响因素之一^[1-5]。为了有效限制巨大的故障电流,降低故障电流水平,减弱大电流对在线设备的冲击作用,多采用在电网中安装故障限流器的方法,但是采用电力电子器件限流、间隙式“快速接触器”和限流熔断器等传统限流方法都存在不足,难以满足电网发展的需求。高温超导材料的问世使饱和铁芯型高温超导故障限流器(Saturated iron-core superconducting fault current limiter, SISFCL)因其传输电流密度大、运行损耗小、超导反应和恢复时间短,适用于线路重合闸运行^[6-7]等突出优点,成为目前较适宜工业化的一种很有效的限制故障电流的装置,从而受到人们广泛关注。

针对不同额定值和拓扑结构的 SISFCL,国内外众多学者进行了限流特性的仿真分析和样机测试研究。印度 Raju 等^[8]在 1982 年首次研制出具有较好的限流特性 3 kV/550 A 的 SISFCL 单相样机;日本 Yasuda^[9]等和德国 Moriconi 等^[10-11]分别研制了紧凑型的 SISFCL 样机;北京云电英纳公司^[12-16]研制了 35 kV/90 MVA 和 220 kV/300 MVA 的 SISFCL,目前均已成功稳定运行,500 kV 等级的 SISFCL 也在研制中。这些研究工作都推动了 SISFCL 的发展。在限流器中,仅链合于交流绕组而不链合于直流绕组的磁通,以及仅链合于直流绕组而不链合于交流绕组的磁通均称为漏磁通。漏磁通由负载电流产生,它与负载电流即限流器的容量、铁芯形状和绕组结构等因素有关。漏磁场对限流器产生损耗效应、机械力效应和热效应等,严重影响自身稳定高效地运行。由于 SISFCL 主要用于具有许多精密仪器的超导变电站中,这些精密仪器如控制柜、图像显示系统及通信系统等一旦受到电磁干扰,就会对其工作产生影响,甚至损坏仪器,同时,一定限度的电磁干扰也会对工作人员身体产生一定的危害。当电力系统正常稳定运行时, SISFCL 的铁芯深度饱和,这会使漏磁大大增加,因此对 SISFCL 展开漏磁研究是很有必要的,但目前为止,对 SISFCL 的漏磁场的研究还很少。

本研究在文献[17]和文献[18]分别对永磁直流偏置电抗器和磁控式并联电抗器磁路研究的基础上对 SISFCL 的漏磁分布进行分析,根据漏磁仿真结

果,采用磁场分割的方法建立了 SISFCL 的等效磁路模型,并通过与实测结果的对比验证了所建模型的有效性。

1 SISFCL 的基本结构和工作原理

图 1 为 SISFCL 的单相拓扑结构示意图,它分为铁芯、直流超导绕组和交流铜绕组 3 大部分,每相两个交流铜绕组按相反极性串联,超导绕组由恒流源供电,促使铁芯中形成巨大的直流磁化场,进而处于深度饱和状态。

当电力系统处于正常稳定运行状态时,恒流源通过超导绕组所产生的直流磁通 ϕ_{DC} 远远大于额定交流电流通过交流线圈所产生的交流磁通 ϕ_{AC} ,此时铁芯仍在饱和区,交流线圈中磁通量基本不变,进而使其处于低感抗;而一旦发生短路故障,电网中瞬间出现较大的故障电流,该电流使交流线圈产生的巨大的交流磁通 ϕ_{AC} 足以抵消直流磁通 ϕ_{DC} ,使其中一个铁芯处于非饱和状态,引起交流线圈中磁通变化,产生压降,呈高阻抗,从而达到限制短路电流的目的。为了在电流整个周期都能限制故障电流的增大,采用 2 级铁芯。

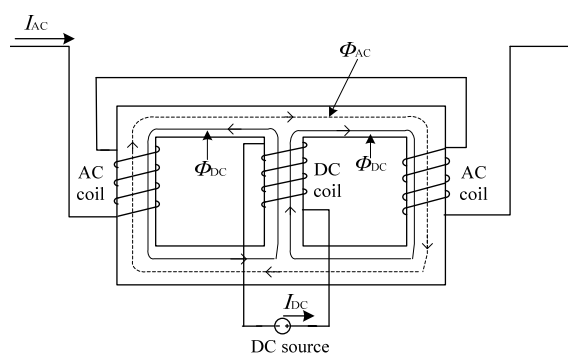


图 1 SISFCL 结构图
Fig.1 Schematic diagram of SISFCL

2 SISFCL 磁场分布特点

为研究 SISFCL 的漏磁场分布特点,本文以 35 kV/90 MVA SISFCL 为研究对象,表 1 为其结构参数。利用 Ansys Maxwell 软件建立单相 SISFCL 有限元模型,图 2 为由 44 个双饼组成的单螺管型超导绕组的 SISFCL 三维模型。

