

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.009

500 kV 高温超导限流器电网接入工程方案研究

丁伟

(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: 高温超导限流器(SFCL)是一种限制电网短路电流的有效措施, 500 kV SFCL 设备研制已有较大发展, 对 500 kV SFCL 接入电网系统的工程方案进行了研究, 首先介绍了 SFCL 的工作原理, 结合 220 kV 和 35 kV SFCL 投入电网的运行情况分析 SFCL 的故障类型, 接着针对 500 kV SFCL 的设备特点和电网要求, 提出了一种主接线方案, 该方案具有可靠性高, 运行灵活, 施工方便等特点, 并给出了 2 个适用于不同工程环境情况下的平面布置方案。

关键词: 500 kV 饱和铁心型高温超导限流器(SFCL); 电网接入系统; 主接线; 平面布置

中图分类号: TM471

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0042-05

Research on Connecting to Power Grid Engineering Solution for 500 kV Superconducting Fault Current Limiter

DING Wei

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

Abstract: Superconducting fault current limiter (SFCL) is an effective measure to limit short circuit current in power grid. The equipment research and development of 500 kV SFCL has been greatly developed. This paper makes a study on connecting to power grid engineering solution for 500 kV SFCL. Firstly, working principle of SFCL is introduced, and fault type of SFCL is classified according to 220 kV and 35 kV SFCL situation in operation. Then based on the equipment characters and demand of power grid, a recommend single line scheme is represented which has advantages such as, more reliability, flexible operation, and easy construction etc. In the end, two layout solutions for different engineering environment conditions are represented.

Key words: 500 kV Superconducting fault current limiter (SFCL); connecting to power grid; single line scheme; layout

随着南方电网广东地区装机容量和各级电压网架建设的高速发展, 500 kV 网架结构大大增强, 电网结构的加强带来了广东珠三角地区 500 kV 电网短路容量的稳步增长, 变电站现有设备容量难以适应系统发展的需要^[1]。实际工程中已采用一些限流设备来降低短路电流, 如在 500 kV 线路中串联接入干式空心限流电抗器, 这种方法能有效抑制短路电流水平, 但由于限流阻抗值是固定的, 限流的同

时也降低了电网运行的经济性和可靠性。

饱和铁心型高温超导限流器 (Superconductive Fault Current Limiter, 以下简称 SFCL) 是一种限制电网短路电流的有效措施, 500 kV 的 SFCL 已进入样机研制和试验阶段^[2-3]。饱和铁心型 SFCL 在电压等级和限流容量等参数上符合电力系统的限流需求。500 kV 饱和铁心型 SFCL 主要有以下优点: (1) 能够在正常运行时呈低阻抗状态; (2) 能够在发生短路时呈高阻抗状态; (3) 能自动快速响应, 让限流器从低阻状态快速运行到高阻状态; (4) 能够快速从高阻状态恢复到低阻状态。该设备在限流的同时可更好兼顾电网运行的经济性^[4-6]。

500 kV SFCL 的设备制造技术及设备性能已快速发展, 而在世界上还没有相关 500 kV SFCL 接入

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 中国能建广东院科技项目: 500 kV 全户内变电站智能环境监控系统研究项目 (EX03641W)

作者简介: 丁伟(1987), 男, 江西吉安人, 工程师, 硕士, 主要从事变电设计及研究工作 (e-mail) dingwei@gedi.com.cn。

电网系统的实例。因此有必要根据 500 kV SFCL 的设备特点以及电网运行要求, 提出适用于接入我国 500 kV 电网系统的方案, 为后续的示范工程做好技术储备。本文着重研究讨论了适用于 SFCL 接入电网的接线方案和平面布置方案, 并给出了适用范围。

1 500 kV 高温超导限流器简介

1.1 原理概述

饱和铁心型 SFCL 的结构简图如图 1 所示。由铁心、常规交流绕组、直流超导绕组三个部分组成。其中铁心由两个口字形铁心组成; 单相交流绕组为两个常规导体绕制的线圈, 绕组两端接于电网中, 绕组分置于不同的铁心上, 线圈产生的磁场方向相同; 直流绕组为超导材料绕制而成, 为两个铁心提供直流励磁^[7]。

