

HVDC 中直流线路的互感机理及其对控制系统影响的研究

王亚涛, 吴彦维, 李俊霞, 李乾, 曹森

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对特高压直流输电工程中两极直流线路间的影响, 应用线路间互感原理, 对高压直流输电线路电磁耦合机理和扰动特征进行了深入的研究。从理论上计算了宾金直流输电工程两直流线路间存在较大的电磁耦合分量。通过 RTDS 建立的仿真模型, 研究了一极线路故障时去游离时间长短、两极线路间距大小和一极电流升降速率大小对另一运行极控制系统的影响, 结合现场实际线路故障的波形对宾金直流控制策略提出了优化方案。通过 RTDS 仿真验证了优化后的控制策略能在一极发生线路故障时对非故障极的影响降低到最小, 有效地防止了双极闭锁, 对于电网的可靠安全运行具有重大意义。

关键词: 高压直流输电; 直流闭锁; 控制策略; 直流线路故障; 电磁耦合; RTDS 仿真

Mechanism of DC transmission line's mutual inductance in HVDC and its effect on the control system

WANG Yatao, WU Yanwei, LI Junxia, LI Qian, CAO Sen

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: In view of the influence of DC circuit of HVDC transmission between two poles, the principle of mutual inductance between the lines is applied, the electromagnetic coupling mechanism of high voltage DC transmission line and disturbance characteristics are studied, the electromagnetic coupling component of two DC line Binjin HVDC is calculated. The simulation model is established by RTDS, the time of dissociation in line failure, the distance between lines and the current fluctuation rate, which has an effect on control system is studied. Combined with the actual line fault waveform, optimization solution of Binjin DC is proposed. The optimized control strategy can reduce the effects of the non-fault pole to the minimum when restarting, which is verified by the RTDS simulation. The bipolar blocking is prevented effectively, which is of great significance on the safety and reliability in the operation of the power grid.

Key words: HVDC; DC block; control strategy; DCLF; electromagnetic coupling; RTDS

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)12-0028-06

0 引言

溪洛渡左岸-浙江金华±800 kV 特高压直流输电工程(以下简称宾金直流)西起四川省宜宾市宜宾换流站, 东至浙江省金华市金华换流站, 直流线路长度约 1 670 km, 额定电压±800 kV, 直流额定电流 5 000 A, 直流输电容量 8000 MW, 是现今世界上额定输送功率最大的直流工程, 该工程于 2014 年 7 月双极四阀组全部正式投入运行, 自投运以来长时间额定功率运行, 运行状况良好, 该工程的控制保护系统采用许继电气公司基于其完全自主化的新一代 DPS-3000 直流控制保护技术平台, 也是该平台第一次在特高压直流输电工程中得到应用^[1-2]。

在对 7 月 31 日宾金直流的非故障极一次线路保护动作的原因进行分析研究时, 发现了一极重启时因极间线路电磁耦合, 对非故障极存在较大的影响, 造成了输送功率的波动, 对电网的安全运行存在隐患, 最后本文提出了相关控制策略的优化方案, 并进行了详细的 RTDS 仿真试验, 优化后的直流控制系统能将一极重启对另一极的影响较低到最小, 对该直流工程的安全可靠运行具有重大的意义, 现该方案在宾金直流上已经得到实施。

1 极 1 线路故障重启时对极 2 的影响

2014 年 7 月 31 日 17 点 34 分, 宾金直流工程双极运行, 极 1 双阀组额定运行, 极 2 单阀组额定

运行, 极 1 因雷击发生直流线路故障, 宜宾站极 1 极保护行波保护和电压突变量保护动作, 金华站极 2 电压突变量保护动作, 极 1 直流线路重启动, 经过两次重启之后, 极 1 恢复功率传输。极 1 线路保护动作的同时, 因极 2 的三套极保护电压突变量保护均动作^[3], 极保护发出直流线路重启动请求, 此时由于极 1 正在重启动过程中, 根据重启策略, 极 2 在 5 s 内不允许执行直流线路故障重启动命令, 直接发出闭锁命令, 极 2 闭锁。