表 1 35 kV/90 MVA SISFCL 主要部件参数
Table 1 Specifications of main components of the 35 kV/90 MVA SISFCL

铁芯 Iron cores	材料 Material	DQ130
	交流柱直径 d_{AC} / mm	584
	Radius of AC leg	
	直流柱直径 d_{DC} / mm	944
	Radius of DC leg	
	内窗口高 h_a / mm	1520
	Height of the inner window	
	内窗口宽 h_b / mm	450
	Width of the inner window	
	叠压系数 k Stacking factor	0.97
交流线圈 AC coils	高度 l_g / mm	1070
	Height	
	匝数 N_{AC} No. of turns	40/相
直流线圈 DC coils	磁体结构 Magnet structure	单螺管型磁体 Single solenoidal magnet
	带材 Conductor	BSCCO2223
	双饼数 Double pancakes	44
	高度 Height (h) / mm	880
	内径 Inner diameter(d_{in}) / m	1280
	外径 d_{out} / mm	1340
	Outer diameter	
	匝数 N_{DC} No. of turns	470
	额定直流电流 I_{rate} / A Rated DC current	300
	运行温度 T / K	77
	Operating temperature	
	总带材长度 L_{totle} / km	17.6
	Total tape length	

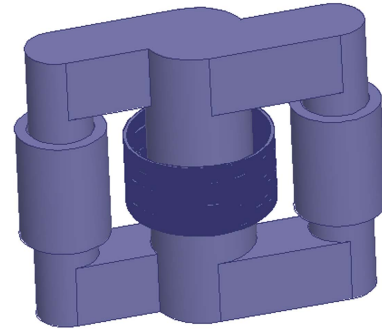


图 2 SISFCL 三维模型
Fig.2 3D model of SISFCL

2.1 铁芯磁场分布特点分析

分以下两种情况对交流铜绕组和直流超导绕组施加电流来分析不同电流激励下铁芯磁场分布的变化规律：(1)只给直流超导绕组加励磁电流；(2)直流绕组中的励磁电流不变，给交流绕组加一个周期的正、负半周幅值电流。

设交流电流 $i_{AC} = 0$ A，图 3 为铁芯在不同直流励磁下的磁场分布。铁芯的饱和程度随超导线圈中直流励磁的大小变化而不同。由图 3 可知，当交流铜绕组中通过的电流 $i_{AC} = 0$ A 时，仅有直流磁通在铁芯中通过，铁芯中没有交流磁通，铁芯两侧柱磁通密度呈对称分布，大小相等，方向相同，都处于既不增磁也不去磁的状态；对比图 3(a)、3(b)和 3(c)可知，当增大超导线圈的直流励磁电流时，直流磁路的磁通增大，磁路饱和程度加剧。

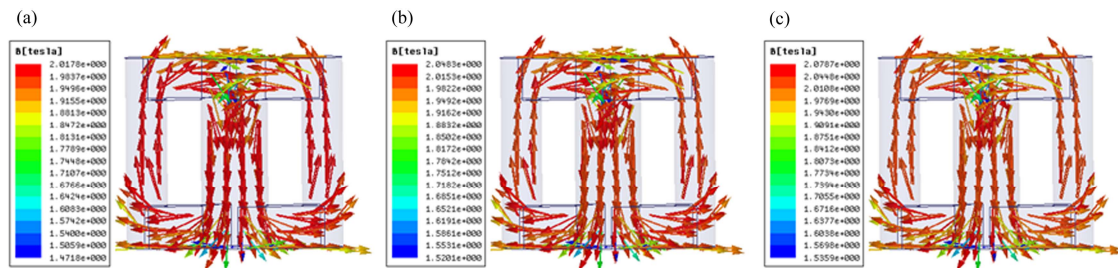


图 3 不同直流励磁电流下的铁芯磁场分布

Fig.3 Magnetic field distribution in different DC currents

(a) $i_{AC} = 0$ A, $I_{DC} = 100$ A, (b) $i_{AC} = 0$ A, $I_{DC} = 200$ A, (c) $i_{AC} = 0$ A, $I_{DC} = 300$ A

图 4 为超导线圈中直流励磁 $I_{DC} = 300$ A，交流电流分别为 $i_{AC} = 2121$ A、 $i_{AC} = -2121$ A 时限流器铁芯随图 5 所示路径： $A-B-C-D-A$ 和 $A-B-E-F-A$ 的磁感应强度变化情况。由图 4(a)、4(b)可知，在交流电流的正半周期，在右侧铁芯柱中，交流磁通均沿着铁芯柱向下，相互叠加，右铁芯磁

