

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.017

饱和铁心型超导限流器应用技术研究

冯晓东

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 短路电流水平越来越大对电力系统的安全稳定运行造成了极大的威胁。饱和铁心型超导限流器具有稳态阻抗小、损耗小、恢复时间短、限流效果好等优点, 是限制电力系统短路电流的理想设备之一。介绍了饱和铁心型超导限流器的工作原理, 阐述了其国内外发展现状, 并在此基础上分析了其应用于电力系统应考虑的重点问题。

关键词: 超导限流器; 短路电流; 暂态稳定; 重合闸; 距离保护

中图分类号: TM471

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0091-05

Application Technology Research on Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter

FENG Xiaodong

(China Energy Engineering Group Guang Dong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Short circuit current cause great threat to the safe and stable operation of the power system. Saturated core type Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) has a lot of advantages such as small steady impedance, low loss, short recovery time, and good current limiting effect. It is one of the ideal equipment for limiting short circuit current in power system. The working principle of saturated core superconducting fault current limiter is introduced. And its development situation is expounded. Based on these, this paper analyzed the key problems of its application technologies.

Key words: superconductive fault current limiter; short circuit current; transient stability; reclosing; distance protection

随着电网规模的日益扩大, 电网互联程度越来越高, 电网的短路电流水平急剧增大, 对电网的安全性和可靠性造成严重影响^[1], 并成为制约电网规模进一步扩大的主要因素^[2], 迫切需要一种有效抑制短路电流的方法或装置。

传统的限流措施主要从电网结构、系统运行方式以及设备三方面着手^[3,4]。在电网结构上, 常用的是减少互联网络的紧密型, 减小电网规模或互联程度^[5]; 在系统运行方式上, 常用的是将低电压等级电力系统解列分片运行, 或采用多母线运行或母线分段运行^[6]; 在设备上, 常用的是安装串联电抗器、分裂电抗器、高阻抗变压器等^[7]。这些方法都可对故障电流进行一定的约束, 但同时也降低了电

网优化配置能源的能力, 存在一定的缺陷^[1]。因超导故障限流器 (Superconductive Fault Current Limiter, 以下简称 SFCL) 对优化电网设计、保证电能质量、稳定系统电压、提高电网安全性等多方面都具有不可比拟的独特优势, 成为电网克服短路电流比较理想的设备, 是解决上述矛盾的有效手段^[8]。

SFCL 基于运行特性的不同, 可分为失超型和非失超型。失超型 SFCL 主要利用超导材料超导态零电阻、失超后电阻急剧增加的特性, 正常态损耗小, 限流态电阻大。这种 SFCL 理论上利用了超导材料的特性, 但在实际应用中由于超导材料的失超恢复时间较长, 难以满足系统重合闸的要求, 制约了失超型 SFCL 的应用。饱和铁心型超导限流器是非失超型的一种, 利用超导材料的大通流能力提供较强的磁场使铁心深度饱和, 装置表现出低阻抗, 限流时, 装置退出饱和, 呈现高阻抗实现限流, 是目前最具竞争优势的一类限流器^[1]。

收稿日期: 2015-03-10

作者简介: 冯晓东(1967), 女, 广东阳江人, 高级工程师, 学士, 主要从事电网工程设计工作(e-mail) fengxiaodong@gedi.com.cn。

1 饱和铁心型 SFCL 的工作原理

饱和铁心型 SFCL 一般由铁心、常规交流绕组、直流超导绕组三个部分组成，如图 1 所示^[9]。单相交流绕组为两个常规导体绕制的线圈，串联在电网中，分置于不同的铁心上，线圈产生的磁场方向相同；直流绕组由超导材料绕制而成，同时为两个铁心提供直流励磁。铁心中的磁化曲线如图 2 所示^[9]。当系统正常运行时，超导绕组中的直流励磁将产生很强的直流磁场，使铁心深度饱和，限流器工作在磁化曲线的 I 段，装置表现出较的阻抗较低，损耗小，对系统几乎无影响。当系统发生短路故障时，交流绕组中的电流瞬间增大，产生很强的交流磁场。当交流线圈在铁心中产生的磁动势接近于直流磁动势时，两个铁心将在一个周期内交替由饱和态进入非饱和态，限流器工作在曲线的 II 段，交流绕组的阻抗迅速增大从而自动限制短路电流的增加。当故障电流持续增大至交流磁动势大于直流磁动势时，铁心将反向饱和，工作在磁化曲线的 III 段，SFCL 失去限流能力。

饱和铁心型 SFCL 的主要优点在于故障态时，直流超导线圈没有超导态到正常态的过程，恢复时间较短，可以重复多次进行限流操作，且适应于自动重合闸运行。其主要缺点在于：