故障发生后, 通过 RTDS 对宾金直流进行试验仿真研究, 发现极 1 线路再启动过程中, 极 2 线路出现直流电流波动情况。图 1 和图 2 为宾金直流极 1 双阀组, 极 2 单阀组双极功率模式 6 000 MW 运行, 在极 1 线路(800 kV)中点模拟线路故障时的仿真波形。极 1 再启动过程中, 极 2 电流出现很大扰动, 电流从稳定运行的 5000 A 最小值跌落到 891 A, 功率范围 2 471~134 MW。

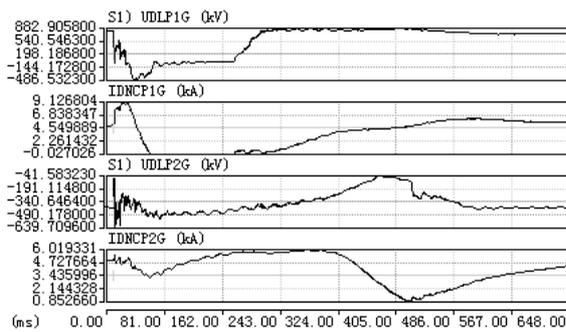


图 1 宜宾站极 1 线路故障重启时极 1 和极 2 电压电流波形
Fig. 1 DC voltage and current of pole 1 and 2 when pole 1 restarts

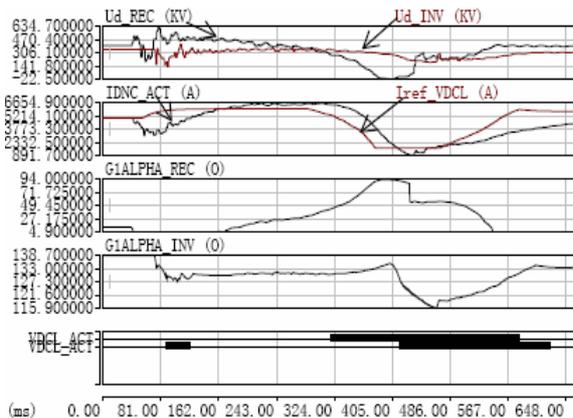


图 2 宜宾站极 1 线路故障重启时极 2 电压电流受扰动波形
Fig. 2 DC voltage and current of pole 2 when pole 1 restarts

通过图 2 波形分析, 极 1 发生线路故障后, 由于两极都处在双极功率控制模式, 极 1 将损失的功

率通过 PPT(极间功率转移)功能转移给极 2, 极 2 直流电流指令增加, 实际直流电流也增加。但是极 1 重启过程中, 极 2 电流最大至 6 654 A, 大于电流参考值 6 000 A(3 s 过负荷定值为 1.2 p.u.), 为了降低电流, 整流侧增大触发角, 造成整流侧直流电压降低, 当整流侧直流电压低至 0.75 p.u.时, 整流侧 VDCL 动作将电流参考值降至 1 823 A, 从而造成电流下降。在此过程中, 逆变侧角度和分接头保持不变。

上述直流控制过程存在以下问题:

1) 在图 2 中, 在极 2 直流电流到达最高值时整流侧试图增大触发角降低直流电流, 理论上在逆变站触发角和分接头较稳定的情况下, 随着整流站触发角的增加直流电流应该下降, 但是在触发角增大过程中, 直流电流一直维持一段时间不变化, 从而导致触发角持续增加、直流电压持续下降, 直至 VDCL 动作。

2) 正常运行时极 2 逆变侧电压大于整流侧电压, 因换流阀的单向导通特性, 电流方向始终为逆变侧流向整流侧, 在图 2 中出现当 PT(电压互感器)测到的逆变侧侧和整流侧电压差逐渐变小时, 甚至出现逆变侧电压小于整流侧电压的情况, 理论上直流电流应该变小, 但是实际电流大小未发生改变, 与欧姆定律相违背。

