

±800 kV 锦苏直流工程全压启动故障仿真分析

徐强¹, 谢天喜², 吴珺², 马勇², 周志成², 陶风波²

(1. 国网江苏省电力公司, 江苏南京 210024; 2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

摘要:特高压直流系统出现全压启动故障时会在线路和直流母线设备上产生很高过电压, 威胁设备和系统的运行安全。文中运用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件建立了±800 kV 锦屏—苏州特高压直流工程全压启动故障计算模型, 仿真计算了该工程在金属回线、单极大地回线和双极大地回线 3 种运行方式下出现全压启动故障时引发的过电压、过电流, 分析了其波形与幅值, 核算了此时设备的绝缘裕度是否满足要求。计算结果表明, 在当前的避雷器配置下, 锦苏特高压直流工程出现全压启动故障时的过电压最高达到 1 398.5 kV, 低于设备 1600 kV 的绝缘水平且满足 10% 的绝缘裕度要求。文中的研究成果可为特高压直流工程的设计、运行和维护提供参考。

关键词:电全压启动; 过电压; 特高压直流; PSCAD/EMTDC

中图分类号: TM864

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)04-0008-03

特高压直流输电因其具有输送距离远、容量大、控制调节迅速准确、线路损耗低等诸多优点, 目前正被作为理想的大容量、远距离输电方式大力发展^[1,2]。然而由于高压直流输电系统换流站的控制保护系统结构复杂, 易因控制系统故障引发的暂态过电压导致直流系统故障甚至停运, 严重威胁区域电网的安全运行, 因而有必要对其进行研究。在种类众多的直流系统过电压中, 全电压启动过电压是在确定直流输电的绝缘水平时需要考虑的内过电压形式之一。特高压直流系统正常启动时, 整流站通过两站站控系统经通信系统命令逆变站先解锁, 然后整流站解锁, 直流电压和电流上升率受极控的调节系统控制, 以较平缓的斜坡函数上升至额定值, 时间达几分钟, 即使逆变站处于闭锁状态也不会产生较高的过电压。另外极控也装备了防止换流器小角度解锁的连锁环节^[3-5]。如果直流系统的站控和极控系统同时发生故障且通讯也发生故障, 给出错误的解锁信号, 整流站以最小 α 角解锁, 且调节器失去调节功能, 而逆变站处于闭锁状态, 则将在直流线路上以及极设备上产生所谓的“全电压启动”过电压。由于线路瞬间充电电压较高, 而闭锁逆变站相当于线路末端开路, 末端呈现全反射, 于是在线路和直流母线设备上产生很高过电压, 威胁直流系统的设备安全^[6,7]。因此有必要对±800 kV 特高压直流换流站的全压启动过电压进行计算分析, 以期对换流变压器、平波电抗器等主设备的绝缘设计和校核提供参考依据。

1 计算条件

±800 kV 锦屏—苏州直流输电工程于 2012 年底建成, 容量为 2×3600 MW, 额定直流电流 4.5 kA, 采用每回每极双 12 脉动阀组接线方式, 输电距离约 2 090.5 km, 工程整体接线原理图如图 1 所示。