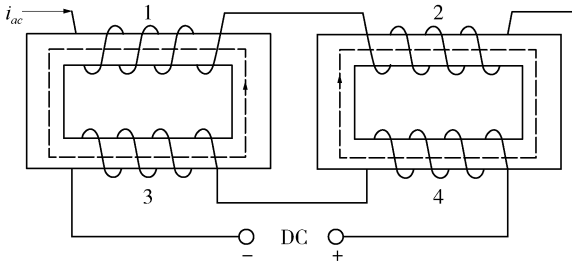


图 1 饱和铁心型 SFCL 的结构示意图
Fig. 1 The structure of Saturated core type SFCL

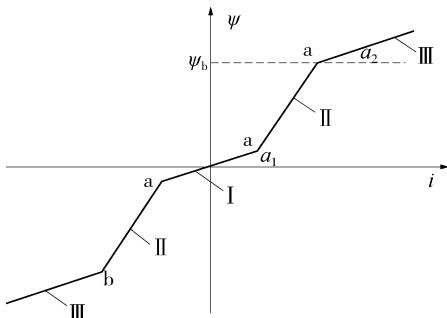


图 2 限流器铁心磁化曲线
Fig. 2 The magnetization curve of iron core

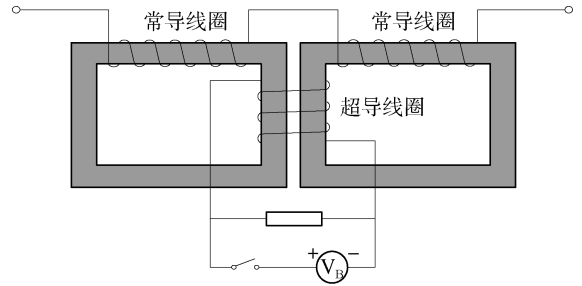


图 3 改良型饱和铁心型 SFCL 结构示意图
Fig. 3 Advanced Saturated core type SFCL

- 1) 在同一时刻起限流作用的仅为两个铁心中的一个，限流效果较弱；
- 2) 交流磁场会在直流线圈中产生交流感应电流。此感应电流会增大限流器正常工作时的压降及能量损耗，同时也会提高直流绕组对耐受感应冲击电压的要求。
- 3) 在限流期间，铁心反复饱和去饱和的过程将在电路中产生大量的电压谐波。

为解决上述问题，某公司于 2007 年研制了一台改良式饱和铁心型 SFCL，在传统的铁心型超导限流器中加入了直流控制回路，将被动式限流变为主动式限流，其结构如图 3 所示^[10]。在短路发生的瞬间，直流控制回路在故障发生 10ms 内切断直流励磁回路，使两个铁心同时退饱和进入限流态，避免限流器反复饱和、去饱和产生的大量谐波，且切断直流励磁后，由于两个铁心内的交流感应磁场相互抵消，最大限度的减少了超导绕组的感应电压，可降低直流绕组对耐受感应冲击电压的要求。

2 饱和铁心型 SFCL 的发展现状

早在 70 年代已提出了关于 SFCL 的设想^[11]，NbTi 的发现更引起了人们对 SFCL 的研究兴趣。Raju^[12]等人于 1982 年利用低温 NbTi 超导带材研发出 3 kV/550 A 的饱和铁心型 SFCL。但 NbTi 制作成本高，运行条件苛刻，体积和重量太大都阻碍了它的发展。随着高温超导材料的出现，又为饱和铁心型 SFCL 的发展带来了曙光。近年来，饱和型 SFCL 已成为超导技术在电力系统中的研究热点。2003 年韩国完成了 6.6 kV/200 A 饱和型 SFCL 样机的制作和测试工作^[13]。2005 年以色列完成了 120 kVA 饱和型 SFCL 的实验室模型研制^[14]。同年，澳大利亚也研制成功 15 kV/1MVA 饱和型 SFCL 样机^[15-16]。2007 年，我国研制的 35 kV/90MVA 饱

和铁心型 SFCL 样机在云南电网公司 220 kV 普吉变电站成功挂网运行^[17-19]。2008 年, 德国完成了 13.8 kV/0.8 kA 和 138 kV/1.8 kA 饱和铁心型 SFCL 的研制工作^[20], 并于 2009 年在美国南加利福尼亚州投入运行。2012 年底我国研制的 220 kV/300 MVA 铁心型 SFCL 正式在天津石各庄变电站挂网运行, 是当时世界首台 220 kV 电压等级的 SFCL。2014 年又开始研制世界首台 500 kV 等级饱和铁心型高温超导限流器, 目前该样机正在进行出厂前的多种测试工作。