针对以上问题, 利用 RTDS 对宾金直流进行仿真, 发现将极 1 的线路故障重启去游离时间由定值 150 ms 改为 200 ms 或 300 ms 等, 极 1 重启时对极 2 扰动大小未改善, 极 2 受扰动时刻与极 1 重启时建立直流电流的时刻吻合, 但是通过修改仿真模型将极 1 与极 2 线路间距由实际的 10 m 变大或在控制系统中修改 PI 控制器参数将极 1 重启时的电流升降速率变慢均发现极 1 重启时对极 2 扰动明显改善, 所以分析认为该过程与线路互感有关。

2 极间线路互感作用的电路分析

目前国内外有关邻近架设线路间电磁耦合问题的文献中, 一般采用理论计算和数值仿真方法^[4-5], 架空线路具有 4 个原参数(电阻、电感、导纳、电容 (r 、 L 、 g 、 c)), 由于通常线路绝缘良好, 泄漏电流很小, 可以将它忽略, 故认为 $g=0$; 为了简化分析, 忽略对地电容, 即认为 $c=0$ 。如系统双极运行时, 当极 1 发生直流线路接地故障, 故障清除后系统重起过程中的等效电路可用图 3 来表示(只研究分布参数的线路部分)^[6-10]。

根据互感耦合电路的基本理论可得整流站与逆变站之间的线路压降^[11-14]可用式(1)表示。

$$\Delta U = i_{d2} \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{di_{d2}}{dt} - M_{12} \cdot \frac{di_{d1}}{dt} \quad (1)$$

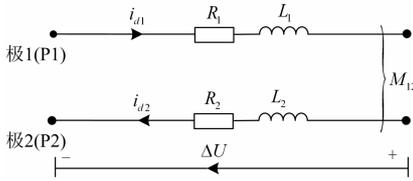


图3 暂态过程中线路耦合等效图

Fig. 3 HVDC transmission line boundary

由于极线中电流方向相反, 呈现出强烈的去磁作用, 故 M_{12} 前面为“-”号。对 ΔU 进行定量分析能很好地解释短路过程中的暂态过程, 下面以宾金直流工程的实际参数^[1]为例, 进行具体分析。

宾金直流工程线路的实际参数如表 1 所示。

表 1 直流输电线路参数

Table 1 Test results of non-unit transient-based protection for HVDC transmission line

参数	直流极线	接地极线	
		整流站	逆变站
分裂线子导线数	6	2	2
分裂线子导线半径/cm	1.995	1.5	1.5
分裂线子导线间距/cm	45.0	50.0	40.0
极间导线水平方向距离/cm	20.0	6.6	6.0
塔高/m	42.0	22.0	24.0
线路长度/km	1679.9	103.0	23.6

一千多公里长的导线可看作是无限长导线, 根据电磁场的基本理论可知^[15-16], 线路的单位长度自感为

$$L'_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2l}{D_{sb}} - 1 \right) \quad (2)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m); l 为线路长度; D_{sb} 为导线的自几何均距; 六分裂导线的等效直径为

$$D_{sb} = \sqrt[6]{D_s dd (\sqrt{3}d)^2 (2d)} \quad (3)$$

正负极导线的互几何均距即导线轴线的间距为 D_{eq} , 对于钢芯绞线 $D_s = 0.779r$, r 是导线半径。

把宾金直流工程线路具体参数代入上述求单位长度自感:

$$L'_2 \approx 32 \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (4)$$

特高压直流架空线路长度远远大于导线半径, 且线路长度远远大于导线间距, 而导线间距又远远大于导线半径, 假设大地土壤具有良好电导率, 可以用 C.R. Paul 的解析公式来估算极导线之间的互