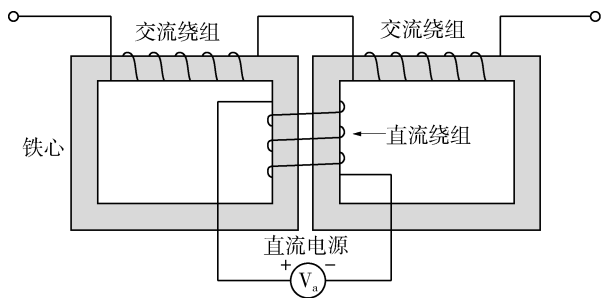


图 1 饱和铁心型超导限流器的结构示意图

Fig. 1 Structure simple diagram of saturated core SFCL

正常运行时, 直流电源为超导绕组提供励磁电流, 产生一个偏置磁场, 使铁心处于深度饱和状态。此时, 铁心上的交流绕组处于低感抗状态, SFCL 呈现较低的阻抗值, 对电网的输送电力无明显影响。短路故障发生时, 短路电流迫使两个铁心在一个周期内交替退出饱和, 磁导率迅速增大, 交流绕组处于高感抗状态, SFCL 呈现较大的阻抗值, 从而有效限制短路电流幅值。

1.2 SFCL 的故障情况

2007 年我国研制的 35 kV SFCL 样机已在云南电网普吉变电站并网运行; 2012 年我国研制的世界首台 220 kV SFCL 也已在天津石各庄变电站挂网运行。本文调研了 220 kV 和 35 kV SFCL 的运行情况, 并参与 500 kV SFCL 样机参数指定及研制等工作, 对 500 kV SFCL 可能出现的故障类型总结如下。

SFCL 故障跳闸信号来自超导限流器的三个子

系统: 电抗系统、直流励磁系统、低温系统^[8]。500 kV SFCL 自身带有监控保护系统, 其功能是负责控制超导限流器各部件的运行, 接受电网电流、电压信号, 接受电网继保指令, 向电网继保发送报警、跳闸信号。

电抗系统包括铁心、油箱、套管、散热器、风扇等传统电抗部件。电抗系统的故障跳闸信号和 500 kV 变压器是完全一样的。电抗系统跳闸故障与电抗系统的技术水平、加工工艺有关。电抗系统跳闸信号数量、跳闸故障发生几率、发生跳闸故障后对电网的动作要求都与 500 kV 变压器相同。与 500 kV SFCL 一样用油浸绝缘的 220 kV SFCL 至今还未出现过电抗系统故障。

直流励磁系统跳闸信号: 直流励磁系统的作用是为超导绕组提供直流电流, 采用的是成熟的晶闸管整流励磁方式。监控保护系统发出直流励磁跳闸信号意味着直流电流即将消失, 超导限流器阻抗在几十毫秒内从稳态阻抗增加到较大阻抗(具体大小和当时电网电流大小有关)。35 kV、220 kV 超导限流器至今未发生过直流励磁系统跳闸故障。

低温系统跳闸信号: 低温跳闸信号数量只有一个。低温系统的作用是保持超导绕组处于低温环境。当监控保护系统发现不足以维持低温环境, 并自动采取设定的措施无效后, 就会发出低温跳闸信号, 以保护超导绕组的安全。由于低温环境的改变是一个缓慢的过程, 从发生低温跳闸故障到低温环境发生改变需要一定的时间。因此, 低温系统跳闸信号发出后, 超导限流器会延后 1 min 再采取自我保护措施(即切断直流励磁), 超导限流器的阻抗在这 1 min 内保持不变, 1 min 后阻抗会升高。从 35 kV 超导限流器运行经验来看, 低温跳闸故障发生三次, 是三个系统中故障几率最高的。通过对 500 kV 样机试验情况, 低温系统也是较为薄弱环节。

2 接入系统主接线方案

2.1 研究思路

500 kV SFCL 的接入系统主接线方案的研究工作主要从以下几个方面着手:

1) 接线方案需综合考虑 500 kV SFCL 的设备特点, 可能发生的故障情况处理, 及电网单位运行的要求。

2) 对类似工程接入系统的接线方案进行研究分

析^[8]。相似工程的接线最突出的两个特点是：需设置带断路器的旁路回路，以便限流设备退出运行时不影响该线路的正常运行；500 kV 系统需考虑线路断路器暂态恢复电压升高的影响^[9-10]。

3) 对多个主接线方案进行可靠性分析对比。

2.2 推荐主接线

已投运的 220 kV SFCL 电气主接线见图 2。变电站 220 kV 采用双母线接线，SFCL 利用预留的主变间隔新建相关设备接入系统，而原线路间隔和新建超导限流器间隔并联，形成旁路。新建间隔中，超导限流器两端均设有隔离开关和断路器。