路饱和程度加剧，处于增磁状态；而左侧铁芯柱中，交流磁通沿着铁芯柱向上，而直流磁通沿着铁芯柱向下，两者磁通方向相反，磁通相抵消，处于去磁状态；在交流电流的负半周，磁通作用与电流正半周的情况刚好相反，限流器左右铁芯柱交替退饱和，分别在交流电流的正、负半周期限流。

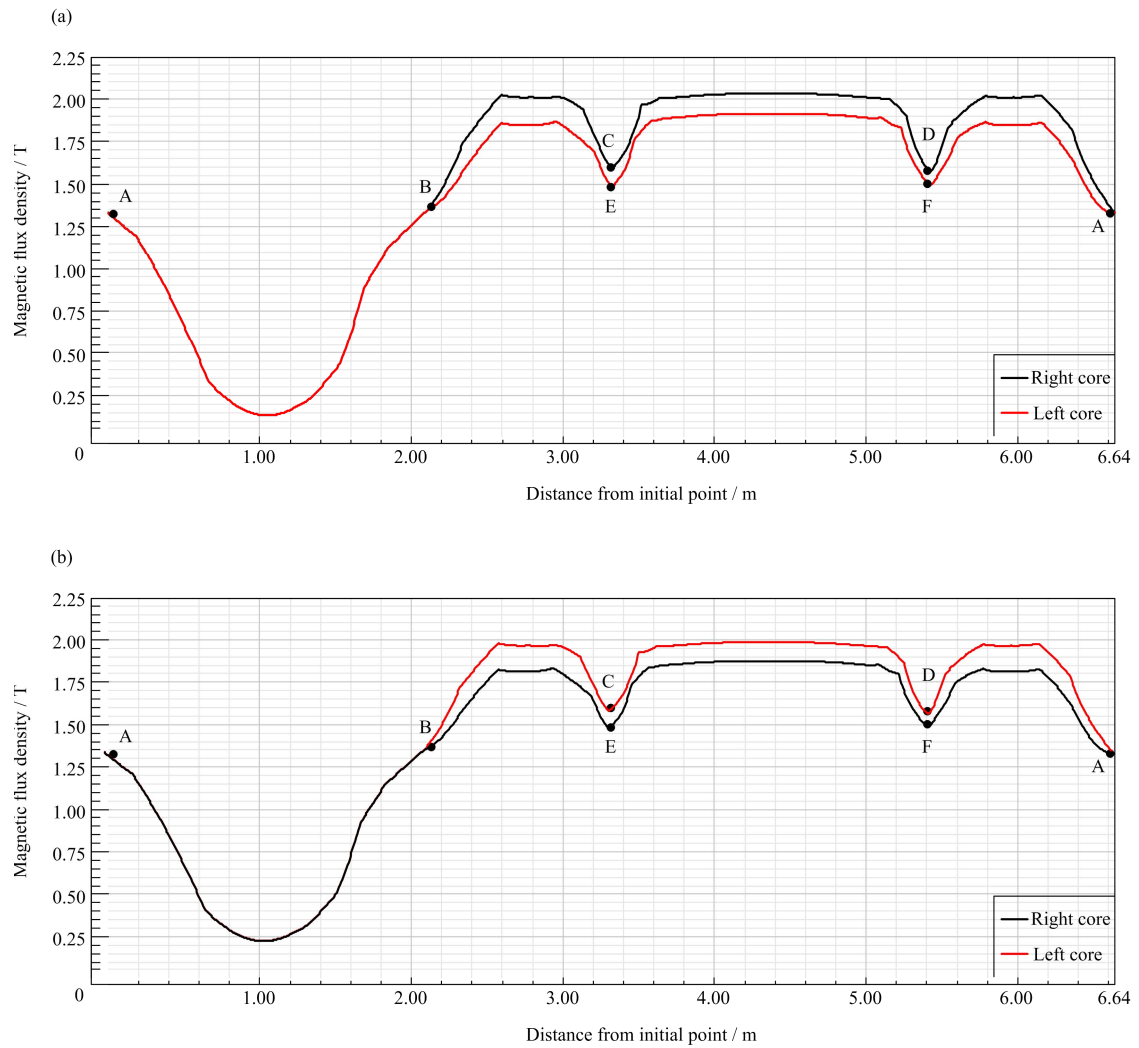


图 4 铁芯磁感应强度沿路径分布

Fig.4 The core of magnetic flux density distribution along the path: (a) $I_{DC} = 300$ A, $i_{AC} = 2121$ A, (b) $I_{DC} = 300$ A, $i_{AC} = -2121$ A