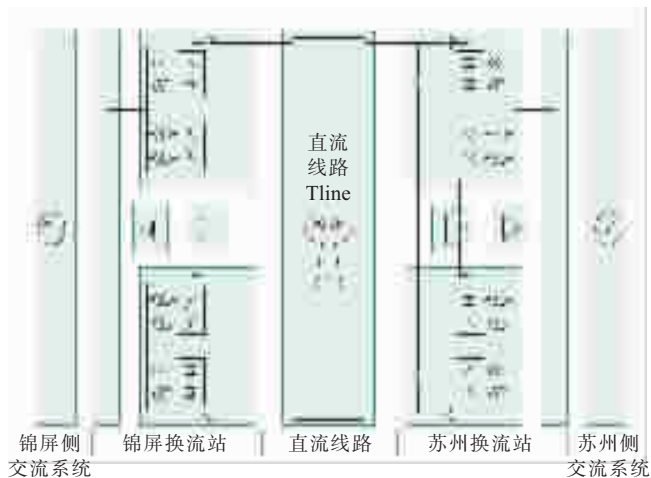


图 1 ±800 kV 锦屏—苏州直流输电工程整体接线原理图

系统整流侧额定触发角为 15° , 逆变侧额定关断角为 17° 。采用的交流滤波器共分 4 大组、16 小组, 包括 HP12 型交流滤波器 4 组、HP24/36 型交流滤波器 4 组 and 并联电容器 8 组, 每个小组的无功容量均为 270 Mvar。直流滤波器为 2 组双调谐无源滤波器, 每极直流母线和中性母线间各配置 1 组, 每站每极直流极母线以及中性母线上各装设 2 个 60 mH 平波电抗器^[8]。

目前国内外用于电力系统电磁暂态仿真的软件主要有 PSCAD/EMTDC, ATP/EMTP, EMTP_RV 等, 其中 PSCAD/EMTDC 相比于其他软件增加了直流输电系统的相关设备模型, 具有丰富的直流元件模型, 可以进行精确和快速地电磁暂态仿真及数据分析, 因此本文以 PSCAD/EMTDC 软件作为仿真平台建立了锦屏—苏州直流输电工程的系统模型, 搭建的换流站内主要设备以及输电线路的配备及参数与实际工程保持一致, 交流系统采用戴维南等值电路, 等值电路不影响直流系统动态性能分析^[9]。

换流站的避雷器配置情况如图 2 所示, 避雷器配置参数如表 1 所示。

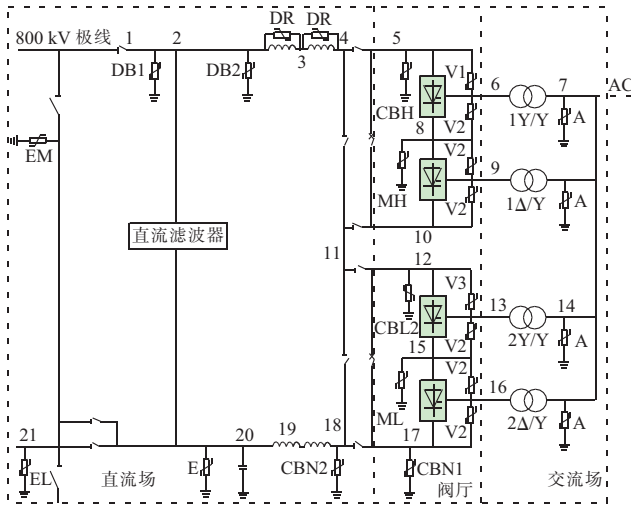


图2 锦苏直流工程苏州换流站避雷器的单极布置方案

表1 苏州站避雷器配置参数 kV

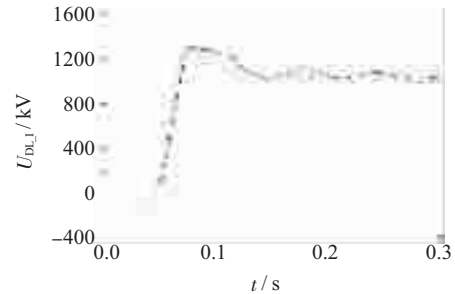
避雷器	最大持续运行电压	参考电压
V1	274.6	194.2(有效值)
V2	274.6	194.3(有效值)
V3	374.6	194.4(有效值)
ML	311.9	346.5
MH	706.9	785.4
CBL2	478.2	531.1
CBH	876.6	974
DB1	816	997.1
DB2	816	997.1
CBN1	174.9	311.9
CBN2	174.9	273.4
E	20	219.4
EL	20	204
EM	20	223.3
A	318	399(有效值)
DR	44	600(有效值)

