

文章编号: 1006—2106(2009)12—0065—03

石太客运专线电缆贯通线路补偿和接地方案研究^{*}

周 凡^{**}

(大西客专公司筹备组, 太原 030024)

摘要: 研究目的: 为提高供电的可靠性, 石太客运专线区间电力贯通线采用长达 30~60 km 电缆线路, 容性电流通常会大于 30 A 超过了国标规定的限值。由于铁路区间负荷较小, 且在不同时段、不同运行方式下负荷变化较大, 而电缆的容性负荷所占比例较大, 线路的容性电流会随着铁路负荷变化而变化。为解决工程中电缆的容性效应问题, 本文采用数字电磁暂态仿真程序(ATP)分析、计算补偿容量, 以确定补偿和故障消弧的方案。

研究结论: 本文结合石太客运专线工程的实际情况, 论述了长大电缆的容性效应问题可能产生的危害, 提出了解决此问题的具体方案, 同时利用数字电磁暂态仿真程序(ATP)确定了静止型动态有源补偿装置(SVG)及跟踪式消弧线圈的补偿容量。此方法通过工程实测验证补偿效果是明显和稳定的, 可为其它类似工程设计提供借鉴。

关键词: 电缆; 容性; 仿真

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A

Study on the Plans for Compensation and Earthing of Power Cable through Line of Shijiazhuang—Taiyuan PDL

ZHOU Fan

(Preparatory Committee of Datong—Xian HDL Corporation, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Research purposes: In order to improve power supply reliability, the 30—60 km long power cable through line was used for Shijiazhuang—Taiyuan PDL. Its capacitive current was normally bigger than 30 A and exceeded the international limited value. Since the load was not high in the railway section, the load much differed in different time and running method, and the capacitive current of the cable line amounted a big proportion of the total current, the capacitive current of the cable line changed with the change of railway load. In order to solve the capacitive effect, this paper analyzes and calculates the compensation capacity with ATP to determine the plan of compensation and extinction of the electrical arc.

Research conclusions: Combined with the actual engineering situation of Shijiazhuang—Taiyuan HDL, this paper describes the harm probably caused by capacitive effect of long cable line, gives the resolution to this problem, and determine compensation capacities of the static-type SVG and tracking-mode extinction coil with ATP. This method is proved reliable with perfect result in the real test and can be as the reference to the similar works.

Key words: cable; capacitance; simulation

近几年建设的客运专线供电系统, 为抵御自然气候的侵袭, 需提高供电的可靠性。为区间负荷供电的贯通线路大多采用全电缆线路, 这种线路由于长达 30~

60 km 容性电流通常会大于 30 A 超过了国标规定的限值。超过规定的限制主要带来四大问题: 一是可能导致功率因数为负值, 影响电网供电质量; 二是贯通线

^{*} 收稿日期: 2009—09—25

^{**} 作者简介: 周凡, 1963年出生, 男, 高级工程师。

空载时容性容量很大,甚至超过调压器自身容量,威胁设备安全;三是发生单相接地故障时,故障电流较大,如果发生弧光接地,系统内电压最大可升高 3.5 倍相电压,尤其发生谐振后,将对供电系统造成极大破坏^[2];四是由于存在容升效应,线路远端电压可能会升高,对设备绝缘造成潜在威胁。因此,必须采取措施,使系统绝缘水平、电压水平、功率因数等指标满足国标要求。

在国内已建成的京津、合宁客运专线中,采用的是全电缆供电方案,尚缺乏系统借鉴的测试、验证结果和实际运营经验,且电力部门亦无同类工程可以借鉴。由于分布参数和系统运行状态的复杂性,上述问题仅仅依靠一般的理论计算和分析是不能有效解决的,须进行专门研究、仿真和测试。

针对上述情况,在石太客运专线工程中采用数字电磁暂态仿真程序(ATP)对电容效应进行了分析、计算,进而提出补偿方案。

1 石太客运专线电力供电系统概况

全线新线区段沿铁路新建 10 kV 一级负荷贯通线和综合贯通线路各 1 条,区间一级负荷由两路贯通线路分别接引一路电源供电,区间其它负荷由综合贯通线路接引电源供电。