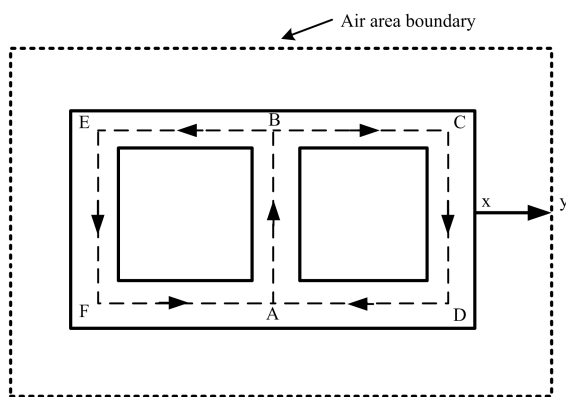


图 5 铁芯路径示意图
Fig.5 Core path schematic

2.2 漏磁场分布特点分析

采用有限元法来精确求解 SISFCL 的漏磁能

量, 根据表 1 建立单相 SISFCL 及其周围空间的三维物理模型, 所建物理模型及求解区域如图 6 所示。

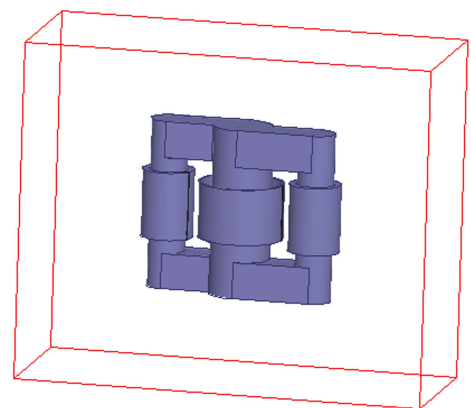


图 6 物理模型和求解区域
Fig.6 Physical model and solution area

漏磁场区域内的漏磁能量按式(1)计算：

$$W_{\delta} = \frac{1}{2} \int_{\nu} B H d\nu \quad (1)$$

式中： ν 为漏磁场区域(m^3)； B 为 ν 内的磁感应强度(T)； H 为 ν 内的磁场强度(A/m)。

为得到 SISFCL 在不同电流激励下的漏磁能量变化规律，分别对直流超导绕组和交流绕组施加不同的电流值，图 7(a)、7(b)分别为漏磁能量随直流

超导绕组和交流绕组中绕组电流的变化曲线。由图 7 可知，漏磁区域的漏磁能量均随着 SISFCL 直流绕组电流和交流绕组电流增大；当加载的绕组电流比较小时，铁芯还没有饱和，磁通大部分全部通过铁芯，形成主磁通，很少一部分磁通形成漏磁通，在漏磁空间以漏磁能量的形式分布；当增大加载的绕组电流时，铁芯渐渐进入饱和状态，有很大一部分磁通离开铁芯变成漏磁通，使漏磁能量急剧增加。

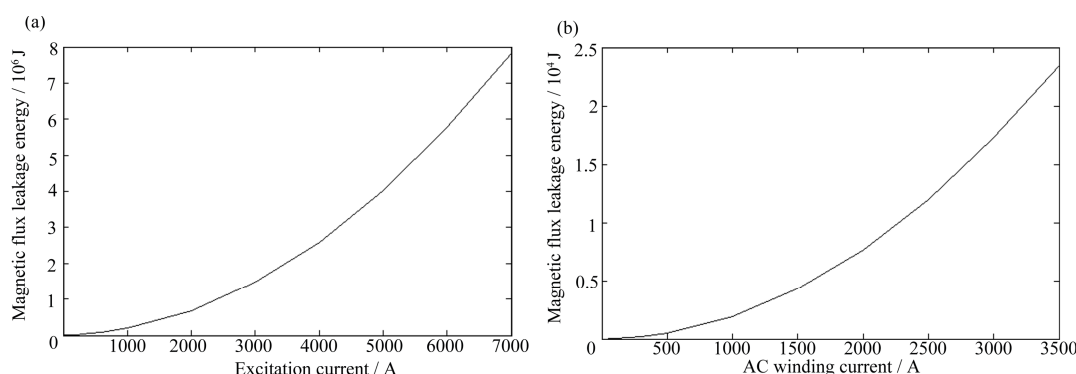


图 7 不同绕组电流下的漏磁能量：(a)直流超导绕组，(b)交流绕组
Fig.7 Leakage magnetic energy of different winding currents: (a) DC winding, (b) AC winding

