

500 kV 高温超导限流器测点与保护配置研究

胡轲, 杜颖

(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装置, 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的测点与保护配置进行了研究, 介绍了 SFCL 的工作原理, 根据三种具有代表性的电气主接线方案, 分别提出了相应的测点与保护配置, 并讨论了保护间配合以及重合闸等相关问题。经分析对比, 得出对电网运行可靠性影响较小的方案, 论证了 SFCL 在测点与保护配置方面的可行性, 为相关工程的实施提供了技术准备。

关键词: 500 kV 饱和铁心型高温超导限流器(SFCL); 测点; 保护配置

中图分类号: TM471 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8676(2017)04-0066-05

Research on Measure Point and Protection Configuration for 500 kV Superconducting Fault Current Limiter

HU Ke, DU Ying

(China Energy Engineering Group Guang Dong 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 have been greatly developed. This paper made a study on measure point and protection configuration for 500 kV SFCL. Firstly, working principle of SFCL was introduced. Then based on the three major single line diagrams, the corresponding measure point and protection configurations were proposed. Finally, the cooperation between different protection schemes was discussed. Compared with the analysis, the scheme causing the lower affect to the reliability of power grid is found. The feasibility of the SFCL in the measure point and protection configuration is demonstrated, which has provided technical preparation for the implementation of the relevant projects.

Key words: 500 kV Superconducting fault current limiter (SFCL); measure point; protection

0 引言

随着南方电网广东地区 500 kV 网架结构大大增强, 珠三角地区 500 kV 电网短路容量稳步增长, 变电站现有设备容量难以适应系统发展的需要^[1]。降低短路电流可通过变电站母线分段运行或解开特定线路来实现, 但这些方法会相当程度影响电网可

靠性, 在对可靠性要求极高的 500 kV 电网中很难实施。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装置, 500 kV 的 SFCL 已进入样机研制和试验阶段^[2-3], 其主要有以下优点: 能够在正常运行时呈低阻抗状态; 能够在发生短路时呈高阻抗状态; 能自动快速响应, 让限流器从低阻状态快速转换到高阻状态; 能够快速从高阻状态恢

收稿日期: 2017-03-31

基金项目: 中国能建广东院科标项目: 500 kV 全户内变电站设计研究(EX03631W)

作者简介: 胡轲(1988), 男, 四川双流人, 工程师, 硕士, 主要从事变电设计及研究工作(e-mail)huke@gedi.com.cn。

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^[4-5]。

1 500 kV 高温超导限流器及其接入系统主接线简介

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^[6-7]。

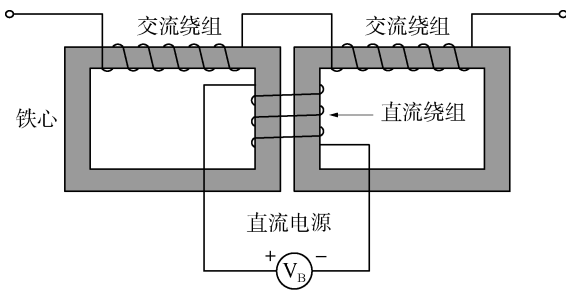


图 1 饱和铁心型超导限流器的结构示意图

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^[8]。

1.2 主接线方案简介

参考之前类似工程的接入系统方案, 结合超导限流器的设备特性, 综合考虑 500 kV SFCL 的设备特点及电网单位运行的要求, 初步形成以下三种具有一定代表性的电气主接线方案。

1) 主接线方案一, 如图 2 所示。

该接线参考了 500 kV 串抗工程的主流接线方案, 设置了旁路隔离开关, 主回路设置隔离开关, 同时在 SFCL 两端设置了并联电容器和对地电容器。

2) 主接线方案二, 如图 3 所示。

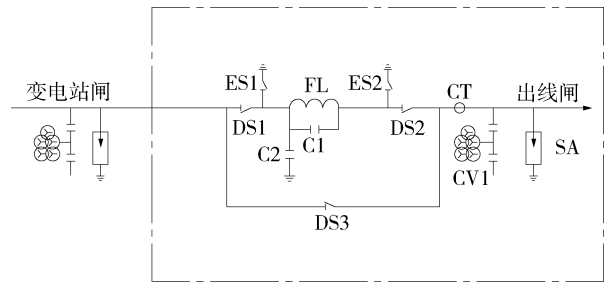


图 2 500 kV SFCL 电气主接线图 (方案一)