3 饱和铁心型 SFCL 应用技术的重点问题

接入饱和铁心型 SFCL 后, 在系统发生短路故障时, SFCL 在抑制短路电流的同时也会对电网的暂态稳定性、自动重合闸、继电保护等多方面其产生综合影响。因此, 在 SFCL 的应用过程中, 有必要就 SFCL 对系统暂态稳定的影响、与自动重合闸操作的配合以及继电保护的重新整定等重点问题进行研究, 使 SFCL 与电网其他设备协调运行。

3.1 对系统暂态稳定性的影响问题

在串有饱和铁心型 SFCL 的电力系统中, 当系统发生故障时, SFCL 进入限流态, 对系统呈现出较大的阻抗。这个阻抗的串入, 势必会对系统的网络参数产生影响。对于单机无穷大系统, 发电机到无穷大系统之间的转移阻抗将发生变化, 该转移阻抗将影响发电机的功率特性, 继而影响到单机无穷大系统的暂态稳定性。

文献[21]分析了饱和铁心型 SFCL 对电力系统暂态稳定性的影响规律, 得出如下结论: 对于单机无穷大系统而言, 当近机端发生单相故障时, 系统仍可保持基本稳定, 饱和铁心型 SFCL 的接入会使功角摆动增大, 不利于系统的暂态稳定性; 多相短路时, 不装设饱和铁心型 SFCL 的系统震荡失稳, 投入饱和铁心型 SFCL 后系统稳定性得到改善, 其中三相短路时, 投入限流阻抗值越大, 越有利与系统稳定, 两相短路和两相接地短路时与三相短路的状况相反。文献[22]表明, 三相短路时, 随着故障位置从机端向后移, SFCL 对暂态稳定的有利程度增加。

3.2 与电网重合闸的配合问题

从饱和铁心型 SFCL 的工作原理可见, 当系统发生短路故障时, SFCL 的铁心将退出饱和并呈现高阻态实现限流; 当系统故障清除后, SFCL 应恢复

低阻态, 降低 SFCL 装置的接入对系统的影响。电网中, 常见的首次自动重合闸时间为 1s 或更短^[23]。这就要求饱和铁心型 SFCL 需在很短的时间内实现从高阻到低阻的转变以配合系统重合闸。而饱和铁心型 SFCL 的阻抗恢复过程本质上是超导线圈重新励磁的过程。若励磁恢复不充分, 重合闸后限流器工作在磁化曲线的 II 段, 限流器呈现高阻抗, 产生较大的压降, 且会引入大量谐波, 严重影响电网的稳定运行。另外, 对于装置本身而言, 若重合闸时铁心尚未深度饱和, 直流绕组可能由于感抗较大而产生较高的过电压。因此, 重合闸之前应保证铁心已经达到一定的磁饱和程度。但短时间内完成超导磁体的充磁, 也可能由于直流绕组中的电流变化过快而产生较大的过电压, 损坏直流绕组, 相应也会增加直流励磁系统的设计难度。

饱和铁心型 SFCL 在电网重合闸时, 直流励磁不必完全恢复至额定工作值, 只要能够确保在一定交流退磁作用下, 铁心的最小磁化强度处于磁化曲线 I 段和 II 段的拐点处即可。这样即降低了对励磁电压、电流的要求, 提高了设备运行的安全性, 也可满足重合闸后限流器压降较低的要求^[24-25]。

3.3 距离保护的重新整定问题

距离保护是保护电力系统安全稳定运行的重要手段之一, 其主要元件是阻抗继电器。距离保护的主要原理是根据故障点至保护安装点之间的距离的远近来确定动作时间, 从而实现保护的选择性。对距离保护安装位置较近的短路点, 动作时间短; 对距离保护安装位置较远的短路点, 则动作时间较长。当系统发生故障时, 距离保护装置根据其端子两端的电压和电流测得短路点位保护安装点至的阻抗值 Z_m , 并与整定阻抗 Z_{set} 相比较, 以确定出故障所处的区段。如图 4 所示是保护范围。当测量阻抗

