

# 锦屏—苏南特高压直流输电工程 直流线路电磁暂态仿真

朱艺颖, 芮虎, 李新年, 蒋卫平  
(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Simulation on Electromagnetic Transient Process in DC Transmission Line of ±800 kV Power Transmission Project From Jinping to South Jiangsu

ZHU Yi-ying, GUO Hu, LI Xin-nian, JIANG Wei-ping

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** The steady state operation voltage and the double 12-pulse structure per pole in ±800kV DC power transmission project from Jinping to South Jiangsu are same as those in ±800kV DC power transmission project from Xiangjiaba to Nanhui, however the transmission capacity, transmission distance and conductor type of the former are different from the latter. Based on the parameters of main circuit of ±800 kV DC power transmission project from Jinping to South Jiangsu, by use of electromagnetic transient analysis software EMTP-RV the electromagnetic transient processes of internal overvoltage and earth short circuit currents along the transmission line under two types of bundled conductor spacing, namely 45cm and 50cm, are simulated respectively, and the maximum overvoltage level of HVDC transmission line under these two spacings is obtained. According a lot of simulation results, the envelope of overvoltage level along the HVDC transmission line and the envelop of earth short circuit currents at different points along the HVDC transmission line are given. Results of this research issue offer technical basis for the design and construction for ±800kV DC power transmission project from Jinping to South Jiangsu.

**KEY WORDS:** UHVDC transmission line; electromagnetic transient; internal overvoltage; short circuit current

**摘要:** 锦屏—苏南±800 kV 直流输电工程的稳态运行电压和每极双 12 脉动结构与向家坝—南汇±800kV 直流输电工程相同, 但输送容量、输送距离和导线型号与向家坝—南汇±800 kV 直流输电工程不同。针对锦屏—苏南±800 kV 直流输电工程的主回路参数, 利用电磁暂态计算软件 EMTP-RV, 分别针对 2 种导线分裂间距对线路内部过电压和沿线接地短路电流进行了电磁暂态仿真计算, 给出了 2 种导线分裂间距下直流线路的最大过电压水平, 并根据大量仿真计算结果给出了直流线路沿线过电压水平包络线以及沿线各点对地

短路电流包络线。该研究结果为锦屏—苏南特高压直流工程的设计和建设提供了技术依据。

**关键词:** 特高压直流输电线路; 电磁暂态; 内部过电压; 短路电流

## 0 引言

锦屏—苏南±800 kV 直流输电工程是国家电网公司继向家坝—南汇±800 kV 直流输电工程后建设的第二个特高压直流输电工程<sup>[1]</sup>。为了能充分发挥特高压直流输电工程长距离、大容量输电的优势, 经过全面的研究和论证, 国家电网公司决定将锦屏—苏南特高压直流输电工程的双极额定输送容量由原计划的 6400 MW 增加到 7200 MW, 额定直流电流由原计划的 4000 A 调整到 4500 A, 额定运行直流电压保持±800 kV 不变, 每极仍采用 2 个 12 脉动换流器串联。所选取的导线由原计划的 6×LGJ-720/50 改为 6×LGJ-900/40<sup>[2-3]</sup>。

受国家电网公司委托, 中国电力科学研究院于 2005 年曾经对±800 kV 直流输电工程过电压及绝缘配合进行了研究, 研究成果已经应用到了±800 kV 向家坝—南汇直流输电工程设计当中<sup>[4]</sup>。考虑到锦屏—苏南特高压直流输电工程的额定输送容量、输送距离及杆塔参数均与向家坝—南汇直流输电工程不同, 因此有必要对锦屏—苏南直流输电工程的直流线路进行电磁暂态仿真研究。

高压直流输电的一个显著特点就是可以通过快速调节两端换流器的触发角, 控制直流系统的电压和电流, 并将故障对设备的影响降到最低, 因此可以得出直流输电系统的性能极大地依赖于它的

