

特高压直流输电线路间电磁耦合对电压突变量保护影响的研究

郭宏光¹, 吴庆范¹, 黄金海¹, 李少华¹, 卢亚军², 张爱玲¹, 李泰¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 100052)

摘要: 介绍了溪洛渡至浙江金华(简称宾金)特高压直流输电系统线路保护动作情况, 指出直流线路间电磁耦合产生的扰动导致了非故障极电压突变量保护动作。建立了特高压直流输电线路电磁耦合分析的电路模型, 推导出解析方程, 并对电磁耦合机理和扰动特征进行了深入的研究。经过 RTDS 仿真, 分析了区内、区外故障时的直流电压波形特征, 提出了电压突变量保护功能的优化策略。新的保护逻辑通过仿真试验, 验证了其可行性和可靠性。

关键词: 特高压直流; 电磁耦合; 电压突变量; 仿真试验; 策略

Study on the influence of electromagnetic coupling of UHVDC power transmission lines on the voltage derivative protection

GUO Hongguang¹, WU Qingfan¹, HUANG Jinhai¹, LI Shaohua¹, LU Yajun², ZHANG Ailing¹, LI Tai¹

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 100052, China)

Abstract: This paper introduces the line protection action of UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang Jinhua (abbr. Bin-Jin), and points out that the disturbance of DC lines electromagnetic coupling causes non-fault pole voltage derivative protection action. The circuit model for electromagnetic coupling analysis of UHVDC power transmission lines is explored. The analytic equation is deduced and the electromagnetic coupling mechanism and disturbance characteristics are studied in depth. The optimization strategy of voltage derivative protection function based on the RTDS simulation and the analysis of DC voltage waves characteristics in external and internal faults are proposed. The new protection logic verifies its feasibility and reliability through the simulation test.

Key words: UHVDC; electromagnetic coupling; voltage derivative; simulation test; strategy

中图分类号: TM72

文章编号: 1674-3415(2015)18-0114-06

0 引言

高压直流输电在远距离大容量输电和电力系统联网方面具有明显的优点, 目前我国已投运±500 kV、±660 kV 以及±800 kV 等电压等级直流输电线路 20 余条, 根据规划, 以后再建设的直流输电工程主要为±800 kV 或±1 100 kV。直流线路保护作为直流输电工程保护系统重要的组成部分, 承担着快速检测并清除线路故障的重大任务, 其表现的优劣直接影响

响到整个直流输电工程的运行性能。

目前国内外对直流线路保护的理论研究^[1-9]较多, 如文献[4]提出了一种基于单端暂态量保护的方法及其装置开发, 而文献[6-7]则分别提出了基于数字滤波器、Hilbert-Huang 变换以及改进傅氏算法的直流输电线路保护方案。然而相关理论并未在实际工程中得到应用, 现有工程的线路保护一般采用 ABB 或 SIEMENS 方案, 线路保护主要有行波保护、电压突变量保护、线路低电压保护和直流线路纵差保护组成, 电压突变量保护是线路保护的主保护。

对高压直流输电线路间电磁耦合的研究主要集中在对同塔双回直流线路的相互影响或交流线路

基金项目: 特高压直流双极输电线路间相互感应对控制保护系统的影响及对策研究 (XT71-15-049)

对直流线路影响等方面的问题^[10-13], 且主要通过 PSCAD 进行仿真研究, 对特高压直流极间线路耦合和直流线路电磁耦合机理方面的研究还不够深入。

溪洛渡左岸-浙江金华±800kV 特高压直流输电工程(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, 宜宾站常为整流站, 金华站常为逆变站, 直流线路长度约 1 670km, 双极直流线路 1 回, 2014 年 6 月双极完全投运。宾金直流首次实现单回路 800 万 kW 满负荷和 840 万 kW 过负荷试运行, 创造了超大容量直流输电的新纪录。

本文介绍了宾金直流 7 月 31 日线路保护动作情况, 对动作原因进行了分析, 指出直流线路极间电磁耦合产生的干扰是非故障极动作的原因。通过建立的特高压直流线路电磁耦合等效图, 对线路电磁耦合的机理进行了公式推导及深入分析, 提出了相关保护的优化措施, 并进行了全面的 RTDS 仿真试验验证。目前, 保护的优化策略已在宾金直流工程中应用, 并对后续工作提出了建议。

1 现场保护动作情况及初步分析

1.1 现场动作情况

2014 年 7 月 31 日 17 点 34 分, 宾金直流极 1 双阀组 800kV、极 2 单阀组(低端阀组)400kV 运行, 双极直流功率 6 000MW, 发生极 1 直流线路故障。宜宾站极 1 行波保护和电压突变量保护动作, 金华站极 1 电压突变量保护动作。宜宾站极 1 直流线路再启动 2 次, 重启成功。