2 计算结果及分析

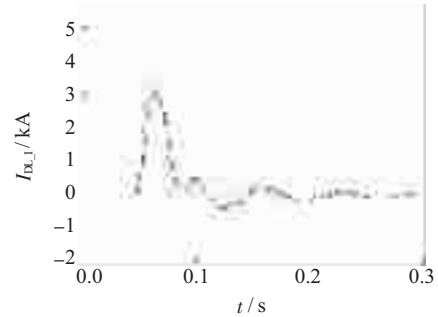
对于两端双极的直流输电系统,由不同的直流系统接线方式确定的运行方式可分为双极或单极运行:(1)双极接线运行方式,架空线路的双极运行方式采用大地做回路;(2)单极接线运行方式,当某一极换流站主设备或直流极线故障,可采用单极大地回路方式;如果接地极损坏,可采用单极金属回线运行方式^[10]。

本文对锦苏直流工程金属回线(MR)、单极大地回线(GR)和双极大地回线(BP)(一极正常运行的方式下,另一极全压启动)3种运行方式下全电压启动的过电压进行了仿真计算,苏州换流站直流侧各关键位置直流电压与直流电流波形的变化如图3所示。

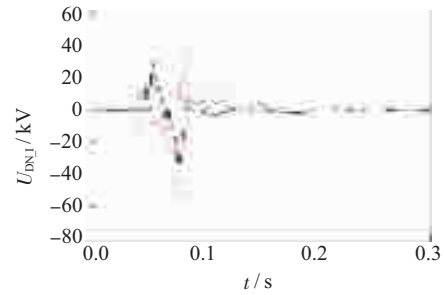
由图3(a)中可知,全压启动故障下直流侧极线上出现明显过电压,极线直流电压在解锁瞬间以较大的斜率跃变上升,其中BP运行方式下线路入口处电压



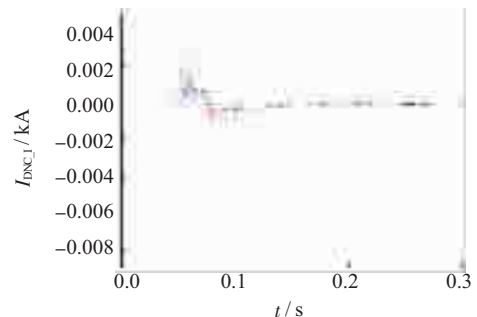
(a) 线路入口直流电压



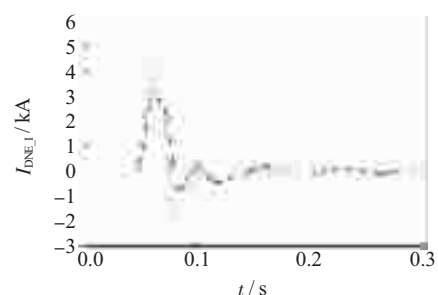
(b) 线路入口直流电流



(c) 中性母线直流电压



(d) 中性母线直流电流



(e) 接地极线路电流

图3 锦苏直流输电工程全压启动故障波形

幅值最高,达到约 1400 kV,GR 和 MR 运行方式下最高电压约为 1300 kV。3 种运行方式下的过电压在经过约 250 ms 的振荡后趋于平稳。由图 3(b)可知,线路入口处出现过电压的同时,也流经了振荡电流,BP 运行方式下电流幅值最高,达到 4.5 kA 左右,GR 和 MR 运行方式下最大电流约为 3 kA。3 种运行方式下电流在约 300 ms 后降到 0。由图 3(c)、图 3(d)可知,中性母线上的电压、电流变化规律与线路入口处类似,均为 BP 运行方式下幅值最高。

接地极线电流因运行方式的不同幅值差异较大,在 BP 运行方式下,接地极线电流最大幅值约为 5 kA,而 GR 和 MR 运行方式下最大电流约为 3 kA,经过约 300 ms 的振荡后电流降为 0。

发生全压启动故障时,锦苏系统中各关键位置的过电压幅值如表 2 和表 3 所示。

表 2 锦屏换流站各关键位置过电压 kV

关键位置电压值	GR	MR	BP
阀顶	1 044.9	921.6	1 274.1
直流线路出口	1 044.6	922.5	1 349.5
平抗端	154.4	154.4	362.5
中性母线	154.4	238.2	240.2
阀端	308.7	287.1	337.2
换流变阀侧 Y 线圈端子	956.5	920.1	1 149.7
换流变阀侧 D 线圈端子	686.3	756.2	912.5