控制系统<sup>[5-7]</sup>的结论。由于直流输电控制保护在故障或操作发生后几毫秒内即能动作，在对直流系统进行内部过电压研究时，应当考虑控制保护的動作特性<sup>[8-10]</sup>。在进行直流线路对地故障的仿真研究中发现，整流侧移相过程对仿真计算结果的影响很大<sup>[4]</sup>，因此本文参考常规直流输电工程的整流侧移相过程和故障波形<sup>[11-12]</sup>，在2种导线分裂间距下对线路内部过电压和沿线接地短路电流两部分分别针对2种导线分裂间距进行电磁暂态仿真研究，仿真计算模型中采用的参数是锦屏—苏南特高压直流输电工程的具体参数。仿真计算工具采用电磁暂态计算软件EMTP-RV。

## 1 各种故障下直流线路的内部过电压

### 1.1 概述

在特高压直流系统双极平衡和单极金属回线2种运行方式下，本节对可能引起直流线路出现过电压的故障进行仿真计算，并对仿真结果进行统计和分析。当直流线路导线分裂间距分别为50 cm和45 cm时，仿真研究各种故障下的直流线路内部过电压，并在额定运行方式和0.1 pu运行方式下比较各种故障情况下的仿真结果。

### 1.2 双极平衡运行方式下的直流线路过电压

直流系统双极平衡运行方式下，当发生以下故障时，可能会在直流线路整流侧、逆变侧和线路中点出现过电压：1) 线路中点发生对地短路故障；2) 逆变侧不投旁通对紧急停运；3) 直流系统先闭锁再跳最后一个断路器；4) 最后一个断路器跳开10 ms后直流系统再闭锁。

对于以上故障，分别在输送额定运行功率和0.1 pu运行功率下对直流线路进行仿真研究，借鉴交流线路杆塔工频接地电阻值，即当大地电阻率不大于 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 时，接地电阻不宜超过 $10 \Omega$ ，因此本文认为杆塔接地电阻为 $10 \Omega$ 。另外经调研得知，目前投运的 $\pm 500 \text{ kV}$ 直流输电线路杆塔的接地电阻也

在 $5 \sim 15 \Omega$ 范围内。

表1为双极平衡运行方式下的直流线路过电压的仿真计算结果，其中括号外的值是在分裂间距为50 cm时计算得出的，括号内的值是在分裂间距为45 cm时计算得出的，对于线路中点故障，斜线左边为故障极数值，斜线右边为非故障极数值。

表1 双极平衡运行方式下直流线路过电压的仿真计算结果  
Tab. 1 The simulation results of the DC line overvoltage on bipole balance operation mode

| 故障类型                         | 整流侧电压/kV     | 线路中点电压/kV    | 逆变侧电压/kV     |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 额定功率下线路中点                    | 836/1 012    | 776/1 286    | 752/894      |
| 对地短路故障                       | (845/1 012)  | (776/1 290)  | (752/894)    |
| 0.1 pu 功率下线路中点               | 902/1 061    | 800/1 308    | 799/1 085    |
| 对地短路故障                       | (910/1 063)  | (799/1 308)  | (799/1 090)  |
| 额定功率下逆变侧紧急停运                 | 1 276(1 274) | 1 454(1 422) | 1 383(1 377) |
| 0.1 pu 功率下逆变侧紧急停运            | 1 174/1 264  | 1 111/1 295  | 1 285/1 339  |
| 额定功率下先闭锁再跳最后一个断路器            | 867(896)     | 837(844)     | 796(816)     |
| 额定功率下先闭锁再跳最后一个断路器            | 805          | 803          | 800          |
| 额定功率下最后一个断路器跳开10 ms后再闭锁      | 1 225(1 221) | 1 242(1 244) | 1 223(1 223) |
| 0.1 pu 功率下最后一个断路器跳开10 ms后再闭锁 | 893          | 864          | 863          |

从表1可以看出，在双极平衡运行方式下，对分裂间距为50 cm的直流线路过电压进行仿真计算的结果表明，靠近整流侧的直流线路最大暂态电压、靠近直流线路中点的最大暂态电压和靠近逆变侧的直流线路最大暂态电压均出现在额定功率逆变侧不投旁通对紧急停运中，分别为1 276 kV、1 454 kV和1 383 kV。

