

高温超导电缆自动重合闸方案研究

杨军¹, 李诚², 张哲³, 尹项根³, 唐跃进³, 李敬东³

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉供电公司, 湖北 武汉 430068;
3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 高温超导电缆与传统电力电缆不同, 外部短路故障产生的过电流可能导致高温超导电缆由于短时失超而被切除。鉴于高温超导电缆输送容量大, 为了提高其供电可靠性和整个电网并列运行的稳定性, 有必要增设自动重合闸装置。论证了采用高温超导电缆自动重合闸的重要性, 阐述了高温超导电缆自动重合闸的设计原则, 提出了一种基于超导电缆温升的自适应式重合闸配置方案, 通过仿真计算, 验证了所提方案的有效性。

关键词: 高温超导电缆; 失超; 内部故障; 外部故障; 自动重合闸

Study of auto-reclosure strategy for high temperature superconducting cable

YANG Jun¹, LI Cheng², ZHANG Zhe³, YIN Xiang-gen³, TANG Yue-jin³, LI Jing-dong³

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430068, China;
3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Different from normal power cable, the High Temperature Superconducting (HTS) cable may be cut-off because of transient quench which is caused by external short-circuit current. HTS cable has a huge power transmission capacity, so the auto-reclosure device must be installed in the transmission line of HTS cable to improve the reliability and stability of power grid. The dissertation demonstrates the importance of auto-reclosure for HTS cable and analyses the temperature change of the HTS cable during reclosing, so that an appropriate strategy of auto-reclosure for HTS cable is presented, finally a simulation is carried out to investigate the validity of auto-reclosure scheme for HTS cable.

This project is supported by Chinese National Programs for High Technology Research and Development(No.2002AA306154).

Key words: high temperature superconducting cable; quench; internal failure; external failure; auto-reclosure

中图分类号: TM762.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)07-0015-04

0 引言

近年来随着我国国民经济的高速发展, 电力需求急剧增长, 特别是迅猛发展的大城市和城市密集居住地区, 对电能输送提出了新的要求。现有输电线路传输容量已不能满足日益增长的负荷需求, 线路损耗难以降低, 输电通道占地面积大, 已形成大容量电能传输的“瓶颈”。高温超导电缆具有传输容量大、损耗小、占地空间小、无污染等显著优点, 是解决电能传输“瓶颈”的较好选择^[1~5]。

规程规定, 在1 kV及以上电压的架空线路, 当其上有关断路器时, 一般都应装设自动重合闸装置^[6]; 对于常规电缆来说, 遭遇的故障一般都是永久性故障, 在线路断开后故障依然存在, 因此不装设自动重合闸装置。高温超导电缆可能发生由电缆外部短

路电流冲击而产生的短时失超故障^[7], 导致超导电缆保护动作切除电缆; 高温超导电缆传输电流很大, 在外部故障消除后, 为了提高供电可靠性和整个电网并列运行的稳定性, 必须重新将高温超导电缆投入运行。因此, 在高温超导电缆线路上有必要装设自动重合闸装置。本文阐述了高温超导电缆自动重合闸的设计原则, 对高温超导电缆重合闸过程中的温度变化进行了分析, 提出了一种基于超导电缆温升的自适应式重合闸配置方案和实现方法, 最后给出了相应的仿真计算结果。

1 高温超导电缆自动重合闸设计原则

对于架空线路来说, 自动重合闸操作是在本段线路内部发生故障后, 在保护跳闸后经预定延时将断路器重新合闸。与架空线路不同, 高温超导电缆遭遇到的故障情况较复杂。其内部故障属于永久性故障, 高温超导电缆被切除后故障不会消失, 不能

基金项目: 国家 863 项目 (2002AA306154)

进行重合闸操作；而外部故障造成的短路电流冲击使高温超导电缆温升过高而失超并导致电缆被切除后，在高温超导电缆能够恢复到超导态的条件下进行重合闸操作时，高温超导电缆能够重新投入运行。另外，重合闸时限与高温超导电缆本体温度以及短路电流大小有关，也不能预先设定。因此，架空线路的自动重合闸方案已不适用，必须在深入研究高温超导电缆故障情况的基础上，提出新的高温超导电缆自动重合闸方案。

在进行自动重合闸操作前，高温超导电缆线路必须首先判断是内部故障还是外部故障。如果是内部故障，包括内部短路故障、冷却系统故障、超导电缆本体故障，不能进行自动重合闸操作。如果是外部故障，即高温超导电缆遭遇外部短路电流冲击，导致本体温升过大而电缆失超被切除，在满足重合闸条件的情况下，可以进行自动重合闸操作，重新将高温超导电缆投入运行。因此，高温超导电缆进行重合闸的主要依据是超导电缆是否能够恢复到超导态，即冷却系统能否将失超后产生的正常区中的能量带走，从而使得正常区冷却到临界温度以下。