两条贯通线路中,1 条全部采用非磁铠装交联单芯铜电缆,另 1 条采用单芯铜电缆与架空线混合方式。

全线设置阳泉北、井陉北、DK 160+112、太原北 4 座 10 kV 配电所。配电所均接引两路外部电源,各配电所所在为本站供电的同时,向沿线馈出四路(两个方向)贯通。

各配电所采用单母线真空断路器分段运行方式,两路 10 kV 电源分别接在两段母线上。正常时,母联断路器打开,两路电源同时运行,互为备用;当一路检修或发生故障时,母联断路器闭合,由另一路电源供电。贯通线路经有载调压器隔离后馈出,设调后母线;所用变压器分别设置在两段 10 kV 母线上。

调压器经消弧线圈接地,设接地变压器。配电所内在调压后母线段集中设置动态补偿装置(SVG),相应的配备成套的控制和保护装置,用于补偿线路分布电容的影响,调节功率因数在规定的范围内。

2 贯通线电力电缆补偿研究

由于铁路区间负荷较小,且不同时段、不同运行方式下,负荷变化较大,而电缆的容性负荷所占比例较大,线路的容性电流会随着铁路负荷变化而变化。采用固定容量的电抗器或几种容量可变化的电抗器进行

针对性补偿,难以有效跟踪系统参数的变化,获得理想效果。如果采用过补的方式去覆盖各种可能,又存在可能发生并联谐振的问题^[3-5]。因此,应立足于动态跟踪,精确补偿才能获得较好的效果,其补偿容量的确定是极为关键的问题。

2.1 补偿容量的确定

石太客运专线电缆容性电流随负荷变化较大,其最大补偿量主要根据配电所所有贯通出线的电缆电容量之和计算得出。

由于贯通线上存在大量的感性负荷,这些感性负荷的容量也是不断变化的,因此补偿装置也应具备动态调整其感性容量的功能,方可将功率因数控制在预定范围内。经过技术经济比较,动态补偿装置的最大补偿量按配电所同一调压母线同时向上下行方向供电情况下进行补偿。

以阳泉北 10 kV 配电所一级负荷贯通线为例。其上行方向电缆线路长度为 51.2 km,下行方向电缆线路长度为 60.45 km;经过实际测量,线路的正序和零序参数^[6-8]分别为:

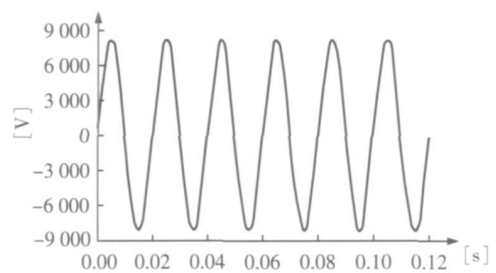
$$Z_{(1)} = 0.310 + j0.101 \Omega / \text{km}$$

$$Z_{(0)} = 0.296 + j0.186 \Omega / \text{km}$$

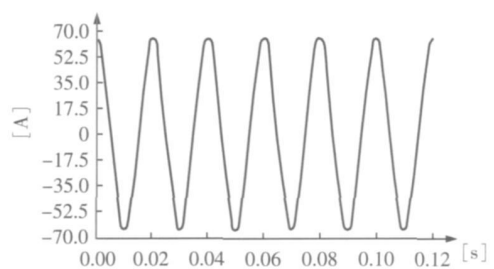
$$C_{(1)} = 0.262 \mu\text{F} / \text{km}$$

$$C_{(0)} = 0.223 \mu\text{F} / \text{km}$$

利用数字电磁暂态仿真程序^[9] ATP(Alternative Transients Program)搭建仿真模型。当配电所同时向上下行方向供电且线路空载时,调压母线上的 A 相电压及电流仿真结果如图 1 所示(B 相、C 相电压及电流波形与其相同)。



(a) A 相电压波形



(b) A 相电流波形

图 1 电缆线路空载稳态运行电压电流波形图

由图 1 的波形图可明显看出电流相位超前电压的相角近 90° , 即电缆线路近乎纯容性。通过傅氏算法可得到调压母线上电流有效值为 46 A 。线路电容功率为:

$$Q = \sqrt{3} UI = \sqrt{3} \times 10 \times 46 = 796\text{ kW} \quad (1)$$

式中 U ——线电压;

