

直流 SMC 铁心高温超导故障限流器的研究

褚建峰¹, 孟向军²

(1. 武警石家庄士官学校通信三系, 河北 石家庄 050061; 2. 许继集团柔性输电系统公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 分析了直流电力系统保护的发展现状, 设计了一种铁心型高温超导故障限流器。为了尽量延长限流的时间, 限流器的铁心采用软磁复合材料 (SMC)。限流器在系统正常工作时对电力系统影响很小, 当短路故障发生时, 它会很快表现为大阻抗以限制短路电流。基于磁场有限元与电路耦合的计算方法, 首先对限流线圈在短路过程中的非线性电感进行精确计算, 然后结合计算结果, 在电路仿真程序中计算短路电流。通过对比 SMC 与硅钢铁心材料限流器的限流情况, 可以看出 SMC 铁心限流器对于直流电力系统短路故障的限流效果更好。在短路故障发生后 8 ms 时, 该限流器能将短路电流限制到最大值的 12%。

关键词: 直流; 高温超导; 故障限流器; 铁心型; 软磁复合材料

Study of DC high temperature superconducting fault current limiter using soft magnetic composites

CHU Jian-feng¹, MENG Xiang-jun²

(1. The Third Department of Communication, Shijiazhuang Sergeant School of CAPF, Shijiazhuang 050061, China;
2. XJ Flexible Transmission System Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The progress of the research on DC power system protection equipment is reviewed. A magnetic core direct current (DC) high temperature superconducting (HTS) fault current limiter (FCL) saturated by DC bias winding is presented. The core of SFCL is made of soft magnetic composites (SMC) to prolong the current limiting time. The inductance of the winding, which is connected in the power system to be protected, is small in normal operation. However, when a short-circuit fault occurs, the SFCL can provide large inductance to reduce the fault current. The design and analysis methodology of the SFCL is developed. The performance evaluation of the SFCL is performed through numerical simulation by using 3-dimensional finite element analysis (FEA) of magnetic field coupled with the transient nonlinear circuit model. A comparison with silicon steel core FCL shows that the SMC core HTS FCL has rapid response to limit fault current and a good limiting effect. The maximum value of short-circuit current will be reduced to 12 percent at 8 ms.

Key words: DC; high temperature superconducting; fault current limiter; core; soft magnetic composites

中图分类号: TM725

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)13-0059-05

0 引言

短路故障一直是电力系统保护的瓶颈问题, 限流设备逐渐成为电力保护研究的热点。近年来, 故障限流器 (Fault Current Limiter, FCL) 在电力系统中的应用研究越来越广泛。20世纪80年代后期, 随着高温超导体的发现, 高温超导 (High Temperature Superconducting, HTS) 技术得到了广泛研究和应用, 学者们研制了多种 HTS FCL, 并对其性能进行了分析^[1-6]。

直流电力系统安装容量大, 安全性能要求高, 在船舶的大容量发电机短路试验研究中, 短路电流甚至可以达到几百千安^[7]。断路器的分断能力已经

越来越不能满足直流系统短路电流水平不断增长的要求^[8]。为确保系统的安全, 必须在断路器之前安装限流器。

日本、德国、法国等国家已经开展了对直流限流器的研究, 国内直流限流器的研究主要是在船舶电力系统领域。直流 SFCL 大致可以分为电阻型和电感型两种类型。电阻型是利用超导材料在短路时由超导状态转变到正常状态 (S/N), 从而呈现大电阻值, 限制短路电流, 这对高温超导材料的性能要求很高。在文献[9]中提到的一种电感型直流 SFCL 也可以称为磁通补偿型, 它是两个自感相同的超导耦合线圈均绕制在同一个铁心上, 其中一个线圈串联接在直流系统中, 另一个线圈串联接偏置电源。正

常运行时两个超导线圈通过的电流大小相等、方向相反，铁心中的磁通近似为零，限流器对系统影响甚微，一旦发生短路故障，负载回路电流急速增大，铁心中磁通不再为零，短路电流将被超导线圈电感限制^[9]。两个超导线圈绕制在同一个铁心上，可以节省铁心的材料，但必须考虑超导材料发生S/N转变后的恢复等问题。

本文设计了一种使用SMC铁心的直流感应型HTS FCL，分析了该限流器的工作原理并介绍了其铁心材料。选用有限元结合电路的分析方法，针对给定直流系统，给出了限流器设计结构，并对系统使用该限流器和使用普通铁心限流器两种情况下的限流性能进行了对比。最后，分析了设计参数对限流性能的影响。