另外，高温超导电缆本体温度与短路电流有关，所以重合闸动作时限将随外部短路电流大小自适应改变，不是一个固定值，需要根据在线计算的高温超导电缆本体温度来确定。

因此，在为高温超导电缆系统配置自动重合闸方案时，必须先对高温超导电缆重合闸过程中的温度变化情况进行分析计算，判断其是否满足超导电缆本体安全性的要求。

2 高温超导电缆本体温度分析

当高温超导电缆遭遇过电流扰动突然失超时，其本体温度将迅速上升，若危及到超导电缆安全，保护装置动作，将电缆切除，超导电缆本体温度将下降，这个过程中的温度变化情况是高温超导电缆重合闸方案配置的重要基础。

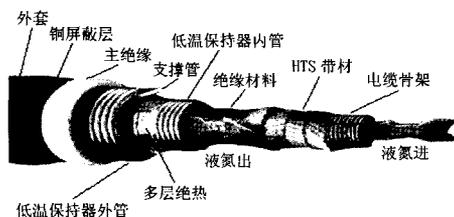


图1 双通道热绝缘高温超导电缆

Fig.1 Double-channel warm dielectric HTS cable

以双通道热绝缘高温超导电缆为例，图1为电

缆结构图^[8]，单通道高温超导电缆的本体温度分析与之类似。认为超导电缆在轴向上温度变化一致，这是因为超导电缆在轴向上结构和材料是均匀一致的。认为物体间接触良好，忽略超导带材与支撑管的接触热阻，忽略超导带材与绝缘的接触热阻。

超导电缆失超时的主要热源是电缆中的银基（被短路电流加热），因为短路电流持续时间短，所以可以近似认为它发出的热量除了冷却系统所带走的热量以外，其余热量被银基本身和超导带材所吸收，导致超导电缆温度从液氮温度（77 K）迅速升高，根据热力学第一定律^[9~11]，其热平衡过程对应的微分方程^[12]为：

$$\left(\frac{\rho_{Ag}(\theta) i^2(t)}{A_{Ag}} - \frac{2\pi k_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (\theta - T_1) - \frac{2\pi k_2}{\ln \frac{d_4}{d_3}} (\theta - T_1) \right) \cdot dt = \quad (1)$$

$$(d_{Ag} A_{Ag} C_{Ag}(\theta) + d_{hts} A_{hts} C_{hts}(\theta)) \cdot d\theta$$

式中： ρ_{ag} 是银的电阻率， d_{Ag} 、 d_{hts} 是银和高温超导线材的密度， A_{Ag} 、 A_{hts} 是电缆中银和高温超导线材的截面积， C_{Ag} 、 C_{hts} 是银和高温超导线材的比热， k_1 、 k_2 分别是超导层向内、向外的综合热导率， d_1 、 d_2 分别是内侧冷却通道内外径， d_3 、 d_4 分别是外侧冷却通道内外径， T_1 是液氮温度。

显然，在过电流扰动下，能被冷却系统带走热量并自恢复超导态的最高温度是高温超导电缆自动重合闸方案的关键，我们称这个温度为最高自恢复温度。高温超导电缆在过电流作用下达这个最高温度时，若短路故障切除，电流又恢复到额定工作电流时，冷却系统能够将失超后产生的正常区中的能量带走，从而使得正常区冷却到临界温度以下，重新恢复超导态运行。

与这个过程相应的计算公式如下：

$$Q_1 = Q_2 \quad (2)$$

Q_1 是电流恢复到工作电流以后电缆本体正常区单位长度上产生的瞬时欧姆热，也就是银基上产生的欧姆热（不考虑分流）； Q_2 是冷却系统单位长度上瞬时带走的热量，即液氮带走的热量。

波纹管单位长度上的热流：

$$Q_2 = \frac{2\pi k_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (T_2 - T_1) + \frac{2\pi k_2}{\ln \frac{d_4}{d_3}} (T_2 - T_1) \quad (3)$$

其中： T_1 、 T_2 分别是液氮温度和超导层温度。联立公式(2)和(3)可以求出自恢复超导态的最高温度。显然，高温超导电缆在过电流扰动时温度不超过最高

自恢复温度时, 当电流又恢复到额定工作电流后, 冷却系统能够使正常区冷却到临界温度以下, 电缆可以重新恢复到超导态运行。因此, 高温超导电缆进行自动重合闸操作时, 其本体温度必须小于最高自恢复温度。

