

备自投装置在上海超导电缆中的应用

陈妍君，邓孟华，周佳卿，段若晨，陆超，姚蓉

(国网上海市电力公司市南供电公司，上海 200233)

摘要：35 kV 高温超导电缆示范工程已在上海启动。超导电缆需在 77 K 低温液氮环境中维持其超导特性，为了保护超导电缆不因温度、电流等升高而烧毁，同时提高电网的运行可靠性，超导电缆系统设计了进线备自投装置，一旦超导电缆退出运行，可以迅速切换至常规电缆为系统供电，并通过动作逻辑和时间级差的设置，实现与电网现有分段备自投装置及母差保护的配合。进线备自投装置确保了在技术创新的同时，维持电网正常运行方式及提高电网可靠性，是超导电缆示范工程的关键技术之一，为未来超导电缆的商业化运行奠定了坚实的基础。

关键词：超导电缆；进线备自投；保护配合；闭锁条件

Application of automatic switchover device in superconducting cable project in Shanghai

CHEN Yanjun, DENG Menghua, ZHOU Jiaqing, DUAN Ruochen, LU Chao, YAO Rong

(Shinan Power Supply Company, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: The demonstration project of 35 kV high-temperature superconducting cable has been put into operation in Shanghai. Superconducting cables need to maintain their superconducting properties in the 77 K liquid nitrogen. An automatic switchover device is designed in the superconducting cable system to protect superconducting cables from burning due to the increase of temperature or current and improve the operation reliability of power grid. Once the superconducting cable is out of operation, it can be quickly switched to the conventional cables to supply power. Through setting the action logic and time, the automatic switchover device can cooperate with the existing protection of the power grid. The automatic switchover device is a technological innovation which maintains the normal operation of the power grid and improves the reliability of the system. It is one of the key technologies in the superconducting cable demonstration project. The design and application of the automatic switchover device lay a solid foundation for the commercial operation of superconducting cables in the future.

Key words: superconducting cable; automatic switchover; protection cooperation; block condition

0 引言

上海作为国际超大型城市，具有人口众多、供电负荷大等特点，随着城市的高速发展，其电网规模不断扩大，输电走廊愈发紧张。同时，为了增强人民群众用电获得感，持续改善电力运营

商环境，上海将99.999%的供电可靠性作为目标。为解决供电可靠性与负荷密集化之间的矛盾，需要采用具备更高电力输送能力的输电方式，缓解目前电网在城市化过程中遇到的廊道紧张问题。

超导材料由于其零电阻特性，具有超高密

国家电网公司科技项目国产公里级高温超导电缆系统关键技术及示范应用研究（520940180014）

度工程载流能力,已具备代替诸如铜、铝等常规电工材料的潜力。基于超导材料的高温超导电缆输电技术具有大容量、低损耗、环保节能和节省走廊^[1]等特点,应用前景广阔。目前,国际上超导输电技术受到越来越多的关注,美国、德国、日本和韩国等多个国家都在积极开展高温超导电缆的产品研发和示范运行研究^[2]。中国自20世纪90年代就开始着手超导电缆的应用研究,并在甘肃、云南等地开展了试点应用。上海在超导电缆的研发与应用一直走在前端,结合超导技术积累及上海电网发展,上海公司开展了高温超导电缆示范工程,在中心城区建设一条1.2 km的35 kV高温超导电缆,其输送能力相当于4~6回35 kV传统电缆。该示范工程是应用高温超导电缆进行小空间、大容量输电的一次大胆尝试,以解决城市中心电网局部负荷热点的供电难题,建成后将成为世界上首条为城市负荷中心供电,全商业运行的超导电缆工程。

为加强电网运行可靠性,上海地区电网普遍采用母线分段备自投实现负荷转移,确保故障或检修情况下系统持续供电。该示范工程结合超导电缆工程特点,首次在上海地区电网范围内设计了进线备用电源自动投入装置(进线备自投),

一旦超导电缆发生故障退出运行,35 kV进线备自投装置启动,迅速切换至原常规电缆为负荷供电。本文首先介绍了进线备自投装置的工作原理和动作逻辑,在此基础上,通过设置时间级差研究进线备自投与现有分段备自投之间的配合,并通过案例分析证明进线备自投动作的正确性。最后介绍了进线备自投的闭锁条件,一旦相关母线发生故障,进线备自投应可靠不动作。

1 进线备自投原理

220 kV变电站A和B位于上海市中心城区,紧邻商圈,人员密集,供电范围内存在多家重要用户及众多居民区。220 kV B站35 kV侧有六段母线,但仅有两台220 kV主变压器,其中五段、六段母线直接由A站35 kV出线3501与3502供电,由于单回电缆无法满足高负荷供电要求,因此线路3501与3502均采用双拼电缆方式,如图1所示。为解决该区域重载问题,满足检修方式下 $N-1$ 的供电可靠性,220 kV A站至220 kV B站新建35 kV高温超导电缆3503,代替原有四回常规电缆3501与3502对B站35 kV五段、六段母线供电,其载流能力大大提高,可高达2 200 A。