I ——母线电流。

由此动态补偿装置的最大容量可选择为 850 kW 。

2.2 补偿方案

石太客运专线补偿实施方案是在配电所调压母线段设静止型动态有源补偿装置 SVG 用以抵消无功电流, 控制输电系统的稳定性, 提高线路传输容量, 改善电能质量。这种装置在国家电网中已有不少的应用案例, 但在铁路 10 kV 系统为首次采用。经过一段时间的试验运行, 可以精确而稳定地跟踪系统参数, 将功率因数定位在设定值, 同时具有滤波作用, 效果良好, 提高了电能质量。

动态补偿装置基于 IGBT 技术, 采用有源补偿, 具有响应速度快、可控性高的优势, 并可跟踪补偿基波及各次谐波。SVG 将电压源型逆变器 (VSC) 经过电抗器或变压器并联在电网上, 通过调节逆变器交流侧输出电压的幅值和相位, 或直接控制其交流侧电流的幅值和相位, 迅速吸收或发出所需要的无功功率, 实现快速动态调节无功的目的。当采用直接电流控制时, 直接对交流侧电流进行控制, 不仅可以跟踪补偿冲击型负载的冲击电流, 而且可以对谐波电流进行跟踪补偿。由于是有源电流补偿, 可以实现双向调节, 即可补偿容性电流, 也可补偿感性电流, 并且无谐振可能。

3 贯通线接地方式研究

3.1 接地方案的确定

由于石太客运专线有一路贯通线为混架线路, 考虑到架空线路受外界干扰较大, 易发生线路临时接地故障, 为尽可能保证供电的持续性, 并消除弧光过电压影响, 选用经跟踪式消弧线圈中性点非有效接地系统, 设接地变压器。线路发生单相接地时, 可短时运行一段时间, 以便通过 PSCADA 系统进行故障判断。对于临时性故障, 可利用自动重合闸功能自动恢复供电。

接地变压器^[10]经消弧线圈接地的接地方式, 即接地变压器接在调压母线上, 在中性点不接地系统中人为的制造出一个中性点, 用它来联结消弧线圈接地, 该变压器采用 Δ 形绕组接法, 对正序、负序电流呈高阻抗, 对零序电流呈低阻抗。

经过技术经济比较, 消弧线圈的容量按配电所上

下行方向贯通出线所含电缆总长度的较长者进行计算, 并考虑一定的冗余度。为防止过补偿, 消弧线圈可根据中性点电压和电流, 调整其电感量, 使残流最小, 电弧自熄, 消除弧光接地过电压。

3.2 消弧线圈及其接地变压器容量的确定

仍以阳泉北 10 kV 配电所一级负荷贯通线为例。配电所上行方向电缆较长, 当上行方向供电且线路空载时, 若配电所出口处 (线路首端) A 相发生短路, 则短路电流仿真结果如图 2 所示; 若线路末端 A 相发生短路, 则短路电流仿真结果如图 3 所示。通过差分傅氏算法可得到短路电流的有效值分别为 74.6 A 和 82.7 A 。选择最大短路电流确定的相应消弧线圈的容量为:

$$Q = UI\sqrt{3} = 10 \times 82.7\sqrt{3} = 477\text{ kW} \quad (2)$$

式中 U ——线电压;

I ——最大短路电流。

在此基础上再取 1.5 的冗余系数, 最终消弧线圈的最大容量可选择为 750 kW 。

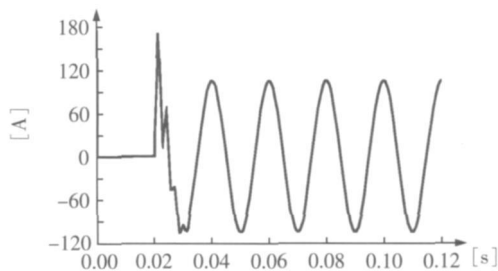


图 2 线路首端 A 相接地短路的电流波形图

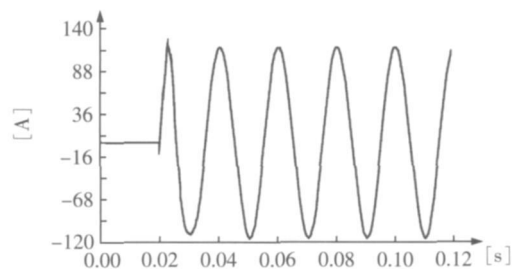


图 3 线路末端 A 相接地短路的电流波形图

单相接地故障时流过 Δ 形变压器的各相电流为消弧线圈电流的 $1/3$, 则变压器的容量为:

$$S = \sqrt{3} UI/3 = UI\sqrt{3} = Q \quad (3)$$

因此消弧线圈的最大容量与其接地变压器的容量相同, 即同为 750 kW 。

4 结论

本文结合石太客运专线工程的实际情况, 论述了

(下转第 71 页)