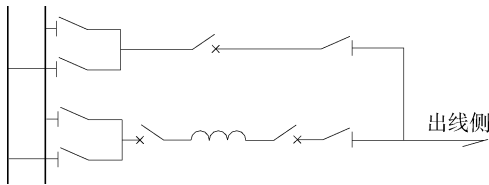


图 2 220 kV SFCL 接入系统电气接线图

Fig. 2 Single line diagram of 220 kV SFCL connecting to grid

500 kV 线路在变电站内的接线型式一般采用 3/2 断路器接线。本文的接线方案^[12]参考了 220 kV 接线的经验，不改变站内原有接线型式，只是在线路侧增加 SFCL 的相关回路。具体方案如图 3 所示。

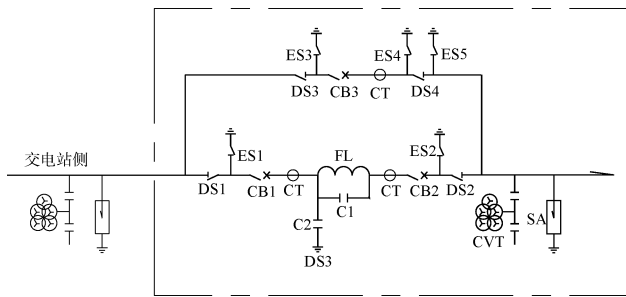


图 3 500 kV SFCL 接入系统电气接线图

Fig. 3 Single line diagram of 500 kV SFCL connecting to grid

上图中虚线框内为 500 kV 饱和铁心型高温超导限流器接入系统的所需设备元件和接线方案。该接线方案中各组成元件及相应功能如下：

1) FL——500 kV SFCL：线路正常时显低阻抗，线路发生短路故障时进入高阻抗状态限流。

2) CB1, CB2, CB3——断路器：CB1 和 CB2 在限流器故障或退出运行时将限流器从线路中断开，CB3 为旁路断路器，线路可通过 CB3 旁路运行。

3) DS1, DS2, DS3, DS4——隔离开关：限流

器和断路器设备检修用。

4) ES1, ES2, ES3, ES4, ES5——接地开关：设备检修或停运时接地用，以保证相关人员安全。

5) C1, C2 电容器：降低变电站侧的断路器开断短路电流时引起的瞬态恢复电压升高。

6) SA 避雷器：线路过电压防护。

7) CVT 电容式电压互感器：提供电压测量信号。

8) CT 电流互感器：提供电流测量信号。

该接线的特点在于断路器的配置。在超导限流器主回路中设置了断路器 CB1 和 CB2，并设置了带有断路器 CB3 的完整旁路。当线路通过 CB3 运行时，此时要将限流器投入运行，则操作步骤为：合隔离开关 DS1 和 DS2——合断路器 CB1 和 CB2——分断路器 CB3。当线路通过 FL 运行时，此时超导限流器因故障（接地故障和设备内部故障）或检修需要退出运行，则操作步骤为：合断路器 CB3（DS3 和 DS4 热备用）——分断路器 CB1 和 CB2——分 DS1 和 DS2。

从以上步骤可知，当需要切除或投入 500 kV SFCL 时，可通过 CB1, CB2, CB3 的配合动作快速实现，而变电站中 500 kV 串内断路器可不动作，从而实现所装限流器的 500 kV 线路不停电。

2.3 主要设备配置

断路器的配置主要考虑了运行状态切换的需求，作用 2.2 节中已说明，本小节主要说明电容器和接地开关的配置原则。

2.3.1 电容器

由于 SFCL 的存在，流过短路电流时串抗两端存在较大压差，当电流过零熄灭时，线路或杂散电容上的残压较高，由于电容值较小，电容与限流电抗振荡频率较高，造成 CB1 存在高幅值、高频率的振荡，这造成 CB1 跳闸瞬间其断口瞬态恢复电压会升高，另外一个因素是相间的耦合进一步增大了瞬态恢复电压，从而可能影响断路器正常开断。与之相对应的，对于没有 SFCL 的线路，当故障发生在近区时，通常起始部分存在高频成分，但通常 TRV 幅值并不高；当故障发生在线路远端时，TRV 幅值相对较高，但陡度并不高。

为降低线路断路器断口暂态恢复电压，可考虑采取在 SFCL 两端并联电容和增加对地电容的方法加以解决。使整个振荡回路的振荡频率降低，

从而降低了开关断口暂态恢复电压的陡度。图2中C1和C2就是为了降低变电站侧的断路器开断短路电流时引起的瞬态恢复电压而设置的。具体电容值应根据具体工程情况采用电磁暂态仿真软件计算。