在相同交流电流和不同直流励磁电流下，为研究 SISFCL 限流器随图 5 所示路径 $x \rightarrow y$ (右交流绕组边界—空气区域边界)的漏磁感应强度变化情况，对限流器施加交流电流 $i_{AC} = 2121 \text{ A}$ ，直流电流分别为 $I_{DC} = 100 \text{ A}$, $I_{DC} = 200 \text{ A}$, $I_{DC} = 300 \text{ A}$ ，图 8 为 SISFCL 沿路径 $x \rightarrow y$ 的漏磁场变化的分布规律。由图 8 可知，漏磁感应强度随着直流超导绕组中励磁电流增加；当所施加的直流超导电流相同时，漏磁感应强度沿路径 x 到 y 依次减小，越靠近限流器，漏磁越严重，到空气区域边界处，漏磁场强度都降到很小的值，因此在没有采取有效屏蔽措施的情况下，超导变电站中的精密仪器及工作人员要尽量远离 SISFCL。

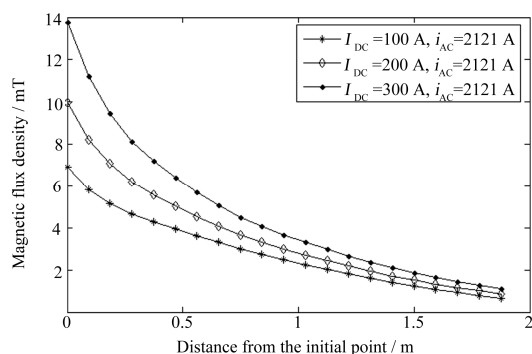


图 8 漏磁感应强度沿路径分布变化图
Fig.8 Magnetic flux leakage distribution along the path

3 考虑漏磁影响的 SISFCL 等效磁路建模

3.1 磁场划分

根据图 6 所建立的 SISFCL 三维物理模型进行有限元分析，得到图 9 所示的考虑漏磁影响的 SISFCL 的磁场分布。为简化起见，作以下假设：(1)仅考虑铁芯柱侧面的漏磁通，所有磁通管 Z 方向长度相同；(2)对于一段场强 H 变化的铁芯，假设它的场强 H 沿平均长度方向的变化是均匀的；(3)各媒质为各向同性材料，且忽略时变场频率的影响。

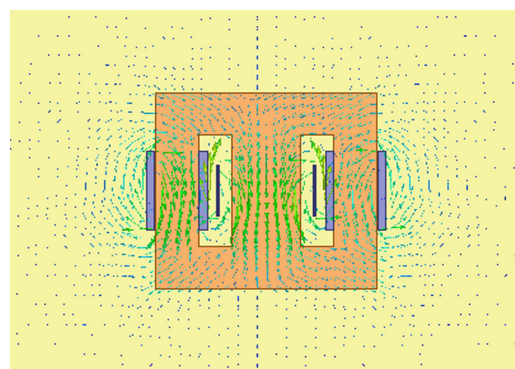


图 9 考虑漏磁场的 SISFCL 磁场分布
Fig.9 Magnetic field distribution of SISFCL with flux leakage effect

基于以上假设,根据图9在Ansys Maxwell软件中仿真出的磁场分布图将限流器磁路划分为如图10所示的铁芯主磁路 and 不同漏磁路径。将限流器左铁芯柱和右铁芯柱的外侧漏磁场划分成3种不同截面形状的柱形磁通管:弓形磁通管A1、半月形磁通管A2和半圆环形磁通管A3。左右侧铁芯柱与中柱铁芯之间的漏磁场表示为矩形柱磁通管A4,左铁芯柱和右铁芯柱的内侧漏磁场也用磁通管A1、A2表示。

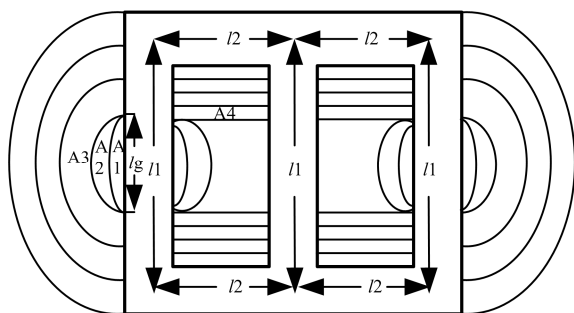


图10 SISFCL 磁场分布图
Fig.10 Magnetic field partition of SISFCL

3.2 主磁路磁导计算

根据限流器铁芯磁路划分,将交直流绕组及每段铁芯磁导均作为集总参数元件来处理。

交流铜绕组提供的磁动势为:

$$F_{AC} = N_{AC} i_{AC} \quad (2)$$

直流超导绕组提供的磁动势为:

$$F_{DC} = N_{DC} I_{DC} \quad (3)$$

由于铁芯材料 DQ130 是非线性的,令 μ_i 为 B_i 的函数,则任意一段铁芯的磁导为:

$$G_i = \frac{\mu_i(B_i) S_i}{l_i} \quad i=1,2,3,4,5 \quad (4)$$

其中: l_i 为第 i 段铁芯的长度(m); S_i 为第 i 段铁芯的截面积(m^2); $\mu_i(B_i)$ 为第 i 段铁芯的磁导率(H/m)。在铁芯的对称位置,交直流磁通的叠加作用不同,因此每一段铁芯的磁导率不同。

3.3 漏磁导计算

由图9复杂的漏磁分布不难看出漏磁导的计算要麻烦的多。本文采用磁场分割的方法^[19-20]来求解限流器的漏磁导。图11为3种不同截面形状的磁通管,设3种柱形磁通管Z向长度均为 $l = 584$ mm,其他参数见表1。

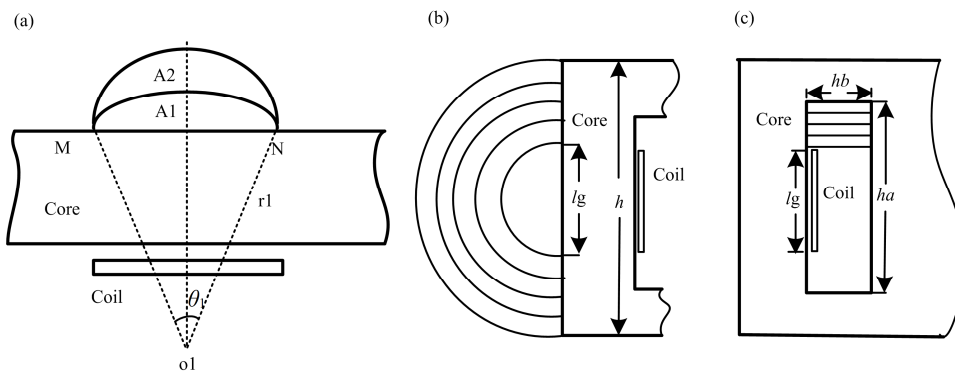


图11 漏磁通的简单划分: (a)弓形和半月形截面磁通管, (b)半圆环形截面磁通管, (c)矩形截面磁通管
Fig.11 Simple division of flux leakage: (a) flux tube of bow and half-moon cross-section, (b) flux tube of semi-circular cross-section, (c) flux tube of rectangular cross-section

弓形截面磁通管A1、半月形截面磁通管A2、半圆形截面磁通管A3和矩形截面磁通管A4的漏磁导计算式分别为:

$$G_{A1} = \frac{\mu_0 l \theta_1}{12} = 0.06594 \mu_0 \quad (5)$$

经测量, $\theta_1 = 1.355$ 弧度,真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Wb/(A·m)。

$$G_{A2} = \mu_0 l \frac{\pi - \theta_1}{12} = 0.08687 \mu_0 \quad (6)$$

$$G_{A3} = \mu_0 \frac{l}{\pi} \ln \left(1 + \frac{h - l_g}{l_g} \right) = 0.17132 \mu_0 \quad (7)$$

其中:

$$h = h_a + 2d_{AC} \quad (8)$$

$$G_{A4} = \frac{\mu_0(h_a - l_g)l}{2h_b} = 0.292\mu_0 \quad (9)$$

3.4 等效磁路模型

根据以上超导故障限流器的磁场划分及主磁路磁导和漏磁导计算结果，建立图 12 所示的 SISFCL 等效磁路模型。图 12 中 G_1 – G_5 表示铁芯的主磁路磁导， G_6 和 G_7 表示漏磁导，且

$$G_6 = 4(G_{A1} + G_{A2}) + 3G_{A3} \quad (10)$$

$$G_7 = G_{A4} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} G_1 + G_4 + G_6 + G_7 & -(G_4 + G_7) & 0 & -(G_1 + G_6) & 0 \\ -(G_4 + G_7) & G_3 + G_4 + G_5 + 2G_7 & -(G_5 + G_7) & 0 & 0 \\ 0 & -(G_5 + G_7) & G_2 + G_5 + G_6 + G_7 & 0 & -(G_2 + G_6) \\ -(G_1 + G_6) & 0 & 0 & G_1 + G_4 + G_6 + G_7 & 0 \\ 0 & 0 & -(G_2 + G_6) & -(G_5 + G_7) & G_2 + G_5 + G_6 + G_7 \end{bmatrix} g \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \\ F_d \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{AC}G_1 \\ -F_{DC}G_3 \\ -F_{AC}G_2 \\ -F_{AC}G_1 \\ F_{AC}G_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