对分裂间距为45 cm的直流线路过电压进行仿真计算的结果表明，靠近整流侧直流线路最大暂态电压、靠近直流线路中点最大暂态电压和靠近逆变侧直流线路最大暂态电压均出现在额定功率逆变侧不投旁通对紧急停运中，分别为1 274 kV、1 422 kV和1 377 kV。

图1为直流导线分裂间距为50 cm时，双极额定功率运行直流线路中点发生接地故障时的波形。

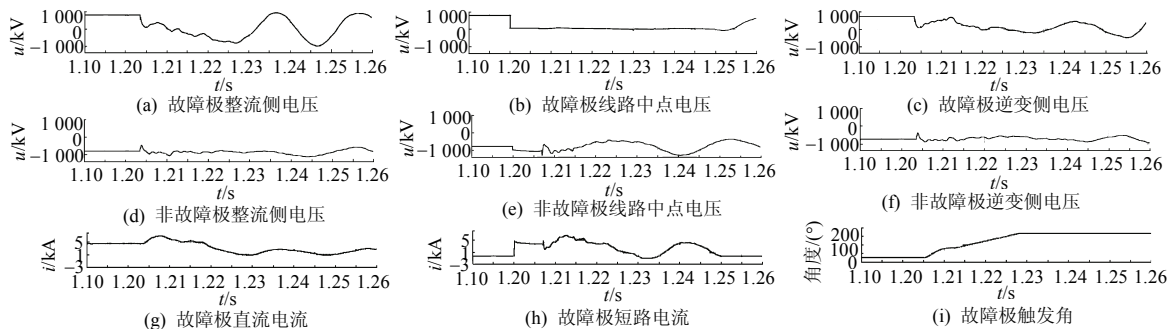


图1 双极额定功率运行直流线路中点发生接地故障时的波形

Fig. 1 The wave when the staged DC line to ground fault happened on bipole balance operation mode with rated power

### 1.3 单极金属回线额定功率运行方式下的直流线路过电压

直流系统单极金属回线运行方式下,当发生以下故障时,直流线路整流侧、逆变侧和线路中点会出现过电压。本节对以下几种故障进行了仿真计算:1)逆变侧直流线路出口发生对地短路故障;2)逆变侧直流线路中点发生对地短路故障。

计算中考虑线路输送额定功率的情况,杆塔接地电阻按照 $10\Omega$ 来考虑。

表2为单极金属运行方式下直流线路过电压的仿真计算结果,其中括号外的值是在分裂间距为 $50\text{cm}$ 时计算得出的,括号内的值是在分裂间距为 $45\text{cm}$ 时计算得出的。从表2可以看出,直流线路各点未出现过电压。

表2 单极金属回线运行方式下的直流线路过电压仿真计算结果

Tab. 2 The simulation results of DC line overvoltage on monopole metallic return mode

| 故障类型          | 整流侧电压/kV | 线路中点电压/kV | 逆变侧电压/kV |
|---------------|----------|-----------|----------|
| 逆变侧直流线路出口对地短路 | 751(751) | 724(724)  | 700(699) |
| 线路中点对地短路      | 751(751) | 723(723)  | 700(700) |

以上计算结果表明,直流线路沿线最大暂态过电压出现在逆变侧不投旁通对紧急停运时靠近直流线路中点处,当导线分裂间距为 $50\text{cm}$ 时,线路中点电压为 $1454\text{ kV}$ ,当导线分裂间距为 $45\text{cm}$ 时,线路中点电压为 $1422\text{ kV}$ 。如不考虑该种故障形式,则直流线路沿线最大暂态过电压出现在 $0.1\text{ pu}$ 功率下,线路中点故障且导线分裂间距为 $50\text{cm}$ 时,非故障极线路中点为 $1308\text{ kV}$ ,线路中点故障且导线分裂间距为 $45\text{cm}$ 时,非故障极线路中点电压为 $1308\text{ kV}$ 。