1 系统模型

1.1 工作原理

直流铁心型超导故障限流器可以看作是一个大的铁心电感限流装置，两个线圈分别绕制在不同的两个铁心柱上。直流铁心型超导限流器的原理如图1所示，左侧电路为直流系统，限流的铜线圈串联在系统中， R_{load} 为负载电阻， U_s 为系统直流发电机， R_s 为发电机内阻；右侧为超导线圈连接的直流偏置电源 I_s ，为铁心提供反向励磁。两个线圈中的电流产生的磁通 B_1 和 B_2 方向相反。

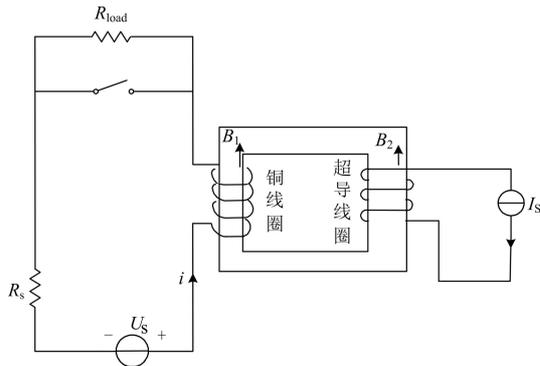


图1 直流 SFCL 限流原理图

Fig. 1 Schematic diagram of DC saturated core HTS FCL

假设限流线圈铁心柱磁场强度均匀，系统在正常工作时，因为电流很大，如果只用铜线圈而不加偏置，系统电流很可能会把铁心工作状态点推移至磁化曲线正向饱和区，所以必须使用偏置系统将工作状态点推移到非线性区域，甚至反向饱和区域才能起到限流作用。直流偏置系统使用的线圈采用高温超导带材绕制，流过线圈的是直流电流，超导带材的损耗可以忽略。

使用直流超导限流器后，在系统正常运行时，

铁心处于反向饱和状态，限流器对系统无影响。短路故障发生时，瞬间增大的电流使铜线圈铁心由反向磁饱和状态向正向磁饱和状态转变，在非饱和区域内，铁心的磁导率非常大，线圈会表现为大电感，系统的时间常数增大，线圈的限流作用增强。

直流系统正常工作时，铁心工作点的理想位置在反向饱和状态并接近非饱和区的位置，一方面工作点临近非饱和区域，发生短路时，铁心的状态能很快进入线性区，大电感能够快速对短路电流加以限制，限流器的反应速度非常快，利于有效配合断路器等保护设备的动作；另一方面较深的饱和程度需要很大的励磁，这会增加直流偏置系统的成本，而深度饱和区域对应线圈的电感值很小，限流效率低。

1.2 软磁复合材料的简介

软磁复合材料(Soft Magnetic Composites, SMC)是由包覆绝缘层的小铁粉颗粒制成^[10]。铁粉粒度小于传统粉末，颗粒包覆相对厚的绝缘层，与大量粘结剂混合，降低了涡流回路的尺寸，使得所制成的部件具有良好的高频性能。SMC材料的最大相对磁导率比较低，但磁导率的变化相对缓慢^[11]。图2是SMC和硅钢的B-H曲线，可以看出SMC的B-H曲线明显比硅钢的B-H曲线平缓，斜率变化速度慢，较硅钢材料有相对较宽的未饱和范围。因此用SMC材料制成的铁心，能在较大的励磁电流下保持比较高的磁导率。

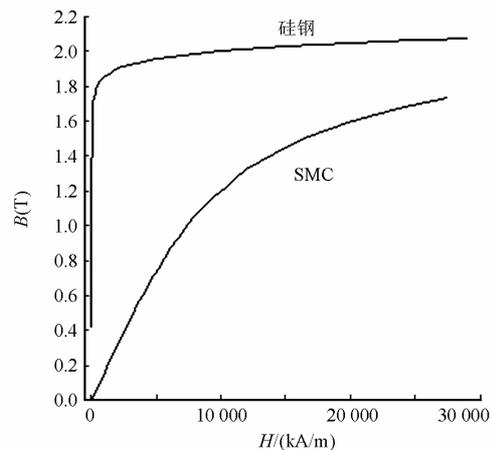


图2 SMC 和硅钢材料 B-H 曲线

Fig. 2 B-H curve of SMC and siliconsteel material

2 分析方法与建模

由于SFCL在限流工作状态时，其铁心磁导率与短路电流的关系具有很强的非线性关系。使用ANSYS软件，基于能量摄动法^[12-13]计算铜线圈在不

同电流下的电感变化曲线(L - I 曲线), 在Matlab环境中, 依据电路方程使用Simulink模块建立仿真电路模型, 将 L - I 曲线读入到仿真电路中, 对短路电流进行计算并分析结果。