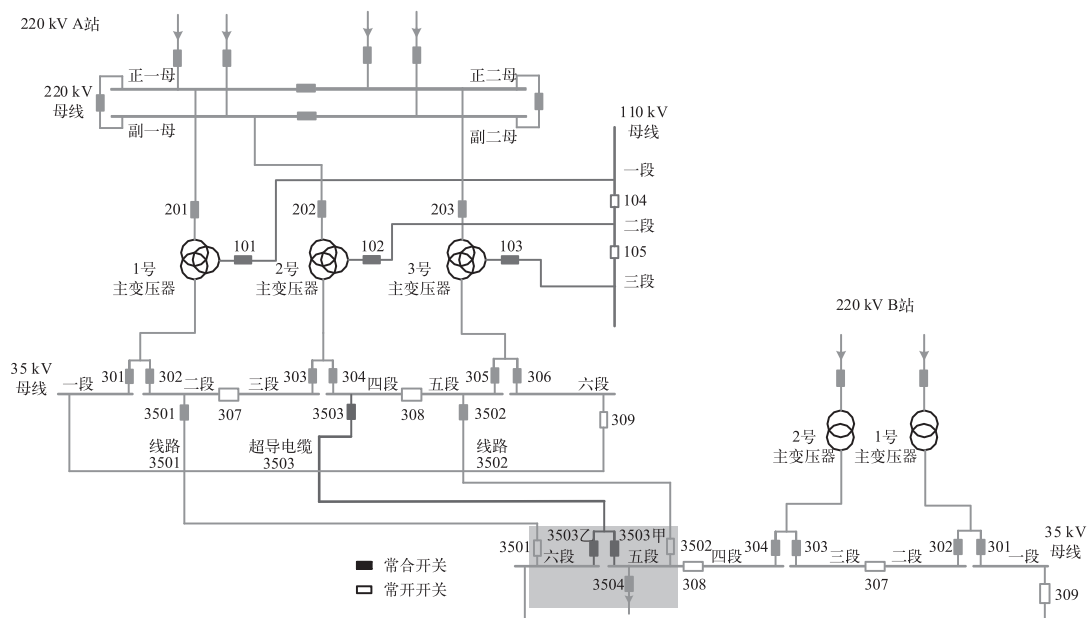


图1 超导电缆应用场景电系图

Fig. 1 Electrical diagram of superconducting cable application scenario

电网正常运行时，A站3503开关、B站3503甲和3503乙开关均为运行位置，超导电缆3503为B站35 kV五段、六段母线供电。A站3501、3502为开关运行状态，B站3501、3502为开关热备用状态，常规电缆3501与3502作为超导电缆备用处于热备用状态。一旦发生故障，超导电缆退出运行，须迅速切换至原有四回常规电缆为系统持续供电。这就需要引入进线备自投装置，当满足启动条件时，进线备自投动作，跳开故障线路，并经短延时后合上备用电源，保障系统正常运行。

1.1 进线备自投启动条件

超导电缆示范工程的进线备自投有两种启动方式：①超导电缆供电母线失电压启动；②超导电缆失超保护启动。

方式①为电气量启动方式，进线备自投判断B站母线无电压、主供线路无电流时，经一定时间延时，跳开主供电源开关，合上备用电源开关。该方式主要用于超导电缆本体发生电气故障或上级故障导致超导电缆无电的情况。方式②为非电气量启动方式，进线备自投装置接收到超导电缆本体监控系统发出的请求跳闸信号后启动备自投，跳开主供电源开关，合上备用电源开关。该方式用于超导电缆发生失超现象不能维持正常运行的情况。两种启动方式下，进线备自投装置均须先跳开原电源开关，再合上备用电源开关。进线备自投系统示意图如图2所示。

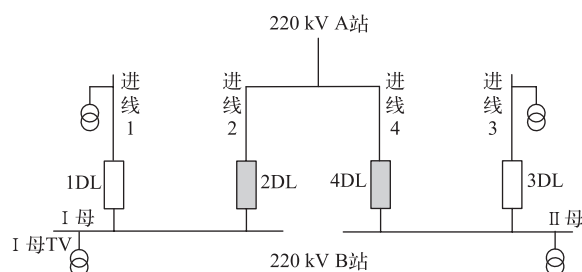


图2 进线备自投系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of incoming line standby automatic switching system