根据锦屏—苏南直流输电工程的初步设计方案,受端交流出线有4条,而额定双极输送容量为 $7200\text{ MW}$ 又比较大,因此在额定运行情况下不可能出现只有一回出线运行的情况,从而不可能出现最后一个断路器跳闸的情况。另外本文对输送 $0.1\text{ pu}$ 负荷的情况下最后一个断路器跳闸的情况进行了仿真计算,直流线路上未出现过电压。鉴于以上原因,从限制系统内部过电压的角度来说,可以不考虑最后一个断路器跳闸的情况。

## 2 直流线路沿线过电压的分布情况

本文通过模拟直流工程双极额定运行方式下线路沿线各点的接地故障,对直流线路沿线各点最

大过电压进行了仿真研究,研究中导线分裂间距选用 $50\text{cm}$ ,杆塔接地电阻选用 $10\Omega$ 。

本文将直流线路分为30段,靠近线路中部分段较多,最小段距离为 $10\text{ km}$ ,靠近线路两端分段较少,最大段距离为 $100\text{ km}$ 。从整流侧出口沿直流线路每段间均进行线路接地故障仿真计算(共31处),记录故障期间故障极和非故障极直流线路暂态过电压最大值及最大值所在位置,详细研究直流线路沿线过电压的分布情况。图2给出了直流线路沿线过电压水平的包络线。

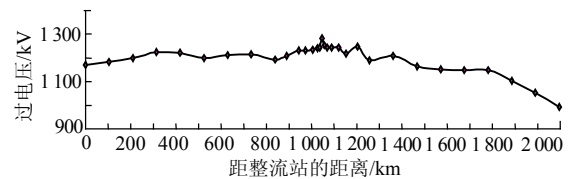


图2 直流线路不同位置接地故障时直流线路过电压沿线分布包络线

Fig. 2 The connection line of the maximum voltage at different point of DC line when the staged DC line to ground fault happened at different point of the line

研究表明,直流线路上中点对地故障引起的折反射电磁波在线路中点的叠加使直流线路中点发生接地故障时,非故障极线路中点过电压水平最高<sup>[13-14]</sup>,其值为 $1283\text{ kV}$ ,即 $1.57\text{ pu}$ ,距离线路中点 $2\text{ km}$ 外,过电压水平降为 $1242\text{ kV}$ ,即 $1.52\text{ pu}$ ,距离中点 $100\text{ km}$ 外,过电压水平降到 $1230\text{ kV}$ 以下,即 $1.5\text{ pu}$ 。

## 3 直流线路沿线发生对地故障时的短路电流

本文针对直流工程双极额定运行方式下线路沿线各点发生接地故障时的短路电流进行了仿真研究,研究中导线分裂间距选用 $50\text{cm}$ ,杆塔接地电阻选用 $10\Omega$ 。

与进行直流线路沿线过电压的研究结果相同,将直流线路分为30段,靠近线路中部分段较多,最小段距离为 $10\text{ km}$ ,靠近线路两端分段较少,最大段距离为 $100\text{ km}$ ,共在31处进行对地故障的模拟。

考虑到双极平衡运行与单极大地回线运行方式下的短路电流基本相同,而单极金属回线方式下短路电流比双极平衡运行时略低,本节选择在双极平衡运行方式下对直流线路沿线对地故障短路电流进行研究。研究表明,整流侧出口发生线路接地故障时,因短路电流不流经直流线路直接入地,短路电流最大,其值为 $9.16\text{ kA}$ 。除整流侧出口外,线路其它各点发生故障时,短路电流最大值为

8.02 kA, 最小值为 5.16 kA。除直流线路整流侧出口对地故障外, 其它线路各点短路电流变化的总体趋势是随故障点距离逆变侧距离的缩短, 短路电流幅值略有上升, 这主要是因为直流线路电容上积蓄的电荷向短路点放电。图 3 为直流线路不同位置接地故障时短路电流的包络线。