电感。

$$M = \frac{\mu}{4\pi} \ln \left(1 + \frac{4h^2}{s^2} \right) \quad (5)$$

式中: μ 为空气的磁导率; h 为极导线平均假设高度; s 为极导线之间的距离。估算得到宾金特高压直流架空线路的互电感为 0.94 mH/km。

为了简单起见, 整个线路的自感与互感可用单位量与线路长度相乘(精确计算公式请参考相关书籍中关于分布参数的计算公式)^[17-18], 尽管作此简化, 但不会影响对结果的定性分析。由此可得:

$$L_2 = L'_2 \cdot 1680 \cdot 1000 \approx 5.4 \text{ H} \quad (6)$$

$$M_{12} = M \cdot 1680 \approx 1.6 \text{ H} \quad (7)$$

又因为直流线路电阻约为 9Ω , 故可得:

$$\Delta U = i_{d2} \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{di_{d2}}{dt} - M_{12} \cdot \frac{di_{d1}}{dt} = \quad (8)$$

$$9i_{d2} + 5.4 \frac{di_{d2}}{dt} - 1.6 \frac{di_{d1}}{dt}$$

1) 正常情况下, 如果忽略线路电流中的谐波分量, 即有:

$$\frac{di_{d2}}{dt} \approx \frac{di_{d1}}{dt} \approx 0, \text{ 故 } \Delta U = i_{d2} \cdot R_2 \quad (9)$$

式(9)正是直流稳态运行时, 线路压降的公式。

2) 暂态情况下, 如果是极 1 线路重起, 极 1 系统电流迅速增加, 即 di_{d1}/dt 较大(最大 100 ms 电流升高 5 000 A, di_{d1}/dt 此时约为 50 000), 极 2 系统电流变化不大, 可认为 $di_{d2}/dt \approx 0$, 此时有: $\Delta U = 45 - 1.6 \cdot 50 = -35 \text{ kV}$ 。也即暂态过程中, 因 PT 的检测位置原因无法检测到互感产生的电压, 录波图上可能存在电流由电压较低的一端流向电压较高的一端的情形。

3) 如果暂态过程当中 ΔU 值较大, 可能存在整流侧电流控制器失控的情形, 这里仍以极 2 为例来简单说明:

$$\Delta U = U_{inv} - U_{rect} \quad (10)$$

故障过程中若认为逆变侧系统参数不变, 则有 U_{inv} 不变, 整流侧电流控制器要直接起作用, 宏观来看 ΔU 必须先要大于 0, 增大 ΔU 的办法只能是降低整流侧的电压(因极 2 电压为负值), 此时触发角会往大角度方向移, 但不管怎么移, 由于交流系统电压和触发角的范围限制, 整流侧电压降低有限, 若不足以使 ΔU 正, 则此暂态过程中, 电流控制器是失效的, 直至 di_{d1}/dt 引起的互感电压跌落消失。

为进一步验证互感电压的影响, 在 RTDS 模型中将两极间导线水平方向距离由 20 m 改为 1 000 m, 发现极 1 重启时对极 2 影响变小。

从图 4 中可以看出在极 1 重启的过程中极 2 的电流由最初稳定运行的 5 000 A 最小跌落到 3 255 A 相对于现场跌落到的 891 A 有较大的改善。

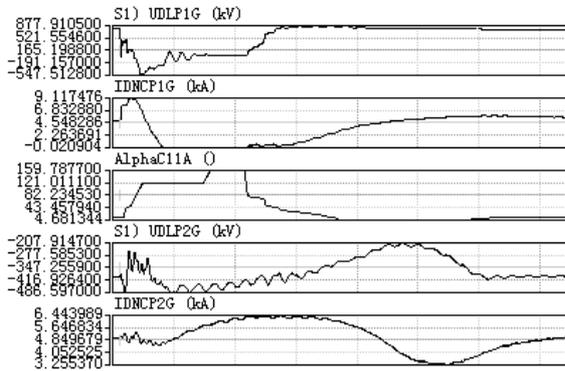


图 4 两极间导线水平距离 1 km 的极 1 重启波形
Fig. 4 DC voltage and current of pole 1 and pole 2 when the horizontal distance is 1km between two poles wire

在极 1 的极控制程序中将电流 PI 控制器中的比例系数 K_P 由 0.8 改为 0.08, 降低极 1 重启时的电流升降速率即 di_{d1}/dt , 从图 5 可以看出修改 K_P 后极 1 重启时对极 2 影响变小。