由于超导电缆在B站内分为两路开关接入两段母线，进线备自投装置需同时控制1DL~4DL

共4个进线开关。其中开关1DL、2DL对应进线备自投1；开关3DL、4DL对应进线备自投2，进线备自投1和2两种方式逻辑一致。其动作逻辑见下表。

表 进线备自投动作逻辑

Tab. Incoming line standby automatic switching action logic

序号	进线备自投	运行方式	动作逻辑
1	进线备自投1	线路1备用、线路2运行	方式1：I母无压、线路2无流时，跳2DL、合1DL
2		线路1备用、线路2运行	方式2：超导电缆本体告警开入时，跳2DL、合1DL
3	进线备自投2	线路3备用、线路4运行	方式1：II母无压、线路4无流时，跳4DL、合3DL
4		线路3备用、线路4运行	方式2：超导电缆本体告警开入时，跳4DL、合3DL

1.2 进线备自投逻辑方式

进线备自投1和2逻辑一致，只是用于不同母线，因此功能实现及装置设计相同。以进线备自投1为例，介绍超导电缆示范工程中进线备自投装置的功能实现原理。

(1) 充电条件

1) 进线备自投1硬压板、软压板和控制字处于投入位置。

2) 进线1断路器1DL处于分位，进线2断路器2DL处于合位且为合后位（合后位置接入控制字投入）。

3) I母满足有压条件。

4) I母压变处于合位。

5) 无进线1断路器1DL跳合位不对应。

6) 无进线2断路器2DL跳合位不对应。

7) 无进线1断路器1DL位置异常（跳位有流）。

8) 进线1检修压板退出。

9) 无闭锁进线备自投1条件。

(2) 放电条件

1) 进线备自投1硬压板、软压板和控制字任一退出。

2) 进线1断路器1DL处于合位。

3) 手跳进线2断路器2DL。

4) I母压变处于分位。

- 5) 进线1断路器1DL跳合位不对应。
- 6) 进线2断路器2DL跳合位不对应。
- 7) 进线1断路器1DL位置异常(跳位有流)。
- 8) 进线1检修压板投入。
- 9) 有闭锁进线备自投1条件。

(3) 动作逻辑

方式1: 充电完成后, I母无电压且I母压变处于合位、进线2无电流均满足时, 进线备自投1启动。经跳闸短延时TU3发跳进线断路器2DL命令。确认断路器2DL跳开后, 经合闸延时TU4发合断路器1DL命令。

方式2: 充电完成后, 超导电缆本体告警开入时, 进线备自投1启动。经跳闸短延时TU3发跳进线断路器2DL命令。确认断路器2DL跳开后, 经合闸延时TU4发合断路器1DL命令。

2 35 kV备自投的相互配合

上海电网中220 kV变电站35 kV侧大多采用单母分段接线方式, 为了提高供电系统的可靠性和稳定性, 220 kV变电站中低压侧、110 kV及以下电压等级变电站广泛采用母线分段备自投装置, 即发生故障导致母线失电时, 通过分段备自投装置的判断及动作, 自动跳开原主供电电源开关, 并经短延时后合上分段开关^[3]。为确保不同电压等级分段备自投有序动作, 避免方式恢复的反复操作, 分段备自投按照电压等级设置时间级差。超导电缆系统引入进线备自投装置后, 要充分考虑进线备自投与各电压等级分段备自投之间的配合问题^[4]。

220 kV A站和B站所在地区为上海市中心城区, 负荷密度高, 重要用户多, 可靠性要求高, 为了故障时减轻220 kV变电站主变压器压力, 缩短瞬时失电时间, 220 kV变电站内35 kV分段备自投动作时间为4 s, 下级35 kV变电站的10 kV分段备自投动作时间为2.5~3.5 s。当超导电缆发生故障退出运行时, 应优先切换为原常规电缆为母线供电, 因此35 kV进线备自投动作时间要短于35 kV分段备自投动作时间, 设置为3 s, 通

过时间整定形成级差。通过以下具体案例介绍进线备自投与分段备自投配合情况。

2.1 超导电缆本体故障

当超导电缆本体发生故障时, 主保护动作, 跳开超导电缆两侧开关, 将故障隔离。此时220 kV B站进线备自投装置检测到35 kV五段、六段母线无电压, 超导电缆无电流, 则启动进线备自投装置, 经3 s延时跳开B站3503甲和3503乙开关, 合上B站3501、3502开关, 由超导电缆切换至原常规电缆为B站母线供电。

2.2 220 kV A站2号主变压器故障

220 kV A站2号主变压器发生故障, 主变压器保护动作, 跳开主变压器相关开关, 故障隔离。此时220 kV A站35 kV三段、四段母线失电, 导致超导电缆失电, 220 kV B站35 kV五段、六段母线失电, 进线备自投与分段备自投均满足条件, 同时启动。由于进线备自投动作时间短于同电压等级分段备自投动作时间, 因此B站35 kV进线备自投先动作, 经3 s延时跳开B站3503甲和3503乙开关, 合上B站3501、3502开关, 恢复对B站母线供电。B站分段备自投装置启动后检测到母线恢复供电, 则保护返回, 不会动作。随后, A站35 kV分段备自投动作, 经4 s延时跳开A站303、304开关, 合上A站307、308开关, 同时110 kV侧分段备自投动作, 跳开A站102开关, 合上A站104开关。下级35 kV变电站10 kV分段备自投时间较短, 则分段备自投动作, 部分负荷转移。