Fig. 2 Single line diagram of 500 kV SFCL (option 1)

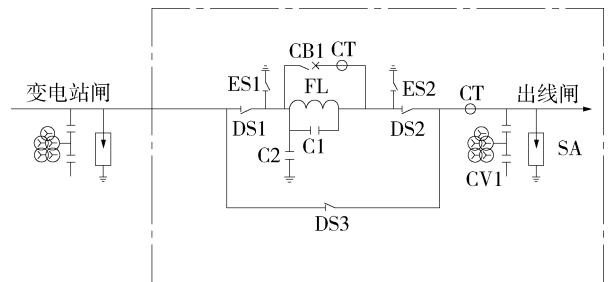


图 3 500 kV SFCL 电气主接线图 (方案二)

Fig. 3 Single line diagram of 500 kV SFCL (option 2)

方案二在方案一的基础上在 SFCL 两端增加了一台旁路断路器 CB1, 以提高运行的灵活性, 该方案可以在两侧变电站的串中断路器不动作的情况下进行 SFCL 的投切。

3) 主接线方案三, 如图 4 所示。

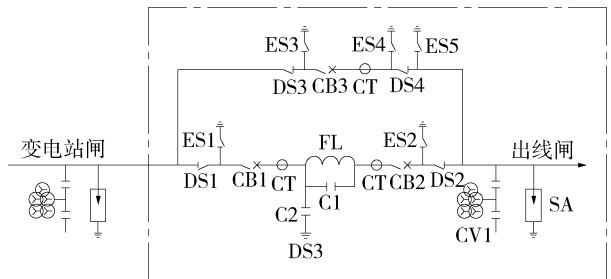


图 4 500 kV SFCL 电气主接线图 (方案三)

Fig. 4 Single line diagram of 500 kV SFCL (option 3)

该方案在 SFCL 主回路中设置了断路器 CB1 和 CB2, 设置了旁路断路器 CB3, 并在 CB3 两端设置了隔离开关和接地开关供断路器和线路检修时使用。CB3 并在整个 SFCL 回路两端, 当 SFCL 发生接地故障时, 可通过 CB1, CB2, CB3 的配合动作快速切除故障, 变电站串内断路器可不动作, 实现线路不停电。该方案中 DS3 和 DS4 可选择处在热备用的状态下, 当 SFCL 需要退出时, 旁路能够立刻投入。

2 测点及保护配置

针对第2节提出的三种主接线方案,提出测点配置和保护配置的方案,并对保护的动作为及配合进行初步探讨。

2.1 保护分区比较

对于 SFCL 与线路的保护分区,有 SFCL 与线路保护区独立与合并两个方案,以主接线方案一为例,展开讨论:

1) SFCL 和线路保护区合并,如图5所示:

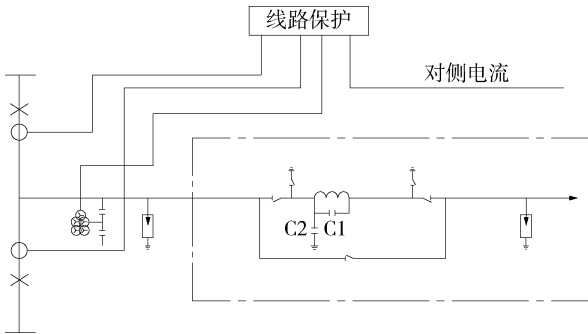


图5 SFCL 与线路保护区合并

Fig. 5 SFCL and line protection areas combined together

该方案的测点配置无需改动,采用目前站内的配置,不单独配置 SFCL 的差动保护,将其含在线路保护区内,如图 3.1 所示。该方案的优点是实现简单,缺点是, SFCL 失超时,对线路的距离保护会有影响,并且对线路保护的整定造成影响,有可能导致部分保护定值(主要是距离保护 II 段)与下级保护的配合存在困难。并且线路保护难以识别是 SFCL 的故障还是线路的故障,从而无法正确闭锁重合闸。