2.1 计算电感

采用能量摄动法计算电感, 假设限流线圈有 n 匝绕组, 第 i 匝绕组中的电流是 i_i , 磁通链为 ψ_i 。则整个线圈中储存的磁场能量为

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^n \int_{i_k(0)}^{i_k(t)} (L_{ik} i_i) \cdot di_k \right] \quad (1)$$

$$\text{其中 } L_{ik} = \frac{d\psi_i}{di_k} \quad i, k=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

如果电流发生一微小的变化 ΔI_i , 总能量 W 会相应产生一微小变化 ΔW ; 由于电流变化很小, 所以可将 L_{jk} 视为常值, 则 ΔW 可写为

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^n L_{ik} \int_{i_k}^{i_k+\Delta i_k} i_i di_k \right] = \sum_{i=1}^n L_{ii} \int_{i_i}^{i_i+\Delta i_i} i_i di_i + \sum_{i=1}^n \left[\sum_{\substack{k=1 \\ (k \neq i)}}^n L_{ik} \int_{i_k}^{i_k+\Delta i_k} i_i di_k \right] \quad (3)$$

由式(3)分析得出电感为

$$L_{dii} = \frac{d^2 W}{d(I_i)^2}, \quad L_{dik} = \frac{d^2 W}{d(I_i) d(I_k)} \quad (4)$$

其中: L_{dii} 是第 i 个绕组的自感; L_{dik} 是第 i 个绕组与第 k 个绕组之间的互感。

应用ANSYS计算铜线圈绕组电感值。采用棱边单元法, 单元类型选用SOLI117单元, 考虑到研究对象的对称性, 只建限流器的下半部分模型, 如图3所示, 其中左侧线圈为铜线圈, 右侧线圈为超导带材绕制的线圈。

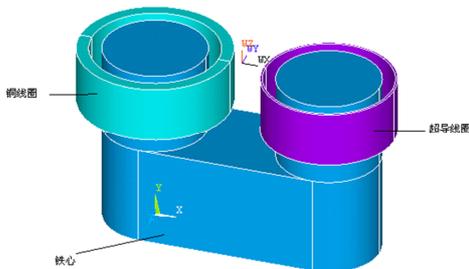


图3 FCL 的模型

Fig. 3 FCL model

2.2 电路建模

在图1的左侧直流回路中, 依据基尔霍夫电压定律建立电路中各元件电压的回路方程。

$$U_s = R_{load} i + R_s i + L(i) \frac{di}{dt} \quad (5)$$

其中, $L(i)$ 为铜线圈的电感值。使用Matlab软件中的Simulink仿真模块, 根据系统电路方程, 即公式(5)建立仿真框图, 如图4所示。其中查表模块LOOK-UP TABLE中的 L - i 关系曲线取自2.1节中的计算结果。系统使用变步长的四/五阶龙格-库塔法求解, 最大步长设定为0.000 01 s, 相对误差不超过0.001。

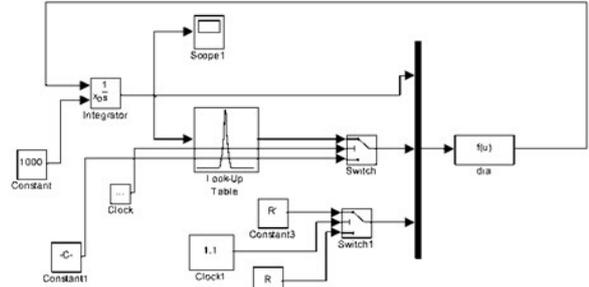


图4 限流电路的仿真模型

Fig. 4 Simulation model of limiting circuit

3 实际算例

3.1 设计要求和参数确定

如图1所示, 直流发电系统的电压为 $U_s=4\ 200$ V, 系统正常工作时的电流值为2.5 kA, 最恶劣短路故障发生后, 系统电流最大值达到60 kA, 系统内部电阻 $R_s=0.07\ \Omega$, 负载电阻 $R_L=1.61\ \Omega$ 。

铁心柱横截面积和线圈匝数的设计是参考铁心电抗器和变压器的设计经验^[14]给出的。超导偏置线圈可采用目前应用较为普遍的Bi-2223/Ag带材绕制, 该带材宽度为5 mm、厚度小于0.4 mm, 其最大载流能力约为125 mA^[15]。多层带材并绕使用时, 带材的临界电流值会下降, 每根带材的载流也可能不均匀。超导线圈的内径和高度参照铜线圈尺寸; 超导线圈的匝数和偏置电流的大小, 可在保证正常工作铁心处于反向饱和状态的条件下进行估算。限流器的主要参数如表1所示。