准确, 以便接触线穿过人防门预留孔时不受影响。

4.2.2.2 接触线断开方案

该方案与不断开方案基本相同, 只是在通过防护隔断门时的小段汇流排和接触线都断开, 此方案比接触线不断开方案能够更便捷、快速, 不足之处是接触线断开, 接触线断口处平整度和可拆卸汇流排与接触线安装精度极高, 大小段锚段安装调整不平而会出现火花。另外随着温度的变化, 汇流排和接触线材料本身的变化以及伸缩率不同, 容易在断口处存在隐患。

5 结论

通过对接触网和人防两方面的综合分析, 接触网与防护隔断门结构形式的配合上, 柔性悬挂可以配合带插板的防护隔断门, 而刚性悬挂时则配合带防护密闭封堵板的防护隔断门, 这 2 种门的结构能够在平时正常情况下保证接触网良好受流质量, 满足行车要求, 在战时又可迅速完成人防功能转换。

在接触网通过防护隔断门方案分析中, 汇流排外接头接触线不断开方案优势较为明显, 因此该方案更适合刚性悬挂通过防护隔断门, 并且平、战施工快捷, 接触网采用的零部件少, 对运营维护十分有利, 可以产生较好的经济效益并能运用到实际工程中去。

(上接第 67 页)

长大电缆的容性效应问题可能产生的危害, 又提出了解决此问题的具体方案, 同时利用数字电磁暂态仿真程序 (ATP) 确定了静止型动态有源补偿装置 (SVG) 及跟踪式消弧线圈的补偿容量。此方法通过工程实测验证补偿效果明显和稳定。笔者认为该方案通过采用先进技术, 对解决客运专线和高速铁路电力子系统急迫解决的问题是一个比较超前的尝试, 必将对其它类似工程有重要的借鉴意义。通过一段时间的运营, 并可积累宝贵经验, 以求进一步完善, 发挥其更大的作用。

参考文献:

- [1] 贺志峰, 刘沛. 对中压配电网中性点接地方式的研究 [J]. 电力自动化设备, 2002(9): 70—72
- [2] 解广韵. 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1983
- [3] 刘万顺. 电力系统故障分析 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1980

参考文献:

- [1] GB 50157—2003 地下铁道设计规范 [S].
- [2] DGJ08—109—2004 上海市工程建设规范·城市轨道交通设计规范 [S].
- [3] GB 50225—2005 人民防空工程设计规范 [S].
- [4] 上海市地下建筑设计研究院, 上海申通地铁集团有限公司, 上海申通轨道交通研究咨询有限公司. 防护密闭隔断门通用图集 [Z]. 上海: 上海市地下建筑设计研究院, 2008
- [5] 铁道第三勘察设计院. 上海轨道交通 9 号线一期工程可行性研究报告 [R]. 天津: 铁道第三勘察设计院, 2004
- [6] 于万聚. 接触网设计及检测原理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991
- [7] 于松伟, 等. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008
- [8] 蔡志刚. 隧道内柔性悬挂接触网刚性化改造技术探讨 [J]. 电气化铁道, 2005(增刊): 134—137
- [9] 赖声刚. 刚性接触悬挂在运行中的常见问题及分析处理 [J]. 都市快轨交通, 2004(2): 46—48
- [10] 杨延军, 等. 人民防空工程概论 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2006

(编辑 曹淑荣)

社, 1980

- [4] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
- [5] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1994
- [6] 刘卓辉. 铁路贯通电缆容性参数及仿真的研究 [J]. 电气化铁道, 2009(2): 5—9
- [7] 毛为民. 电力电缆相序阻抗计算与分析 [J]. 供用电, 2002(4): 24—25
- [8] 卓金玉. 电力电缆线路的相序阻抗 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [9] 束洪春, 司大军, 陈学允. 复杂电力系统电气故障电磁暂态数字计算方法研究 [J]. 电网技术, 2003(12): 31—36
- [10] 黎文安. 电气设备手册 [K]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007

(编辑 曹淑荣)