2) SFCL 和线路保护区独立,如图6所示:

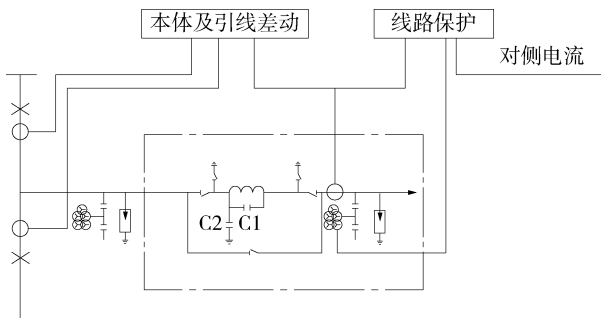


图6 SFCL 和线路保护区独立

Fig. 6 SFCL and line protection areas keep independent

该方案要求将 CVT 设置在出线侧,并且设置 2 组出线 CT, 本体及引线差动保护区和线路保护区

保护范围交叉,保护无死区。当本体及引线差动保护动作时,跳串内断路器,并通过线路保护跳对侧,同时闭锁断路器保护重合闸。

该方案的优点是,线路距离保护不受 SFCL 的影响。因此,建议采用 SFCL 保护与线路保护独立设置。

2.2 主接线方案一的保护配置方法

对于方案一,测点和保护配置如图6所示。

当线路保护动作时,启动重合闸,带着 SFCL 一起重合闸,如重合闸成功,线路恢复运行,如重合闸失败,线路停运。

该方案的优点是,线路距离保护不受 SFCL 的影响,并且线路保护重合闸无需判别 SFCL 本体故障还是线路故障。

2.3 主接线方案二的保护配置方法

主接线方案二的保护配置如图7所示,该配置划分本体及引线、线路两个保护区,设置本体及引线差动保护,与线路保护范围重叠。另外设置断路器保护,保护旁路断路器。

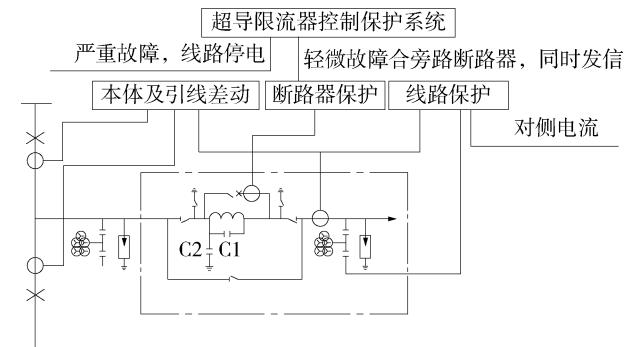


图7 方案二的保护配置图

Fig. 7 Protection configuration diagram of option 2

当本体及引线差动保护探测到故障时,跳串内断路器,并通过线路保护跳对侧,闭锁重合闸,线路停电。当线路保护探测到故障时,跳串内断路器,带着 SFCL 一起重合闸。

距离保护区不包括 SFCL。

2.4 主接线方案三的保护配置方法

对于方案三,测点及保护配置有两种方式,第1种如图8所示。

该方式也划分本体及引线、线路两个保护区。配置引线及本体差动保护、线路保护、断路器保护。引线及本体差动与线路保护范围交叉,线路保护不受 SFCL 的影响。但本体保护区与引线保护区