极 1 直流线路故障后, 金华站极 2 电压突变量保护动作, 宾金直流极 2 低端阀组闭锁。

宾金直流在双极运行方式下采用两次原压重启, 同时在一极线路故障重启动时, 闭锁另一极线路故障重启动功能, 另一极如果发生线路故障立即闭锁。因此极 2 突变量保护动作后未经再启动而直接闭锁极 2 系统。

1.2 电压突变量保护逻辑

电压突变量保护检测直流电压和直流电流, 直流线路接地故障的特征为直流电压以较高的速率下降到一个较低值(突变量), 直流电流在整流站迅速变大, 在逆变站迅速变小。

电压突变量检测由微分电路构成, 与两个参考值进行比较。较小的突变量参考值($\Delta 1$)用于启动检测电路, 如果突变量超过较大的参照值($\Delta 2$), 则达到突变量动作条件。为了区分区内和区外故障, 采用直流线路电流变化量的辅助判断。同时配置了两段电压低的判据, 其中一段为故障开始时需要满足,

另外一段为避免因电压暂态变化导致的意外动作, 在其他四个判据均满足后延时一定的时间后再进行直流低电压逻辑判断, 如也满足条件则电压突变量保护最终动作出口。电压突变量保护逻辑如图 1 所示, 图中 U_{dl_sw} 为直流电压的实测值(极 2 取反); ΔI_{dl} 为电流变化量; $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 为电压突变量定值(定值为负值)。

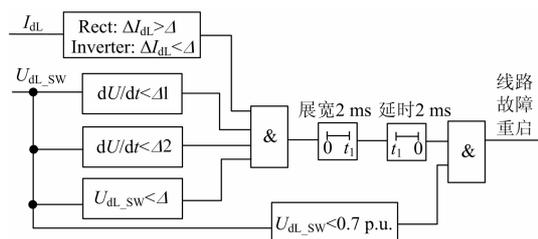


图 1 电压突变量保护逻辑图

Fig. 1 Logic diagram of voltage derivative protection

1.3 初步分析

现场动作相关波形如下图所示, 图 2 为宜宾站极 1 直流线路电压和线路电流, 图 3 为金华站极 2 直流线路电压和线路电流。

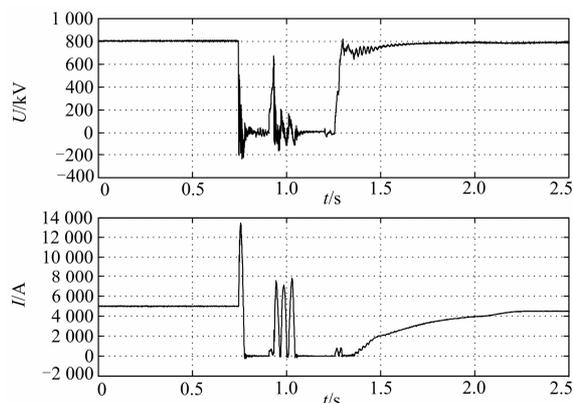


图 2 宜宾站极 1 直流电压、电流波形

Fig. 2 DC voltage and current waves of Yibin station pole 1

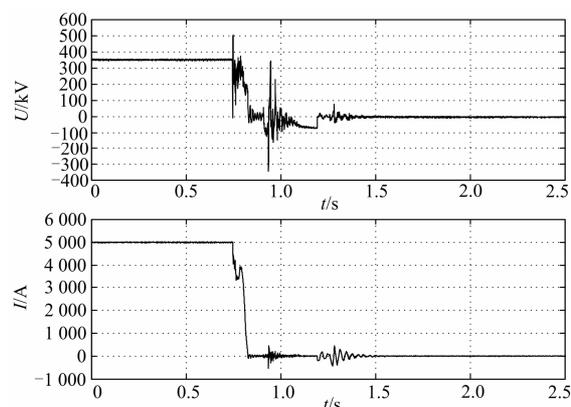


图 3 金华站极 2 直流电压、电流波形

Fig. 3 DC voltage and current waves of Jinhua station pole 2

极 1 线路故障后,线路故障定位装置测距情况:宜宾站线路故障定位装置给出了故障测距(距宜宾站 100.2km),金华站测距装置未给出测距,运维人员通过手动测距方式进行了计算,故障点距离金华站 152.17km,两站故障定位值之和与线路长度基本吻合。因此极 1 线路保护动作正确。