表1 直流铁心型超导限流器的参数

Table 1 Parameters of DC iron-core SFCL

参数	设计值	参数	设计值
铁心柱直径	500 mm	铜线圈内径	720 mm
铁心窗宽	500 mm	铜线圈外径	840 mm
铁心窗高	1 000 mm	铜线圈高度	700 mm
铜绕组匝数	30		

3.2 电感计算结果

分别使用SMC和普通硅钢片做铁心，在不加偏置时给铜线圈加不同的电流，计算不同电流时刻线圈的电感值，其计算结果见图5，其中虚线是SMC铁心线圈的电感与电流关系，实线是硅钢材料铁心线圈的电感与电流关系。

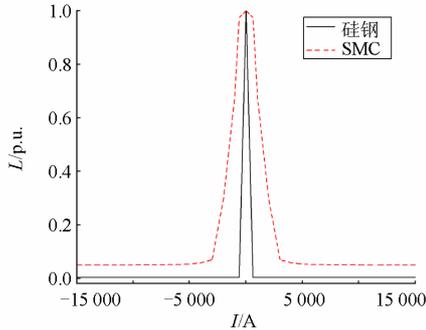


图5 不同铁心限流线圈电感与电流的关系
Fig. 5 Relationship of inductance and current

可以看出SMC铁心线圈有较宽的大电感范围，所以它对单上升的直流电流限流作用强。硅钢片铁心线圈的大电感区域相对较窄，所以其对直流电流限流作用弱。

3.3 电路仿真与分析

直流系统短路后，电路中的电流就会单向急速增加到最大值。如果不使用限流器，也不考虑线路上的阻抗，那么短路电流会在瞬间近似直线上升。使用限流器则可以减缓电流曲线的上升过程，延长电流的上升时间。

直流限流器在设计过程中，可以改变的参数主要有线圈匝数、铁心横截面积和偏置磁动势 (Magnetic Motive Force, MMF)。为了对比不同铁心限流器对短路故障的限流效果，直流系统分别应用SMC铁心限流器和硅钢片铁心限流器，电路发生故障后的短路电流见图6。

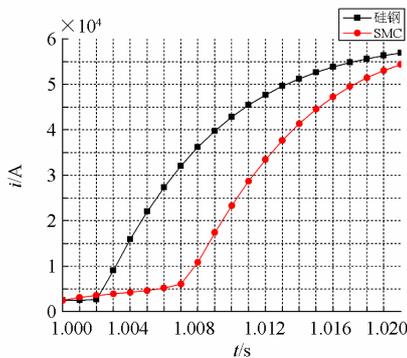


图6 不同铁心限流器的限流效果
Fig. 6 Limited fault current curves in simulation

设定短路故障发生时刻为电路接通后1 s，通过比较可以看出，应用SMC铁心限流器在短路后2 ms以内相比硅钢铁心限流器对短路电流的限制作用稍差，但在随后的时间内，尤其是在2~10 ms，对短路电流限制作用更强，能有效地限制短路电流的上升，减缓短路电流到达最大值的时间。所以SMC铁心限流器更适合应用于直流系统的短路故障保护。

改变直流SMC铁心限流器的偏置MMF、铁心横截面积和限流线圈的匝数，通过大量仿真计算结果可以看出：偏置MMF对限流器的限流作用影响最大。另外铁心柱横截面积越大，限流线圈匝数越多，限流的效果就会越好。当然，增大铁心柱横截面积或增加线圈匝数，都会明显增大限流器的体积。

4 结论

本文设计了一种直流铁心型高温超导故障限流器，使用磁场有限元与电路耦合的计算方法，分析了其限流性能，得出结论：

- (1) 直流铁心型超导限流器能够快速地对短路电流进行限制，限流的效果明显。
- (2) 限流线圈铁心在正常工作时应处于反向饱和且临近非饱和的状态。
- (3) SMC铁心限流器可以延长限流时间，更适合应用于直流电路的保护。
- (4) 偏置系统MMF，铁心横截面积和线圈匝数三个参数对限流性能影响较大。

随着直流供电系统的不断发展和应用，直流超导限流器的研究正在成为直流系统保护的一个热点。直流铁心型超导故障限流器在正常工作时对供电系统影响很小，短路故障发生时，它却能很快表现为大阻抗来限制短路电流。超导材料无论是在系统正常工作状态，还是故障状态都不发生S/N转变，不存在S/N转变后的恢复问题，实际应用中可靠性强。