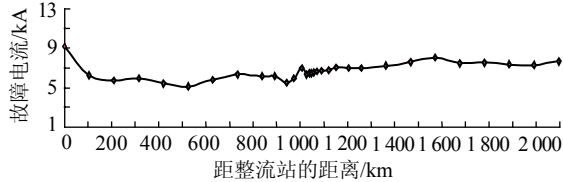


图 3 直流线路不同位置接地故障时短路电流的包络线

Fig. 3 The connection line of the short circuit current when the staged DC line to ground fault happened at different point of the line

## 4 结论

1) 将锦屏—苏南特高压直流输电线路电磁暂态研究结果与向家坝—南汇特高压直流输电线路电磁暂态研究结果进行比较发现, 直流线路的过电压水平与线路长度、导线型号和杆塔参数、杆塔接地电阻、输送容量、平波电抗器、直流滤波器参数等因素相关, 因此必须基于具体工程参数进行相应的电磁暂态研究。

2) 由于高压直流输电系统控制保护动作时序对内部过电压的影响较大, 在研究高压直流输电系统的内过电压时, 应尽可能地模拟实际直流输电系统控制保护的動作时序, 以确保仿真结果更加接近实际系统<sup>[15-16]</sup>。

3) 本文研究结果已被直接应用到实际工程设计和建设当中, 为特高压直流工程的建设和运行提供了必不可少的技术依据。

## 参考文献

- [1] 中国电力工程顾问集团公司. 锦屏一、二级送电华东±800kV 直流输电工程可行性研究报告[R]. 北京: 中国电力工程顾问集团公司, 2005.
- [2] 中国电力工程顾问集团公司. 锦屏至苏南±800kV 特高压直流工程换流站和接地极初步设计评审会议纪要[R]. 北京: 中国电力工程顾问集团公司, 2008.
- [3] 国家电网公司. 锦屏—苏南特高压直流输电工程功能规范书审查会会议纪要[R]. 北京: 国家电网公司, 2008.
- [4] 中国电力科学研究院. ±800kV 级直流工程过电压及绝缘配合的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [5] 郭贤珊, 马为民. 向家坝—上海±800 kV 特高压直流示范工程直流低频谐振的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 1-4.  
Guo Xianshan, Ma Weimin. Study on DC resonance for Xiangjiaba—Shanghai ±800 kV UHVDC project[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 1-4(in Chinese).
- [6] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 214-228.
- [7] 马为民, 聂定珍, 曹燕明. 向家坝—上海±800 kV 特高压直流工程中的关键技术方案[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 1-5.  
Ma Weimin, Nie Dingzhen, Cao Yanming. Key technical schemes for ±800 kV UHVDC project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 1-5(in Chinese).
- [8] 朱艺颖, 蒋卫平, 吴娅妮. 特高压直流输电控制保护特性对内过电压的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 6-9.  
Zhu Yiyang, Jiang Weiping, Wu Yanni. Influence of UHVDC control and protection characteristics on inner overvoltage[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 6-9(in Chinese).
- [9] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 86-93.
- [10] 石岩, 韩伟, 张民, 等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 10-16.  
Shi Yan, Han Wei, Zhang Min, et al. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 10-16(in Chinese).
- [11] 中国电力科学研究院. 贵州—广东±500kV 直流输电工程内过电压研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.
- [12] 中国电力科学研究院. 三广直流输电工程系统调试技术报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
- [13] 张纬钺. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 24-46.
- [14] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 405-412.
- [15] 石岩, 张民, 赵大平. 特高压直流工程二次系统成套设计方案及其特点[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 1-5.  
Shi Yan, Zhang Min, Zhao Daping. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 1-5(in Chinese).
- [16] 吴韦韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 128-137.



朱艺颖

收稿日期: 2008-07-21。

作者简介:

朱艺颖(1974—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与仿真、直流输电和电磁暂态分析, E-mail: wzhyyf@epri.ac.cn;

冯虎(1983—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为直流输电和电磁暂态分析;

李新年(1977—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为直流输电和电磁暂态分析;

蒋卫平(1953—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与仿真、直流输电和电磁暂态分析。

(责任编辑 杜宁)