2.3.2 接地开关

接地开关的配置原则是在超导限流器或断路器两端配置接地开关,以便于超导限流器和断路器的检修。如图3中的ES1和ES2设置在超导限流器和断路器支路的两端,ES3和ES4设置在旁路断路器的两端,在线路侧配置了ES5以方便线路检修。由于500 kV线路多为同塔双回,该接地开关选型时需具备一定的切合感应电流和电压的能力。另外接地开关的配置还需考虑实际系统条件和运行人员的需求。

2.4 主接线方案的优点

本接线方案,主要具有以下优点:

1)接入系统的电气接线方案可靠性高,对电网供电影响小。由于设计了旁路,500 kV线路可不通过SFCL运行。避免由于限流器检修,试验等原因造成线路停电。

2)运行状态切换迅速。由于主回路和旁路均有配置了断路器,限流器的各种运行状态的切换速度迅速。

3)接入系统方案的工程可实施性高,施工便利。由于本方案不需改变原有变电站的设备接线和布置,只是在原出线侧增加图2所示设备,此设计有利于针对不同工程情况而实施,SFCL可安装在一条线路的两侧变电站内,也可安装在线路中间。施工期间,不影响线路的正常运行。如果要拆除限流装置,也可快速恢复到原有线路的接线情况。

根据本文1.2节故障情况分析,500 kV SFCL的设备可靠性较常规限流电抗器要低很多,而500 kV线路可靠性对电网系统运行影响巨大。500 kV SFCL尚处于示范研制阶段,预计投入运行后投切较为频繁,该接线方案适用于此情况,以减少线路停运概率。

3 接入系统平面布置

500 kV电网线路短路电流较大的多为双回线路,双回线路加装SFCL的限流效果远远好于单回

线路加装,因此本文研究主要考虑双回回流加装SFCL的情况。本文共提出两种平面布置方案,以满足不同站址建设条件下需求,单回加装的方案可在双回方案基础上修改。

3.1 方案一

方案一如图4所示,2组超导限流器水平“一”字布置,与出线方向垂直,设一个超导限流器继电保护小室。该方案占地面积约 $112\text{ m} \times 122\text{ m} = 13\ 664\text{ m}^2$ 。该方案超导限流器主回路开关元件采用常规敞开式设备,设备之间通过软导线连接。旁路开关采用GIS布置在超导限流器的两侧,与超导限流器主回路通过GIL管道连接。在超导限流器前方设置一条5.5 m宽道路作为运输和检修通道,场地设置4 m的消防和检修道路与5.5 m道路连接形成环形道路。在超导限流器附近设置事故油池。

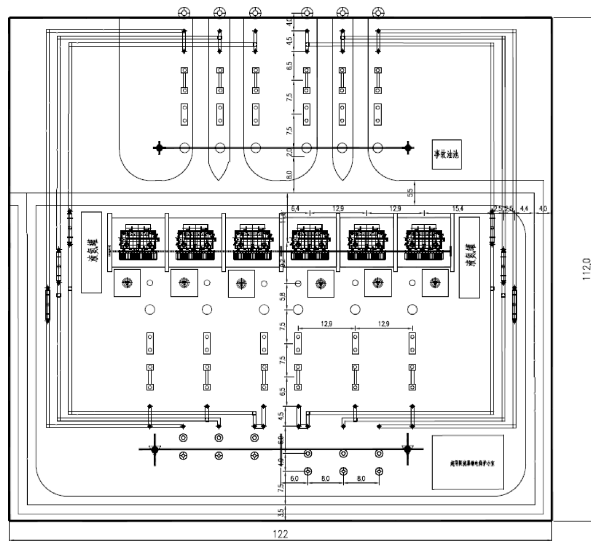


图4 500 kV SFCL 接入系统平面布置图一

Fig. 4 Layout plan diagram 1 of 500 kV SFCL connecting to grid

由于该方案部分开关设备采用常规敞开式设备,设备投资较优,适用于用地面积较充裕的情况,如在两变电站线路中间建设子站或规划中的待建变电站。

3.2 方案二

方案二如图5所示,2组超导限流器水平“一”字布置,与出线方向垂直,设一个超导限流器继电保护小室,占地面积约 $75\text{ m} \times 122\text{ m} = 9\ 150\text{ m}^2$ 。该方案超导限流器主回路及旁路均采用GIS设备,设备之间通过GIL管道连接。其它设