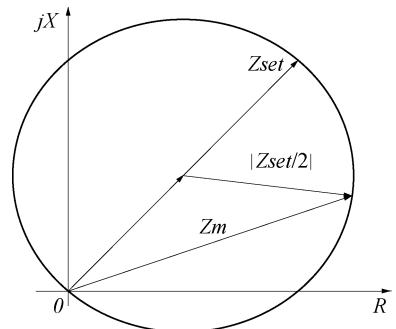


图 4 距离保护装置的保护范围图

Fig. 4 Protection range of distance protection

在圆内时,保护动作,否则不动作。

从图4可见,圆内或圆上区域位置到圆心的距离均不大于圆半径,因此距离保护的動作条件为:

$$|Z_m - Z_{set}/2| \leq |Z_{set}/2| \quad (1)$$

由于饱和铁心型 SFCL 串联在线路中,在故障过程中靠增加限流阻抗来实现限流。因此,接入饱和铁心型 SFCL 后,由于其电感和电阻的投入,线路原有阻抗特性发生变化,距离保护时测量阻抗将较未投入饱和铁心型 SFCL 时有所增加,这将导致距离保护的保護范围缩小,灵敏度降低。因此接入饱和铁心型 SFCL 后,需重新整定距离保护的整定阻抗,并校验灵敏度,且加以修正。然而,由于饱和铁心型 SFCL 的限流阻抗与短路电流的大小有关,且并不呈线性关系,这为距离保护的整定带来了新的挑战。

3.4 其他相关问题

3.4.1 直流绕组的过电压问题

饱和铁心型 SFCL 的直流绕组通过铁心与交流绕组耦合,直流绕组侧可能出现较高的感应电压,此高压可能对磁体及控制系统构成致命的威胁,需在磁体设计时尽量减小直流绕组过电压。超导线圈并联结构可减少磁体的匝数,降低感应电压,增强系统安全性。三相六铁心的布局结构也能尽量减小限流器稳态运行时直流绕组中的交流感应电压。

3.4.2 故障检测

对于改进型饱和铁心型 SFCL,在短路故障发生时,需尽快切断直流励磁回路,使铁心退出饱和呈现高阻抗从而限流。因此,故障检测的快速性和准确性至关重要。一般要求监控装置能排除由电网振荡、负载波动、谐波影响及外界干扰等因素造成的系统电流瞬时波动,准确判断系统短路故障的发生并发出动作指令,避免误动作。直流控制回路一般要求能在故障发生 10 ms 内切断直流励磁回路。

4 结语

国际上普遍认为高温超导限流器将是超导技术大规模应用的产品,将最早实现产业化。饱和铁心型 SFCL 在电压等级和限流容量等参数上符合未来电力系统限流需求,可有效限制系统的短路电流,提高电力系统的综合运行效率,同时会对电力系统的暂态稳定性、自动重合闸以及距离保护等方面带来负面影响。提高超导带材的技术、经济性能,降

低制冷成本,提升饱和铁心型 SFCL 的设计和制造水平,深入研究饱和铁心型 SFCL 与电力系统的相互作用机理,探讨饱和铁心型 SFCL 与电力系统的协调运行方法,解决关键应用技术问题,饱和铁心型 SFCL 将是电力系统限流的一种可靠选择。随着 220 kV、500 kV 饱和铁心型 SFCL 的研制成功,超导限流器在各类超导电力设备中将率先实现工业化应用。

参考文献:

- [1] 庞晓刚, 龚伟志, 洪辉, 等. 饱和铁心型超导限流器 [J]. 超导技术, 2012, 40(6): 34-39.
PANG Xiaogang, GONG Weizhi, HONG Hui, et al. Saturated iron-core Superconducting Fault Current Limiter [J]. Superconductivity, 2012, 40(6): 34-39.
- [2] 贾磊, 蔡汉生, 胡上茂, 等. 500 kV 串联电抗器对线路断路器开断能力的影响研究 [J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 7-11.
JIA Lei, CAI Hansheng, HU Shangmao, et al. Study on Influence of 500 kV Series Reactor on Interrupting Capability of Line Circuit Breaker [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 7-11.
- [3] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 15-18.
YE Lin, LIN Liang zhen. Superconducting Fault Current Limiter Applications in Electric Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 15-18.
- [4] 陈磊. 电压补偿型有源超导限流器的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
CHEN Lei. Research of Voltage Compensation Type Active Superconducting Fault Current Limiter [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [5] 徐博文. 大区电网互联的几个重要问题 [J]. 电网技术, 1999, 23(9): 32-34.
XU Bowen. Proposals Concerning Interconnection of Regional Power Systems [J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 32-34.
- [6] 傅霞飞, 张正陵, 陈坚, 等. 华中电网未来短路电流水平及控制 [J]. 电网技术, 1994, 18(5): 23-27.
FU Xiafei, ZHANG Zhengling, CHENG Jian, et al. The Future Level and Control of Short Circuit Current in Central China Electric Network [J]. Power System, 1994, 18(5): 23-27.
- [7] 高凯平. 限制短路电流的方法 [J]. 电力安全技术, 2000, 2(3): 54.
GAO Kaiping. Short Circuit Current Limiting Method [J]. Electric Power Security Technology, 2000, 2(3): 54.
- [8] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发