从图 5 中可以看出修改后极 1 在重启时触发角移动较慢, 极 1 重启的过程中极 2 的电流由最初稳定运行的 5 000 A 最小跌落到 4 298 A 相对于现场跌落到的 891 A 有较大的改善。

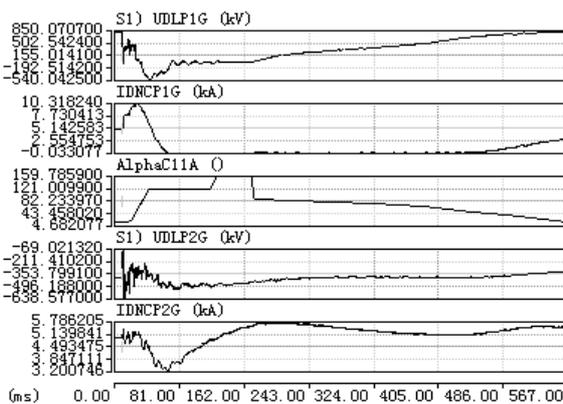


图 5 极 1 电流控制器 $K_P=0.08$ 的极 1 重启波形
Fig. 5 DC voltage and current of pole 1 and pole 2 when K_P is 0.08

通过以上两次试验可以证明极 1 重启时极 2 电流的扰动为两极线间的线路互感造成的。

3 控制策略优化

低压限流^[8]功能(VDCL): VDCL 的主要功能是在交直流系统故障时, 随着直流电压的降低, 控制系统减小直流电流; 故障恢复之后, 随着直流电压的升高, 极控系统逐渐的恢复直流电流。低压限流的静态特性^[5]如图 6 所示。

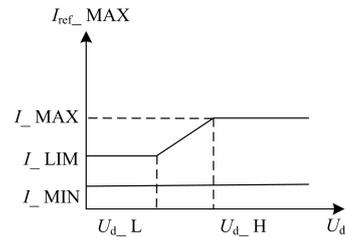


图 6 VDCL 功能原理图

Fig. 6 VDCL function schematic diagram

如果由于某种原因直流电压降至 U_{d_H} 以下, 电流指令的最大限幅值开始下降。

VDCL 主要作用有:

- 1) 防止在交流系统故障时或者故障后系统不稳定。
- 2) 在交流系统或者直流系统故障清除后快速控制整个系统恢复功率传输。
- 3) 减小由于持续换相失败^[6]对换流阀造成的过应力。
- 4) 在故障恢复之后抑制持续的换相失败。

根据图 1 波形分析发现极 1 重启过程中极 2 电流跌落的原因为极 1 重启过程中极 2 电流突然变大, 因极间直流输电线路电磁耦合的影响极 2 失控, 极 2 整流站触发角变大但是实际电流并未降低, 极 1 重启成功后极间直流输电线路电磁耦合作用消失, 整流站触发角的增大, 造成整流侧直流电压降低, 当整流侧直流电压低至 0.75 p.u. 时, 整流侧 VDCL 动作, 减低电流参考值, 极 2 恢复可控后电流参考值的降低造成后极 2 电流实际值的跌落。

现解决方案为当对极发生线路故障重启时闭锁本极 VDCL 功能 350 ms, 阻止电流参考值的降低, 通过 RTDS 仿真, 发现一极发生直流线路故障重启 1 次或 2 次时另一极电流和电压均未出现较大波动, 波形如图 7 和图 8 所示。

通过图 7 和图 8 可以发现当极 1 直流线路接地故障时间为 100 ms 时, 极 1 经过一次线路故障重启功能启动成功, 启动成功后直流电压和直流电流迅速恢复稳定, 在极 1 重启过程中极 2 电压变化较小电流从稳定运行的 5 000 A 最小跌落到 4 641 A。当