表 3 苏州换流站各关键位置过电压 kV

关键位置电压值	GR	MR	BP
阀顶	1 134.1	913.8	1 398.5
直流线路出口	1 133.8	913.8	1 394.8
平抗端	0.68	0.9	81.2
中性母线	22.9	43.9	88.6
阀端	308.7	346.2	349.9
换流变阀侧 Y 线圈端子	1 023.3	823.9	1 173.2
换流变阀侧 D 线圈端子	712.3	547.3	885.8

由表 2、表 3 可见,全压启动将在直流极母线上产生严重过电压,苏州侧(逆变侧)过电压的幅值高于锦屏侧(整流侧),在一极正常运行时全压启动另外一极在逆变侧极母线上造成最大过电压,在阀顶与直流线路出口口的电压达到 1 398.5 kV,低于设备 1600 kV 的绝缘水平且满足 10%的绝缘裕度要求^[11,12]。同时两站的换流变阀侧端子、阀两端、平抗两端都会出现不同程度的过电压。

3 结束语

本文基于 PSCAD/EMTDC 软件搭建了±800 kV 锦屏—苏州直流输电工程全电压启动故障仿真模型,计算了金属回线、单极大地回线和双极大地回线 3 种运行方式下发生全压启动故障时直流系统的过电压、

电流,且得出以下结论:

(1) 在不同的运行方式下,锦苏直流系统内出现全压启动故障时,两站的阀顶、换流变阀侧端子、阀两端、平抗两端都会出现不同程度的过电压,其中苏州侧(逆变侧)过电压的幅值高于锦屏侧(整流侧),双极大地回线运行状态下一极正常运行时另外一极全压启动会在阀顶与直流线路出口处造成最大过电压,达到 1 398.5 kV。

(2) 不同的运行方式下出现全压启动故障时,极线直流电压与电流、中性母线电压与电流的变化趋势相同,双极大地运行状态下接地极过电流最高可达到近 5 kA。

参考文献:

- [1] 张文亮,于永清,李光范,等.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.
- [2] 袁清云.特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J].电网技术,2005,29(14):1-3.
- [3] 黄志岭,田杰.基于详细直流控制系统模型的 EMTDC 仿真[J].电力系统自动化,2008,32(3):45-48.
- [4] 魏旭,谢天喜,陶风波,等.±500 kV 直流输电线路暂态故障监测装置的设计与应用[J].江苏电机工程,2014,33(6):23-25.
- [5] 杨万开,印永华,曾南超,等.向家坝—上海±800 kV 特高压直流输电工程系统调试技术分析[J].电网技术,2011,35(7):19-23.
- [6] 陈宏君,王国栋,刘克金,等.直流控制保护系统中的 IED 自动建模设计[J].江苏电机工程,2015,34(4):14-16.
- [7] 严干贵,韩来文,孙效伟.呼—辽高压直流输电系统全电压启动过电压的研究[J].东北电力技术,2007(1):9-12.
- [8] YU S F, NIE D Z, MA W M, et al. Overvoltage and Insulation Coordination of Jinping-Sunan ±800 kV UHVDC Project Converter Stations [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12):3219-3223.
- [9] FARUQUE M O, ZHANG Y Y, DINAUHAI V. Detailed Modeling of CIGRE HVDC Benchmark System Using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1):378-387.
- [10] 陈锡磊,周浩,王东举,等.溪洛渡—浙西±800 kV 特高压直流输电工程浙西站绝缘配合[J].电网技术,2012,36(2):7-12.
- [11] GB/T 311.3—2007 绝缘配合第 3 部分:高压直流换流站绝缘配合程序[S].
- [12] 周浩,陈锡磊,陈润辉,等.±800 kV 特高压直流换流站绝缘配合方案分析[J].电网技术,2011,35(11):18-24.