2.3 220 kV B站2号主变压器故障

220 kV B站2号主变压器发生故障, 主变压器保护动作, 跳开主变压器相关开关, 故障隔离。超导电缆正常运行, 35 kV进线备自投装置不会启动。由于B站35 kV三段、四段母线失电, 分段备自投启动, 经延时后跳开B站303、304开关, 合上B站307、308开关, 此时, 35 kV四段母线负荷转移至超导电缆供电, 由于超导电缆载流量较大, 经负荷预测, 不会出现过载现象。下级35 kV变电站10 kV分段备自投动作,

部分负荷转移。

2.4 220 kV B站35 kV出线故障3504开关拒动作

220 kV B站35 kV出线故障，保护动作而开关3504开关拒动作，会引起故障越级，由超导电缆3503的后备保护动作，跳开A站3503开关，切除故障，此时B站35 kV五段、六段母线失电，35 kV进线备自投与分段备自投同时启动。按照备自投动作的时间顺序，B站35 kV进线备自投先动作，经3 s跳开B站3503甲和3503乙开关，合上B站3501、3502开关，由于A站3502线路合于故障，则3502线路后备保护动作跳开A站3502开关，此时，B站35 kV六段母线恢复供电，而五段母线再次失电。

随后，B站35 kV分段备自投动作，跳开B站3502开关，合上B站308开关，由于合于故障，备自投后加速动作，再次跳开B站308开关，35 kV五段母线失电。下级35 kV变电站内10 kV分段备自投动作，部分负荷转移。

3 进线备自投与母差保护的配合

为防止备自投误动作或动作于故障，一般应设置闭锁条件^[5]。超导电缆系统的35 kV进线备自投具有手动跳闸闭锁和母差保护闭锁功能。

手动跳闸闭锁进线备自投，是人为有目的地使设备失电压时闭锁备自投，即手动拉开A站3503或B站3503甲、3503乙开关，进线备自投装置可靠不动作。

母差保护闭锁进线备自投，是指母差保护动作时进线备自投也可靠不动作。这是因为母差保护动作表示35 kV母线发生故障，此时若进线备自投装置动作，切换至常规电缆供电，则常规电缆合于故障，不仅会使常规电缆和母线再次流过故障电流，导致正常设备可能因过电流的冲击而损坏，还会增加常规电缆线路上断路器切断故障电流的次数，影响其使用寿命。因此母差保护动作须闭锁进线备自投。通过以下案例分析母差保护闭锁备自投情况。

220 kV B站35 kV五段母线发生故障，35 kV

四、五段母差保护动作，跳开B站3503甲开关，为了保护母线及正常设备不被故障电流再次冲击，系统闭锁B站35 kV四、五分段备自投及35 kV进线备自投，故障隔离，35 kV五段母线失电。此时，通过下级35 kV变电站内10 kV分段备自投动作，恢复失电负荷供电，保证了系统的供电可靠性和稳定性。

4 结束语

备自投装置是保障电网安全、稳定运行的重要装置，本文主要介绍了超导电缆系统中引入的进线备自投装置，该装置可以通过接收电网的电气信号或超导电缆的本体综合信号，实现从超导电缆快速切换至常规电缆供电的功能。在动作逻辑的基础上，通过案例分析介绍了该进线备自投装置与分段备自投装置、母差保护的配合方案，验证了进线备自投装置动作的正确性。进线备自投装置解决了超导电缆退出运行后快速恢复供电的问题，可以有效保护超导电缆不受损坏，对超导电缆系统的稳定运行起到了重要作用。

参考文献

- [1] 林良真，肖立业. 高温超导输电电缆的现状与发展[J]. 电力设备, 2007, 8(1): 1-4.
- [2] 宗曦华，魏东. 高温超导电缆研究与应用新进展[J]. 电线电缆, 2013(5): 49-53.
- [3] 戴鑫. 110 kV进线备自投装置研究[J]. 机电信息, 2011, 312(30): 56-57.
- [4] 赵忠秋. 220 kV备自投配置及与相关保护的配合关系[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2012(1): 29-32.
- [5] 倪冬智. 典型接线方式下备自投闭锁方法的分析研究[J]. 科技创新导报, 2014(32): 21.

作者简介

陈妍君（1988—），女，硕士，工程师，主要研究方向为电力系统调度、高温超导技术应用。

（收稿日期：2020-12-29）