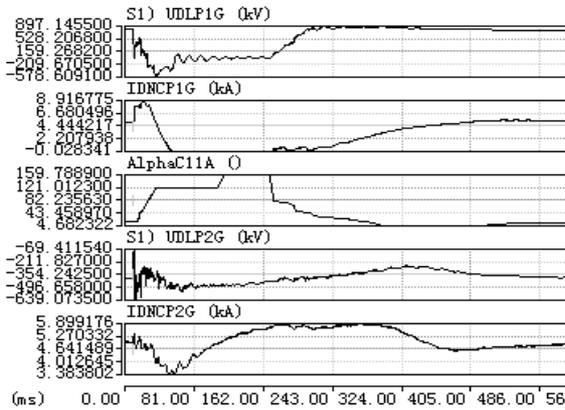


图 7 极 1 直流线路接地故障时间 100 ms 极 1 和极 2 直流电压、直流电流和触发角波形

Fig. 7 DC voltage, current and angle when the DCLF time is 100 ms

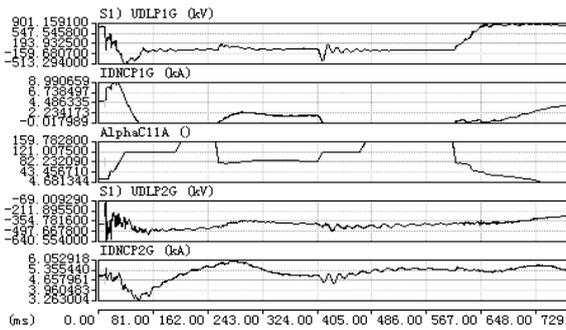


图 8 极 1 直流线路接地故障时间 350 ms 极 1 和极 2 直流电压、直流电流和触发角波形

Fig. 8 DC voltage, current and angle when the DCLF time is 350 ms

极 1 直流线路接地故障时间为 350 ms 时,极 1 经过二次线路故障重启功能启动成功,在极 1 重启过程中极 2 电电流从稳定运行的 5 000 A 最小跌落到 4 657 A,综上所述经过优化后的控制策略能在多种情况下将一极发生线路故障重启时对非故障极的影响降低到最低,对于电网的可靠安全运行具有重大意义。

4 总结

通过现场故障情况结合 RTDS 仿真分析,极 1 重启时的极间线路互感为极 2 产生扰动的因素,优化后的控制功能能够实现一极重启时对另一极电流扰动的最小化,但是极间的电磁互感影响较大的情况依然存在,针对本次故障情况建议后续工作如下:

1) 线路互感对直流保护的影响如电压突变量保护动作的正确性^[19-20]等需进一步研究,以保证直流保护动作无误。

2) 随着今后特高压直流工程的建设,新的电压和电流等级出现时均需要研究互感对直流控制保护的影响。

3) 后续特高压直流工程系统现场调试时建议增加该运行工况下的线路故障试验。

参考文献

- [1] 溪洛渡—浙西±800 kV 直流输电工程极控系统设计规范[S]. Xiluodu-Zhejiang line ±800 kV DC transmission project C/P design specification[S].
- [2] 溪洛渡—浙西±800 kV 直流输电工程主回路参数[S]. The main circuit parameters of Xiluodu-Zhejiang line ±800 kV DC transmission project[S].
- [3] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 一种新型三取二装置及配置策略在高岭背靠背扩建工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 121-126. WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. A new device with “selecting 2 from 3” logic and its configuration strategy applied in Gaoling Back-to-Back II Project[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 121-126.
- [4] 李涛, 李新年, 蒋卫平, 等. 交流线路对平行架设±500 kV 同塔双回直流的影响及措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 70-75. LI Tao, LI Xinnian, JIANG Weiping, et al. Influence of AC transmission lines on parallelly erected ±500 kV HVDC double circuit transmission lines and suppression measure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 70-75.
- [5] 黄爱华, 郑旭, 钱广忠. 同杆并架多回路技术的应用[J]. 华东电力, 2006, 34(8): 60-63. HUANG Aihua, ZHENG Xu, QIAN Guangzhong. Application of technology of constructing multiple circuits on the same tower[J]. East China Electric Power, 2006, 34(8): 60-63.
- [6] 朱韬析, 宁武军, 欧开健. 直流输电系统换相失败探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 116-120. ZHU Taoxi, NING Wujun, OU Kaijian. Discussion on commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 116-120.
- [7] 朱军, 熊万亮, 曹晓斌, 等. 共用走廊高压输电线路间耦合影响分析[J]. 华东电力, 2011, 39(12): 2021-2025. ZHU Jun, XIONG Wanliang, CAO Xiaobin, et al. Coupling effects among high voltage transmission lines in joint-use corridor[J]. East China Electric Power, 2011, 39(12): 2021-2025.