作者简介:

徐强(1962),男,浙江慈溪人,高级工程师,从事电力系统研究工作;

谢天喜(1983),男,湖北天门人,高级工程师,从事电力设备结构优化及电力系统过电压研究工作;

吴珺(1964),女,福建福州人,高级工程师,从事高电压技术研究和人力资源管理;

参考文献:

- [1] Q/GDW 383—2009 智能变电站技术导则[S].
- [2] 沈富宝,王中秋. 苏州首座 220 kV 智能变电站分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 45-48.
- [3] 黄新波,贺 霞,王宵宽,等. 智能变电站的关键技术及应用实例[J]. 电力建设, 2012, 33(10): 29-33.
- [4] 孙 强,葛旭波,刘 林,等. 国内外智能电网评价体系对比分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 105-110.
- [5] 曹 楠,李 刚,王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 05(39): 63-67.
- [6] 吴 威,宋亮亮. 江苏电网 500 kV 智能变电站建设技术综述[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(6): 51-54.
- [7] 史京楠,胡君慧,黄宝莹,等. 新一代智能变电站平面布置优化设计[J]. 电力建设, 2014, 35(4): 31-37.
- [8] 彭 鹄,田娟娟,陈 燕,等. 重庆大石 220 kV 新一代智能变电站优化设计[J]. 电力建设, 2012, 34(7): 30-36.
- [9] 郭日彩,许子智,徐鑫乾. 220 kV 和 110 kV 变电站典型设计研究与应用[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 23-55.
- [10] 徐小宁. 变电站主接线方式可靠性评估与方案优选[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 441-446.

作者简介:

王椿丰(1986),男,辽宁营口人,工程师,从事变电站电气设计工作;

熊 静(1979),男,江苏靖江人,高级工程师,从事变电站电气设计工作;

卫银忠(1969),男,宁夏银川人,高级工程师,从事变电站电气设计工作;

陈 斌(1986),男,湖北黄冈人,工程师,从事变电站电气设计工作。

Main Electrical Connection Optimization of Smart Substation Based on GIS Equipment

WANG Chunfeng, XIONG Jing, WEI Yinzhong, CHEN Bin

(Jiangsu Power Design Institute Co. Ltd., of China Energy Engineering Group, Nanjing 211102, China)

Abstract: According to the "highly integrated system, reasonable structure and layout, advanced and applicable equipment, economical, energy saving and environmental protection, support of integrated control" guiding ideology of the new generation of smart substation, and combing the characteristics of a new 220 kV generation of smart substation in Jiangsu province, this paper studies the main electrical connection mode in substations. The optimal design scheme of main electrical connection based on Gas Insulated Switchgears (GIS) equipment is proposed, and technical and economic comparisons to conventional electrical connection are made, which provides some referential significances in the construction of smart substation in future.

Key words: smart substation; gas Insulated Switchgears (GIS); main electrical connection; optimal design; reliability analysis

(上接第 10 页)

马 勇(1986),男,湖北襄阳人,工程师,从事高电压技术研究工作;

周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事电力系统过电压

和输电线路运行及维护等方面研究工作;

陶风波(1982),男,江苏常州人,高级工程师,从事电力系统过电压及脉冲功率研究工作。

Simulation and Analysis on Full-voltage Starting Faults in ± 800 kV Jinping-Suzhou UHVDC Project

XU Qiang¹, XIE Tianxi², WU Jun², MA Yong², ZHOU Zhicheng², TAO Fengbo²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2.State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: A full-voltage starting fault in the UHVDC system may cause very high over-voltage on transmission line and other equipment. The over-voltage threatens the safe operation of DC power equipment and system. In this paper, the overvoltage simulation model of ± 800 kV Jinping-Suzhou HVDC project is constructed in PSCAD/EMTDC. The over-voltage and over-current caused by full-voltage starting faults under three operation modes in this project are computed. The amplitudes and waves of over-voltage are analyzed and the insulation margins of the equipment are checked. The results show that the highest amplitude of the over-voltage is 1 398.5 kV when full-voltage starting fault occurred in the current arrester configuration in ± 800 kV Jinping-Suzhou HVDC project, which meets the requirements of insulation coordination. This study provides a reference for the design, operation and maintenance of UHVDC projects.

Key words: full-voltage starting; over-voltage; UHVDC; PSCAD/EMTDC