求解方程(12)可得到铁芯边柱磁通 ϕ_{AC} ，由式(13)即可求得交流绕组电感。

$$L = \frac{N_{AC}\phi_{AC}}{i_{AC}} \quad (13)$$

4 结果分析

为了验证图 12 建立的等效磁路模型的有效性和准确性，对研究的 SISFCL 进行测试。图 13 为调节交流电流为 2121 A，不同直流励磁下限流器电抗 X 的实测值和仿真结果对比图。

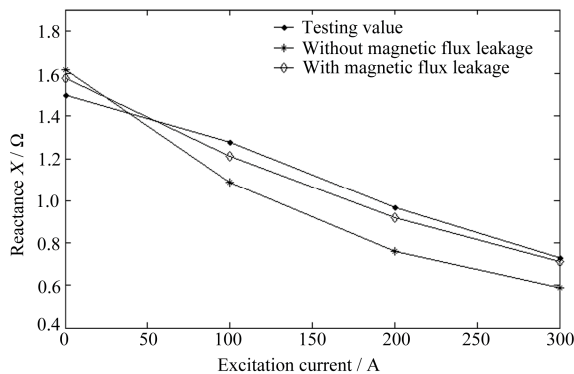


图 13 $i_{AC} = 2121$ A 超导故障限流器电抗的实测值和仿真结果对比

Fig.13 Reactance of SISFCL by testing and calculation for $i_{AC} = 2121$ A

根据图 12 所建磁路模型得到以“o”为参考磁位点的磁动势方程如式(12)。

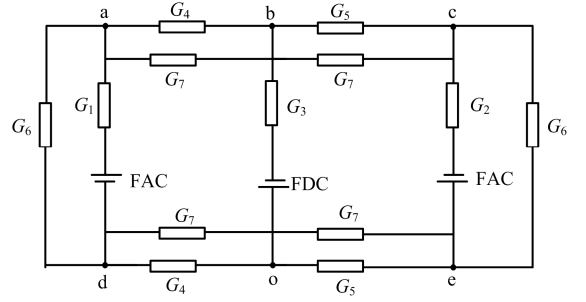


图 12 考虑漏磁影响的等效磁路模型
Fig.12 Equivalent magnetic circuit model with flux leakage effect

由图 13 可知，当励磁电流 $I_{DC} = 0$ A 时，电抗最大，增大励磁电流，铁芯饱和程度加剧，电抗随之减小。考虑漏磁效应后，电抗的仿真结果更接近实测值，更能反映 SISFCL 的实际工作情况。

5 结论

通过对 SISFCL 进行三维有限元分析，得到漏磁能量随绕组电流的变化规律及漏磁场分布特点，将漏磁区域等效成不同形状的磁通管，建立了考虑漏磁影响的 SISFCL 等效磁路模型。计算了 SISFCL 在不同励磁电流下的电抗值，考虑漏磁效应后，电抗的仿真结果更接近实测值。该结果为研究 SISFCL 的电磁特性、优化设计、漏磁场屏蔽等方面提供了参考依据，同时也对后续研究 SISFCL 的电气特性具有一定的参考价值。

参考文献

- 1 孙树敏, 刘洪顺, 李庆民, 等. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 75-79. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2008.21.016.
SUN Shumin, LIU Hongshun, LI Qingmin, *et al.* A summarization of research on fault current limiter of power system [J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 75-79. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2008.21. 016.