- [8] 张爱玲. 溪洛渡送电广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.
ZHANG Ailing. Study of control and protection strategies for Xiluodu-Guangdong double HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 72-76.
- [9] 杨勇, 陆家榆, 鞠勇. 交流线路与±800 kV 直流线路同走廊时的地面混合电场研究[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 54-59.
YANG Yong, LU Jiayu, JU Yong. Study on the hybrid electric field over the ground surface under AC lines and ±800 kV DC lines in the same corridor[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 54-59.
- [10] 舒印彪, 刘泽洪, 高理应, 等. ±800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
SHU Yinbiao, LIU Zehong, GAO Liying, et al. A preliminary exploration for design of ±800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.
- [11] 杨万开, 印永华, 曾南超, 等. 特高压直流输电工程系统调试研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 83-87.
YANG Wankai, YIN Yonghua, ZENG Nanchao, et al. Study on commissioning test program of UHVDC project system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(22): 83-87.
- [12] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [13] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [14] 王明新. 葛南高压直流输电系统控制和保护设备运行状况评估[J]. 电力设备, 2003, 4(3): 28-32.
WANG Mingxin. Investigation and evaluation of operation condition for control and protection equipments in Ge-nan HVDC transmission system[J]. Electrical Equipment, 2003, 4(3): 28-32.
- [15] 熊万亮. 超/特高压输电走廊雷电绕击特征及电磁耦合特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
XIONG Wanliang. Research on lightning shielding failure feature and electromagnetic coupling characteristics of EHV/UHV transmission corridor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [16] 郑楠, 郑彬, 等. 750 kV 强耦合并行单回架设线路感应电压和电流研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(8): 37-44.
ZHENG Nan, ZHENG Bin. Research on induced voltage and induced current of 750 kV strong coupling parallel single-circuit lines[J]. Power System and Clean Energy 2013, 29(8): 37-44.
- [17] 文艺, 李淳, 李建明. 一种特高压交流输电线路冲击电晕的改进模型[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 63-72.
WEN Yi, LI Chun, LI Jianming. Improved model of impulse corona on ultra high voltage alternating current transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 63-72.
- [18] 马悦, 张宇松, 曲广娟. 特高压直流对同塔交流线路的过电压影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(10): 6-14.
MA Yue, ZHANG Yusong, QU Guangjuan. Influence of UHV DC transmission line on overvoltage of AC transmission lines built on the same tower[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(10): 6-14.
- [19] 廖志超, 贺恒鑫, 韩云, 等. 同塔双回直流输电系统过电压特性研究[J]. 高压电器, 2013, 49(5): 60-73.
LIAO Zhichao, HE Hengxin, HAN Yun, et al. Research on overvoltage protection for ±500 kV double-circuit HVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 60-73.
- [20] 刘宇, 邵能灵, 范春菊, 等. 含串补电容的超高压输电线路暂态保护判据[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 1-6.
LIU Yu, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Transient relay protection criterion for ehv transmission line with SCC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(3): 1-6.

收稿日期: 2014-09-15; 修回日期: 2015-01-10

作者简介:

王亚涛(1981-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电直流控制系统研究工作; E-mail: wangyatao2002@163.com

吴彦维(1981-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电直流控制系统研究工作;

李俊霞(1972-), 女, 工程师, 从事继电保护研究科研管理工作。

(编辑 张爱琴)