- 展 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141-144.
- HAN Ge, HAN Liu, WU Lin. Application and Development of Methods on Limiting Power Grid'S Short-circuit Current [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 141-144.
- [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 [J]. 低温与超导, 2013, 41(1): 13-18.
- JIN Tao, XU Ying, ZHOU Shiping, et al. Summarization of R&D on DC Biased Iron Core Type Superconductive Fault Current Limiter [J]. Cryogenic and Superconducting, 2013, 41(1): 13-18.
- [10] 孙燊伟, 龚伟志, 张敬因, 等. 饱和铁芯型超导限流器满足电网重合闸条件分析 [J]. 电网技术, 2012, 36(5): 156-160.
- SUN Yuwei, GONG Weizhi, ZHANG Jingyin, et al. Analysis on Conditions for Saturated Iron-Core Fault Current Limiter to Match With Reclosure of Circuit Breakers [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 156-160.
- [11] 刘卫. 超导限流器对重合闸影响的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- LIU Wei. A Study of Superconducting Fault Current Limiter's Influence on Reclosing [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [12] RAJU B P, PARTON K C, BARRAM T C. A Current Limiting Device Using Superconducting D. C. Bias, Applications and Prospects [J]. IEEE Trans. Apparatus Syst., 1982, PAS-101: 3173-3177.
- [13] LEE S, KANG H, BAE D K, et al. Development of 6.6kV / 200A DC Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2004, 14(2): 867-870.
- [14] BAR-HAIM Z, FRIEDMAN A, WOLFUS Y, et al. High-Temperature Superconducting Magnet for Use in Saturated Core FCL [C]. The 8th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2007).
- [15] HAWLEY C J, DARMANN F, BEALES T P. Performance of a 1 MVA High Temperature Superconductors-Enabled Saturable Magnetic Core-Type Fault Current Limiter [J]. Supercond. Sci. Technol., 2005, 18(25): 5-9.
- [16] MOSCROP J, DARMANN F. Design and Development of a 3-phase Saturated Core High Temperature Superconducting Fault Current Limiter [C]. International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, 2009: 1-6.
- [17] XIN Y, et al. Performance of the 35 kV/90 MVA SFCL in live-grid fault current limiting tests [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, 21(3): 1294-1297.
- [18] XIN 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 Trans. Appl. Supercond., 2009, 19(3): 1934-1937.
- [19] HONG Hui, CAO Zhengjian, ZHANG Jingyin, et al. DC Magnetization system for a 35KV/90MVA Superconducting Saturated Iron-Core Fault Current Limiter [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2009, 19(3): 1851-1854.
- [20] Moriconi F, et al. Development and deployment of saturated-core fault current limiters in distribution and transmission substations [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2011, 21(3): 1288-1293.
- [21] 彭俊臻, 张明, 宋萌, 等. 饱和铁芯型超导限流器对电力系统暂态稳定的影响 [J]. 低温物理学报, 2013, 35(4): 307-312.
- PENG Junzhen, ZHANG Ming, SONG Meng, et al. Influence of Transient Stability for Saturated Core Superconducting Fault Current Limiter on Power System [J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2013, 35(4): 307-312.
- [22] 顾雪平, 杨智龙. 超导故障限流器对电力系统暂态稳定性的影响分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(4): 22-28.
- GU Xueping, YANG Zhilong. Influence Analysis of Transient Stability for Superconducting Fault Current Limiter on Power System [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2007, 21(4): 22-28.
- [23] GB 1984—2014, 高压交流断路器 [S].
- GB 1984—2014, High-voltage Alternating-current Circuit-breaker [S].
- [24] 王斐宏, 彭俊臻, 宋萌, 等. 饱和铁芯型超导限流器对距离保护的影响 [J]. 低温与超导, 2013, 41(8): 50-55.
- WANG Feihong, PENG Junzhen, SONG Meng, et al. Research on the Influence of Saturated Core Superconducting Fault Current Limiter on Distance Protection [J]. Cryogenic and Superconducting, 2013, 41(8): 50-55.
- [25] 刘宾, 梅军, 郑建勇, 等. 超导故障限流器接入电网后单相接地短路距离保护整定的改进措施 [J]. 华东电力, 2012, 40(5): 0795-0797.
- LIU Bin, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Improved Distance Protection Setting Method for the Single-Phase Ground Fault with Grid-Connected SFCL [J]. East China Electric Power, 2012, 40(5): 0795-0797.

(责任编辑 张春文)