置基本同方案一。该方案占地面积优于方案一，但设备造价比方案一高。适用于在用地条件较紧张的情况下，如可用于已建变电站进行加装两回超导限流器的扩建。

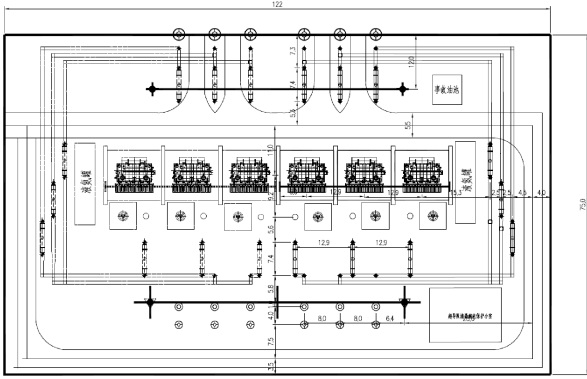


图5 500 kV SFCL 接入系统平面布置图二

Fig. 5 Layout plan diagram 2 of 500 kV SFCL connecting to grid

4 结论

500 kV SFCL 目前仍属于科研设备，从 220 kV 和 35 kV 的 SFCL 的运行状况来看，其设备可靠性较常规限流电抗器低。500 kV 线路的可靠运行对电网系统有非常重要的影响。基于此背景，本文提出了适用于 500 kV SFCL 示范工程的推荐接线方案和平面布置方案。

接线方案具备完善的旁路回路以及相应的保护功能，可确保在超导限流器发生故障或试验投切时，装设 SFCL 的线路不停电。接线方案还具有可靠性高，对电网影响小，可实施性高，便于施工的优点。本文提出的两种平面布置方案可分别适用于不同的工程环境条件，为相关示范工程的顺利实施提供了技术准备。

参考文献：

- [1] 陈丽萍, 余欣梅, 钟杰峰, 等. 500 kV 超导限流器在广东电网应用选点研究 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(8): 49-52.
- CHEN L P, YU X M, ZHONG J F, et al. Research one selection of installation site of the 500 kV superconducting current limiter in guangdong power grid [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(8): 49-52.
- [2] 冯晓东. 饱和铁芯型超导限流器应用技术研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 91-93.

FENG X D. Application technology research on saturated iron-core superconducting fault current limiter [J]. Energy Construction, 2015, 2(2): 91-93.

- [3] 庞晓刚, 龚伟志, 洪辉, 等. 饱和铁芯型超导限流器 [J]. 超导技术, 2012, 40(6): 34-36.
- PANG X G, GONG W Z, HONG H, et al. Saturated iron-core superconducting fault current limiter [J]. Superconductivity, 2012, 40(6): 34-36.
- [4] YE L, LIN L Z, JUENGST K P. Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems [J]. IEEE Transmission on Apply Superconductivity, 2002, 12(1): 900-903.
- [5] BELLEI T A, CAMM E H, RANSOM G. Current-limiting inductors used in capacitor bank applications and their Impact on fault current interruption [C]//SONT S. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. [S. l.]: [s. n.], 2001: 603-608.
- [6] 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.
- ZHENG J C. Current status and application prospect of fault current limiters [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5140-5148.
- [7] HONG H, CAO Z J, ZHANG J Y. DC Magnetizaionsystem for a 35 KV/90 MVA superconducting saturated iron-core fault current limiter [J]. IEEE Transmission on Apply Superconductivity, 2009, 19(3): 1851-1854.
- [8] 信赢. 超导限流器综述 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 1-9.
- XIN Y. Review on superconducting fault current limiters [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 1-9.
- [9] 庄侃沁, 陶荣明, 尹凡. 采用串联电抗器限制 500 kV 短路电流在华东电网的应用 [J]. 华东电力, 2009, 37(3): 440-443.
- ZHUANG K Q, TAO R M, YIN F. Using series reactors to limit 500 kV short circuit current for east china power grid [J]. East China Electric Power, 2009, 37(3): 440-443.
- [10] 中国电器工业协会. 高压交流断路器: GB 1984—2014[S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.
- [11] 何健. 主动式饱和铁芯型超导限流器对超高压输电线路零序电流保护的影响 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊1): 30-34.
- [12] 王春成, 丁伟, 郭芳, 等. 500 kV 高温超导限流器电气主接线方案 [J]. 中国电力, 2016, 49(2): 96-101.