目前直流限流器处在探索阶段，还存在一些问题：

- (1) 本文只研究了SFCL的电气特性，在短路过程中SFCL的限流线圈会产生大量的热量，同时线圈会受到很大的横向电力，这些问题需要进一步研究。
- (2) 实际应用中，直流系统的电流值很大，两个线圈的励磁都很强，漏磁通产生的热损耗等问题也要考虑。
- (3) 需要使用优化理论和方法对设计进行优化，使限流器在能够达到设计要求的条件下，体积最小，经济效益最高。

参考文献

- [1] 刘凯, 陈红坤, 林军, 等. 故障限流器在电力系统中应用研究现状[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 147-151.
LIU Kai, CHEN Hong-kun, LIN Jun, et al. Study situation of applications of fault current limiter in power system [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 147-151.
- [2] 江道灼, 毛航银, 敖志香, 等. 串联谐振式限流器的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 153-158.
JIANG Dao-zhuo, MAO Hang-yin, AO Zhi-xiang, et al. Simulation study of series resonance type fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 153-158.
- [3] 金鑫, 江道灼. 并联补偿电容对限流器运行影响的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 54-57, 61.
JIN Xin, JIANG Dao-zhuo. Simulation research on the effect of the paralleled compensating capacitor on the solid state fault current limiter operation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 54-57, 61.
- [4] 何熠, 吴爱国, 信赢. 饱和铁心型超导限流器故障电流快速模式识别[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 81-87.
HE Yi, WU Ai-guo, XIN Ying. Rapid pattern recognition of fault current for HTS three-phase saturated iron core fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 81-87.
- [5] 张晚英, 周有庆, 赵伟明, 等. 改进桥路型高温超导故障限流器的实验研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 70-76.
ZHANG Wan-ying, ZHOU You-qing, ZHAO Wei-ming, et al. Experimental research on an improved rectifier type high temperature superconducting fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 70-76.
- [6] 顾雪平, 杨智龙. 不对称短路时电抗型故障限流器对暂态稳定性的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 86-92.
GU Xue-ping, YANG Zhi-long. Influences of reactance-type fault current limiter on power system transient stability with asymmetrical short-circuit faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 86-92.
- [7] 曾欣, 王凌峰. 某型 350 MVA 短路试验发电机试验系统突然短路的研究[J]. 船电技术, 2009, 29(1): 20-23.
ZENG Xin, WANG Ling-feng. Research of testing system short circuit for 350 MVA short circuit testing generator[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2009, 29(1): 20-23.
- [8] 桂永胜, 唐剑飞. 舰船电力系统的限流保护技术[J]. 中国舰船研究, 2007, 2(2): 27-30.
GUI Yong-sheng, TANG Jian-fei. Fault current limiter of ship power system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2007, 2(2): 27-30.
- [9] 王晨, 陈磊, 唐跃进, 等. 直流超导故障限流器方案设计及限流效果仿真分析[J]. 继电器, 2005, 33(6): 6-8, 19.
WANG Chen, CHEN Lei, TANG Yue-jin, et al. Scheme design and simulation analysis of limiting effect on DC superconducting fault current limiter[J]. Relay, 2005, 33(6): 6-8, 19.
- [10] CYR C, VIAROUGE P, CLÉN S, et al. Methodology to study the influence of the microscopic structure of soft magnetic composites on their global magnetization curve[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2009, 45(3): 1178-1181.
- [11] LARS-OLOV D, ALAN J. 铁粉软磁复合材料开发及其在电机上的应用[J]. 金属功能材料, 2002, 9(3): 19-25.
LARS-OLOV D, ALAN J. Development of iron power SMC-materials and its application in electrical machines[J]. Metallic Functional Materials, 2002, 9(3): 19-25.
- [12] GYIMESI M, OSTERGAARD D. Inductance computation by incremental finite element analysis[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1999, 35(3): 1119-1122.
- [13] NEHL T W, FOUAD F A, DEMERDASH N A. Determination of saturated values of rotating machinery incremental and apparent inductances by an energy perturbation method[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(12): 4441-4451.
- [14] 崔立君. 特种变压器原理与设计[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1996.
- [15] KIM J H, PARK M, ALI M H, et al. A SFCL modeling and application with real HTS material connecting to real time simulator[J]. Physica C, 2008, 468: 2067-2071.

收稿日期: 2013-09-11; 修回日期: 2014-02-10

作者简介:

褚建峰(1978-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电磁仿真计算研究和电工理论的教学工作; E-mail: chujf78@sina.com

孟向军(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力电子技术和电磁仿真研究。