没有独立, 是合并在一起的。

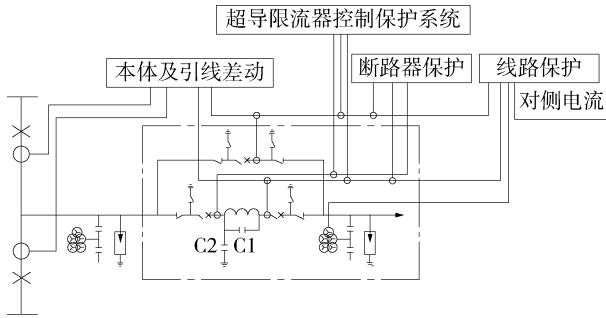


图8 方案三的第1种保护配置方式

Fig. 8 First protection configuration diagram of option 3

在该方式中, 当 SFCL 本体发生非接地故障时, 可由 SFCL 自身的控制保护系统发出信号, 合旁路断路器, 同时发指令跳 SFCL 两侧断路器, 实现不停电切除故障。当发生本体接地故障或引线接地故障时, 本体及引线差动保护无法判别是本体故障还是引线故障, 均导致跳串内断路器, 并通过线路保护跳对侧, 闭锁重合闸, 线路停电。无法采用旁路保证线路不停电, 这实际上扩大了故障范围。可采取的措施是, 接入 SFCL 左侧的 CT 电流, 形成引线差动保护和本体差动保护两个独立的保护区, 但是现有的引线保护版本不具备接入 5 组 CT 的能力。可采用两台独立的装置实现。即第二种保护配置方式, 如图 9 所示。

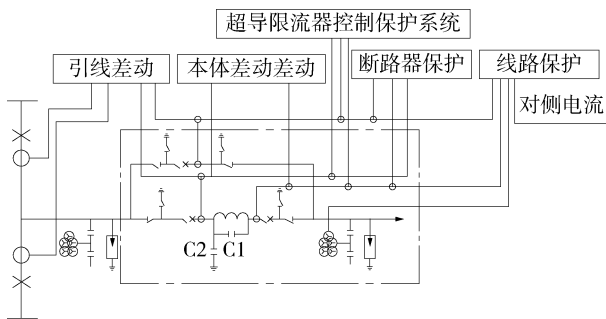


图9 方案三的第2种保护配置方式

Fig. 9 Second protection configuration diagram of option 3

该方式将本体及引线差动保护拆分开来, 其他部分与上一种方式无异。当引线差动保护动作时, 跳本站串内断路器与对站串内断路器, 不跳旁路与限流电抗器支路的断路器。当 SFCL 本体差动保护动作时, 跳 SFCL 两侧断路器, 同时合旁路断路器, 实现不停电切除故障。由于断路器的跳闸时间一般比合闸时间短(常见的 HGIS 的开断时间为不

大于 40 ms, 合闸时间为不大于 100 ms), 则存在的问题是, 当发生故障时, 同时发出跳两侧断路器与合旁路断路器命令, 由于合闸速度慢, 旁路断路器合闸时线路已断开, 则将会出现三相重合闸。而目前 500 kV 的重合闸方式是单相重合闸, 如果采用三相重合闸, 需评估其对系统带来的影响, 可根据试点工程的系统条件开展后续相应的仿真计算。

2.4.1 线路保护测点及重合闸配置

线路保护取 SFCL 右侧 CT 和旁路 CT 的和电流, 电压取 SFCL 右侧 CVT, 当线路保护探测到故障时, 跳闸存在两种方式: (1) 跳 SFCL 右侧断路器及旁路断路器。对重合闸而言, 若跳闸前 SFCL 支路正在运行, 则重合 SFCL 右侧断路器; 若跳闸前旁路正在运行, 则重合旁路断路器。(2) 跳串内断路器, 重合闸则与普通 500 kV 线路无异, 无需改变线路的重合闸配置。该跳闸方式的另一优点是失灵保护不需要考虑旁路断路器, 只考虑串内断路器和 SFCL 两侧断路器即可。因此, 推荐采用第 2 种线路保护跳闸方式。

2.4.2 失灵保护配置

主接线方案三共增加了 3 台断路器。

1) 若 SFCL 本体发生非接地故障, 如果先合旁路, 再跳两侧断路器。则若旁路合上后, SFCL 两侧断路器发生跳闸失灵, 此时因旁路已经合上, 有可能不满足失灵电流启动判据, 可能无法启动失灵保护。如果是同时发合旁路与跳两侧断路器指令, 在失灵保护延时的时间内, 旁路已合上, 同样存在无法启动失灵保护的情况。因此, 须根据试点工程电气设备的具体选型情况, 评估辅助节点回路的可靠性, 综合决定是否取消失灵电流判据。