3 高温超导电缆自动重合闸配置方案

高温超导电缆线路自动重合闸配置方案如下:

1) 根据高温超导电缆本身保护装置的动作情况, 判断故障是否是内部故障。如果是内部故障, 不进行自动重合闸操作。

2) 满足故障点去游离(即介质恢复绝缘能力)所需时间以及断路器消弧室和断路器的传动机构准备好再次动作所必须的时间, 这个时间一般取为 0.5 s。

3) 在线计算高温超导电缆本体将达到的温度, 在 0.5 s 以后一旦温度低于最高超导态自恢复温度, 进行重合闸操作。

4 高温超导电缆自动重合闸仿真分析

下面以云南省普吉变电站高温超导电缆为例, 阐述高温超导电缆线路的自动重合闸配置方法, 并对重合闸过程中高温超导电缆的温度变化情况进行分析。由于这套高温超导电缆系统是我国第一套在实际电网中运行的超导电缆, 为了保证高温超导电缆发生故障被切除后不影响对用户的供电, 现场增加了一断路器支路与高温超导电缆相并联, 一旦超导电缆切除, 可通过这根并联支路供电。根据变电站的接线特点并保证供电的连续性, 高温超导电缆保护装置的跳闸逻辑为: 保护装置首先发合闸命令, 合上与超导电缆相并联的断路器, 然后发跳闸命令, 跳开超导电缆两端的断路器, 以防止当超导电缆本体运行异常需切除电缆时, 造成供电负荷的中断。而合闸逻辑为: 首先发合闸命令, 合上超导电缆两端的断路器, 然后发跳闸命令, 断开与超导电缆相并联的断路器, 以保证电缆合闸过程中负荷供电的稳定。普吉变电站高温超导电缆系统的一次接线图如图 2 所示。

在线路发生故障时, 高温超导电缆保护装置首先判断是外部故障还是内部故障, 如果是内部故障, 按照上述跳闸逻辑跳闸, 不执行重合闸操作; 如果是外部故障, 按照上述跳闸逻辑跳闸后, 保护装置进行在线温度计算, 从跳闸 0.5 s 后开始, 一旦计算出的温度低于最高超导态自恢复温度, 按照上述合闸逻辑进行重合闸操作。

高温超导电缆运行在额定工作电流下, 温度保

持在 77 K, 在 $t=1.0$ s 时外部线路发生瞬时性短路, 假设短路电流大小为 31 kA(幅值), 在 $t=1.25$ s 高温超导电缆被切除。根据公式 (2)、(3) 预先可以计算出最高超导态自恢复温度为 191.321 K。根据公式 (1) 在线计算超导电缆本体温度变化情况, 如图 3 所示。