- 2 郑健超. 故障电流限制器发展现状与应用前景[J]. 中国电机工程学报, 2014, **34**(29): 5140-5148. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.016.
ZHENG Jianchao. Current status and application prospect of fault current limiters [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, **34**(29): 5140-5148. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.016.
- 3 石晶, 邹积岩, 何俊佳. 电力系统的限流串联补偿原理与实现[J]. 华中理工大学学报, 1999, **27**(8): 75-78. DOI: 10.13245/j.hust.1999.08.027.
SHI Jing, ZOU Jiyan, HE Junjia. The principle of a fault current limiter (FCL) with series compensation and its achievement [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1999, **27**(8): 75-78. DOI: 10.13245/j.hust.1999.08.027.
- 4 ZHAO Cuixia, WANG Shuhong, QIU Jie, *et al.* Transient simulation and analysis for saturated core high temperature superconducting fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, **43**(4): 1813-1816. DOI: 10.1109/TMAG.2007.892527.
- 5 石晶, 邹积岩, 何俊佳, 等. 故障电流限制技术及研究进展[J]. 电网技术, 1999, **23**(12): 63-66. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.1999.12.018.
SHI Jing, ZOU Jiyan, HE Junjia, *et al.* Development of fault current limiting technique and its progress [J]. Power System Technology, 1999, **23**(12): 63-66. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.1999.12.018.
- 6 信赢. 超导限流器综述[J]. 南方电网技术, 2015, **9**(3): 1-9. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.03.001.
XIN Ying. Review on superconducting fault current limiters [J]. Southern Power System Technology, 2015, **9**(3): 1-9. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.03.001.
- 7 王付胜, 刘小宁. 饱和铁心型高温超导故障限流器数学模型的分析与参数设计[J]. 电机工程学报, 2003, **23**(8): 135-139. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2003.08.027.
WANG Fusheng, LIU Xiaoning. Model analysis of a high temperature superconducting fault current limiter and its parameter designment [J]. IEEE Proceedings of the CSEE, 2003, **23**(8): 135-139. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2003.08.027.
- 8 Raju B P, Parton K C, Barram T C. A current limiting device using superconducting D.C. bias applications and prospects [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1982, **101**(9): 3173-3177. DOI: 10.1109/MPER.1982.5519468.
- 9 Yasuda K, Ichinose A, Kimura A, *et al.* Research & development of superconducting fault current limiter in Japan [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, **15**(2): 1978-1981. DOI: 10.1109/TASC.2005.849349.
- 10 Moriconi F, De La Rosa F, Darmann F, *et al.* Development and deployment of saturated-core fault current limiters in distribution and transmission substations [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, **21**(3): 1288-1293. DOI: 10.1109/TASC.2011.2104932.
- 11 Moriconi F, Koshnick N, De La Rosa F. Modeling and test validation of a 15 kV/24 MVA superconducting fault current limiter [C]. 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010: 1-4. DOI: 10.1109/TDC.2010.5484412
- 12 Xin Y, Hong H, Wang J Z, *et al.* Performance of the 35kV/90MVA SFCL in live-grid fault current limiting tests [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, **21**(3): 1294 -1297. DOI: 10.1109/TASC.2011.2105452.
- 13 Xin Y, Gong W Z, Niu X Y, *et al.* Manufacturing and test of a 35 kV / 90 MVA saturated iron-core type superconductive fault current limiter for live-grid operation [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, **19**(3): 1934-1937. DOI: 10.1109/TASC.2009.2018510.
- 14 HONG Hui, CAO Zhengjian, ZHANG Jingyin, *et al.* DC magnetization system for a 35 kV / 90 MVA superconducting saturated iron-core fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, **19**(3): 1851-1854. DOI: 10.1109/TASC.2009.2019292.
- 15 XIN Ying, GONG Weizhi, HONG Hui, *et al.* Development of a 220kV/300MVA superconductive fault current limiter [J]. Superconductor Science and Technology, 2012, **25**(10): 4-7. DOI: 10.1088/0953-2048/25/10/105011.
- 16 高永全, 洪辉, 田波, 等. 35 kV 超导限流器中超导绕组骨架的设计[J]. 机械设计, 2007, **24**(9): 39-42. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2007.09.013.
GAO Yongquan, HONG Hui, TIAN Bo, *et al.* Design of superconductive winding framework of 35kV superconductive current limiter [J]. Journal of Machine

- Design, 2007, **24**(9): 39-42. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2007.09.013.
- 17 KOU Baoquan, SONG Liwei, ZHANG Qianfan, *et al.* The principle and design of the permanent magnet bias DC reactor [J]. IEEE Electrical Machines and Systems, 2001, **1**: 230-232. DOI: 10.1109/ICEMS.2001.970653.
- 18 ZHENG Weijie, ZHOU Xiaoxin, LI Yalou, *et al.* Inverse-hyperbolic dynamic model for extra and ultra voltage magnetically controlled shunt reactor [C]. 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010: 2820-2823. DOI: 10.1109/iCECE.2010.689.
- 19 詹琼华, Hareb F O. 用位势通量法计算单相开关磁阻电机气隙磁导[J]. 微电机, 2001, **34**(2): 8-11. DOI: 10.15934/j.cnki.micromotors.2001.02.002.
ZHAN Qionghua, Hareb F O. Using slice-tube method to calculate the air gap permeance for the single phase switched reluctance motor [J]. Micro-motor, 2001, **34**(2): 8-11. DOI: 10.15934/j.cnki.micromotors.2001.02.002.
- 20 林其壬, 赵佑民. 磁路设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 322-361.
LIN Qiren, ZHAO Youmin. Principle of magnetic circuit design [M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 322-361.