2) 如果是 SFCL 保护区内发生的接地故障, 则无论旁路断路器是否合上, SFCL 两侧的断路器失灵保护均能启动。由断路器失灵保护出口跳所有与之相连的断路器。

3) 旁路断路器, 主要用作运行方式切换, 不做故障隔离。因此为简化失灵保护配置, 建议不配置旁路断路器的失灵保护。在发生引线区内故障时, 引线差动保护动作跳本站串内断路器与对站串内断路器, 不跳旁路断路器与 SFCL 支路断路器。当旁路断路器合闸时发生失灵, 则由三相不一致保护动作跳闸。旁路断路器跳闸, 只出现在运行人员操作跳闸的情况。因此不需要考虑失灵保护。

对于主接线方案三, 不论采用哪种保护配置方式, 优点都是 SFCL 本体发生故障时, 均可以实现线路不停电, 且各保护区域之间相对独立, 对系统的影响较小。缺点是断路器数量较多, 投资较高, 保护之间的配合相对复杂。

2.5 保护之间的配合

1) SFCL 控制保护系统与其他继电保护的配合
SFCL 的故障可划分为两类, 一类为严重故障(如短路故障、需马上停运的设备内部严重故障), 需马上切除故障点; 另一类为设备轻微内部故障, 还可继续运行一段时间。对于严重故障, 主接线方案一和二需要马上跳开交流串中的断路器和对侧的断路器, 线路会停电。方案三则可通过投旁路, 跳 SFCL 两侧的断路器实现不停电(或短时停电)情况下的故障切除。SFCL 的接地故障可由本体及引线差动保护判别, 另外 SFCL 的本体控制保护系统应能够区分设备严重内部故障和轻微故障, 从而正确的与差动保护、线路保护、断路器保护接口配合。线路保护重合闸与 SFCL 控制保护系统在时序上应有配合关系, 应确保 SFCL 恢复高阻状态后, 重合闸才动作。

2) 本体及引线差动保护与线路保护的配合。

对于主接线方案一和二以及方案三的第一种保护配置方式, 本体及引线差动保护动作后, 跳本站串内断路器, 同时通过线路保护远跳对侧站断路器, 并且闭锁断路器重合闸。

对于方案三的第二种保护配置方式, 本体差动保护保护动作后, 合旁路断路器, 跳 SFCL 两侧断路器, 可完成故障隔离, 无需与线路保护配合。若引线差动保护动作, 则仍需跳串内断路器。

3 结论

综上所述, 从主接线方案一到方案三, 测点与保护配置的复杂度逐步上升。但对于主接线方案一和二以及方案三的第一种保护配置方式, 本质上都无法在 SFCL 发生严重故障时保证线路不停电。方案三的第二种保护配置方式理论上可解决这个问题, 但仍存在操作细节问题需进一步论证。

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, 其设备可靠性仍相对较低。而 500 kV 线路的可靠运行对电网系统有非常重要的影响。本文基于适用于 500 kV SFCL 变电工程的接线方案提出了相应的保护和测点

配置方案。并通过对比和讨论, 得出了可满足较高的运行可靠性要求及对电网影响较小的方案, 为相关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 on 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. 饱和铁心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]. Southern Energy Construction, 2015, 2(2): 91-93.
- [3] 庞晓刚, 龚伟志, 洪辉. 饱和铁心型超导限流器 [J]. 超导技术, 2012, 40(6): 34-36.
- [4] BELLEI T A, CAMM E H, RANSOM G. Current-limiting inductors used in capacitor bank applications and their impact on fault current interruption [C]//IEEE. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2001. U. S. A.; IEEE, 2001: 603-608.
- [5] 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.
- [6] HONG H, CAO Z J, ZHANG J Y. 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.
- [7] 信赢. 超导限流器综述 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 1-9.
- [8] 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.
WANG C C, DING W, GUO F, et al. Research of main connection of 500 kV high temperature superconducting fault current limiter [J]. Electric Power, 2016, 49(2): 96-101.
- [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): 441-444.
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): 441-444.
- [10] ATTLA G, SANDOR S, LASZLO F, et al. Improvement of functionality and reliability by inductive hts fault current limiter units [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 6(2): 2248-2256.