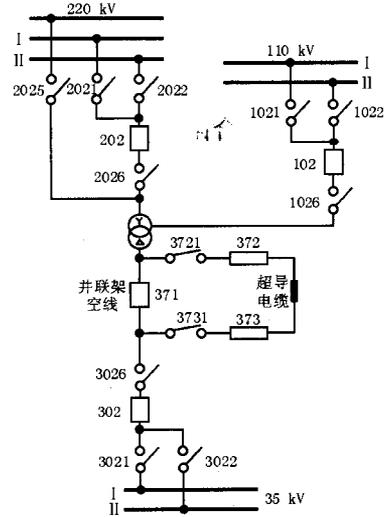


图 2 普吉变电站一次系统接线图

Fig.2 Main connection diagram structure of Puji substation

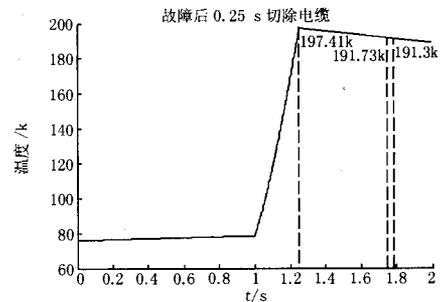


图 3 故障后 0.25 s 切除电缆后温度变化情况

Fig.3 Temperature of cable cut-off in 0.25s after fault

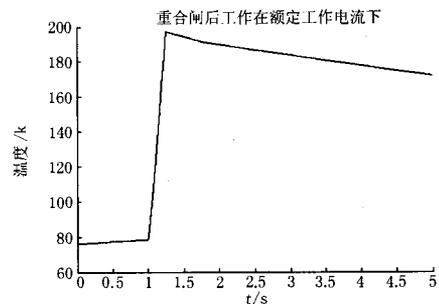


图 4 高温超导电缆重合闸成功后的温度变化

Fig.4 Temperature's change after successful reclosure of HTS cable

由图 3 可知, 高温超导电缆在 1.25 s 时温度上升到顶点后迅速下降, 在 $t=2$ s 时温度下降到 190.75 K。其中最高温度为 197.41 K, 在 $t=1.75$ s (电缆切除后 0.5 s) 时温度为 191.73 K, 大于最高超导态自恢复温度, 不能重合; 在 $t=1.788$ s 时温度为 191.3 K, 小于最高超导态自恢复温度, 这说明在这个时候进行重合闸后冷却系统能够将过电流产生的热量带走, 能够使高温超导电缆恢复到超导状态。因此, 重合闸动作时限为 0.538 s。图 4 是 $t=1.788$ s 重合闸成功后 (外部线路同时重合闸成功) 的温度变化情况。

5 结论

鉴于高温超导电缆输送容量大, 为了保证其供电可靠性和整个电网并列运行的稳定性, 有必要在高温超导电缆线路上增设自动重合闸装置。本文分析了高温超导电缆的故障特点, 阐述了高温超导电缆自动重合闸设计原则, 对高温超导电缆自动重合闸过程中的电缆温度变化情况进行了分析, 给出了高温超导电缆线路自适应自动重合闸配合方案, 相应的仿真结果验证了所提方案的有效性。

参考文献

- [1] 刘志明. 高温超导电力技术展望[J]. 电气时空, 2003, (8): 22-23.
LIU Zhi-ming. The Prospect of High Temperature Superconducting Technology[J]. Popular Utilization of Electricity, 2003, (8): 22-23.
- [2] 翟光荣, 汪永华. 高温超导及在电力工业中的应用[J]. 东北电力技术, 2002, (2): 49-52.
ZHAI Guang-rong, WANG Yong-hua. The High Temperature Superconductivity and Its Application in the Electric power Industry[J]. Northeast Electric Power Technology, 2002, (2): 49-52.
- [3] 信赢. 超导电力技术及其发展前景[J]. 国际电力, 2005, 9(1): 62-64.
XIN Ying. Electrical Power Applications of Superconductivity and Their Industrialization Prospects[J]. International Electric Power for China, 2005, 9(1): 62-64.
- [4] 信赢, 候波, 曹昆南. 高温超导电缆-电力传输新材料[J]. 云南电力, 2003, (7): 38-41.
XIN Ying, HOU Bo, CAO Kun-nan. HTS Cable-the New Material of Power Transmission[J]. Yunnan Electric Power, 2003, (7): 38-41.
- [5] 余然. 高温超导输电技术的应用[J]. 国际电力, 2001, (1): 20-23.
YU Ran. Applications of High Temperature Superconductor Transmission[J]. International Electric Power for China, 2001, (1): 20-23.
- [6] 尹项根, 曾克娥. 电力系统继电保护原理与应用 (第一版) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [7] 杨军, 张哲, 尹项根, 等. 高温超导电缆在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28 (21): 63-68.
YANG Jun, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. Application of High Temperature Superconducting Cable in Power Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28 (21): 63-68.
- [8] 杨军, 张哲, 尹项根, 等. 我国首套高温超导电缆并网运行情况[J]. 电网技术, 2005, 29 (4): 4-7.
YANG Jun, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. On-line Operation Situation of First High Temperature Superconducting Cable System in China[J]. Power System Technology, 2005, 29 (4): 4-7.
- [9] 唐跃进, 李敬东, 潘垣. 电力系统中超导装置的过电流失超保护[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(6): 24-26.
TANG Yue-jin, LI Jing-dong, PAN Yuan. Quench Protection in Superconducting Electric Power System[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(6): 24-26.
- [10] 南和礼. 绝热超导磁体失超过渡过程的数值模拟研究[J]. 低温物理学报, 2000, 22(4): 299-305.
NAN He-li. Numerical Simulation of Quenching Processes for Adiabatic Superconducting Magnets[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2000, 22(4): 299-305.
- [11] 俞昌铭. 热传导及其数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- [12] 杨军, 张哲, 唐跃进, 等. 高温超导电缆监测与保护装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 101-104.
YANG Jun, ZHANG Zhe, TANG Yue-jin, et al. Development of HTS cable's Monitoring and Protection Device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 101-104.

收稿日期: 2006-10-23; 修回日期: 2006-12-18

作者简介:

杨军 (1977-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为超导技术与继电保护技术在电力系统中的应用; E-mail: yj5460@163.com

李诚 (1972-), 男, 高级工程师, 从事电力系统生产运行管理工作;

张哲 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统自动化等相关研究工作。