由图 3 可知,极 1 发生线路故障时,金华站极 2 直流电压、电流发生波动,导致电压突变量保护动作。但故障测距装置及运行人员均未发现极 2 线路故障情况,且整流站的极 2 线路保护均未动作,因此,可以初步判断极 1 直流线路故障扰动导致了金华站极 2 电压突变量保护动作。下面通过直流线路电磁耦合机理分析进一步说明极 2 受到极 1 产生电磁耦合导致其动作的原因。

2 直流线路电磁耦合机理分析

特高压直流输电线路极 1 和极 2 均采用架空线,架空线路具有 4 个原参数(电阻 R 、电感 L 、对地电导 G 、电容 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 $C=0$ 。如果系统两极运行时,特高压直流输电系统极 1 和极 2 线路电磁耦合^[8-10]等效电路可用图 4 来表示(只研究分布参数的线路部分)。

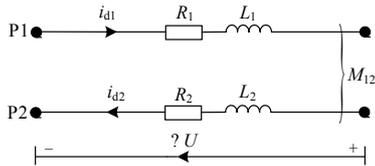


图 4 直流线路等效图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of DC line

根据互感耦合电路的基本理论可得线路压降:

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

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,下面以宾金直流输电工程的实际参数为例,具体分析。

宾金直流输电工程线路的实际参数如表 1 所示。

1 000 多公里的直流线路可看作是无限长导线,根据电磁场的基本理论可知,线路的单位长度自感为

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

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m); ℓ 为线路长度; D_{sb} 为

表 1 宾金特高压直流输电工程直流线路参数

Table 1 DC line parameters of Bin-Jin UHVDC

| 线路参数 | 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/m | 20.0 | 6.6 | 6.0 |
| 塔高/m | 42.0 | 22.0 | 24.0 |
| 线路长度/km | 1 679.9 | 103.0 | 23.6 |

导线的自感几何均距,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_s , 对于钢芯绞线 $D_s = 0.779r$, r 是导线半径。

线路的单位长度互感为

$$M'_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2\ell}{D} - 1\right) \quad (4)$$

式中, D 为两导线间的轴线间距,即互感几何均距。

将宾金直流输电工程线路具体参数代入上述求单位长度自感与互感的式(2)和式(4),可得

$$L'_2 \approx 32 \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (5)$$

$$M'_{12} \approx 24 \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (6)$$

整个线路的自感与互感可简化为单位量与线路长度相乘,但不会影响对结果的定性分析。由此可得

$$L_2 = L'_2 \times 1680 \times 1000 \approx 5.4 \text{ H} \quad (7)$$

$$M_{12} = M'_{12} \times 1680 \times 1000 \approx 4 \text{ H} \quad (8)$$

直流线路电阻约为 9Ω , 将电阻值及式(7)和式(8)计算的值代入式(1)可得

$$\Delta U = i_{d2} \times R_2 + L_2 \frac{di_{d2}}{dt} - M_{12} \frac{di_{d1}}{dt} = \quad (9)$$

$$9i_{d2} + 5.4 \times \frac{di_{d2}}{dt} - 4 \times \frac{di_{d1}}{dt}$$

根据式(9)可得以下结论:

1) 稳态情况下,如果忽略线路电流中的谐波分量,即有 $\frac{di_{d2}}{dt} \approx \frac{di_{d1}}{dt} \approx 0$, 故 $\Delta U = i_{d2} \times R_2$, 此式为直流稳态运行时线路压降的公式。

2) 暂态情况下, P1 系统电流迅速增加,即 $\frac{di_{d1}}{dt}$ 较大, P2 系统电流变化不大,可认为 $\frac{di_{d2}}{dt} \approx 0$, 即

在暂态过程中, 极 1 电流变化后通过电磁耦合将在极 2 叠加扰动电压, 造成极 2 电压、电流发生较大扰动, 满足现有的电压突变量保护动作逻辑。

3 RTDS 仿真分析及保护功能优化策略

3.1 现场故障工况的仿真

通过与工程现场控制保护系统一致的宾金特高压直流工程仿真控制保护设备^[14-17], 进行现场工况试验。该仿真系统与工程同期建设, 在该系统上完成了宾金直流控制保护系统与阀控设备、安控装置和光 CT 等接口设备的联调试验。

试验工况与现场保持一致: 极 1 双阀组 800kV、极 2 单阀组(低端阀组)400kV 运行, 双极直流功率 6 000MW, 模拟极 1 直流线路故障, 故障点距宜宾站 100km, 故障接地时间 400ms(模拟 2 次重启)。

仿真试验录波如图 5 和图 6 所示。

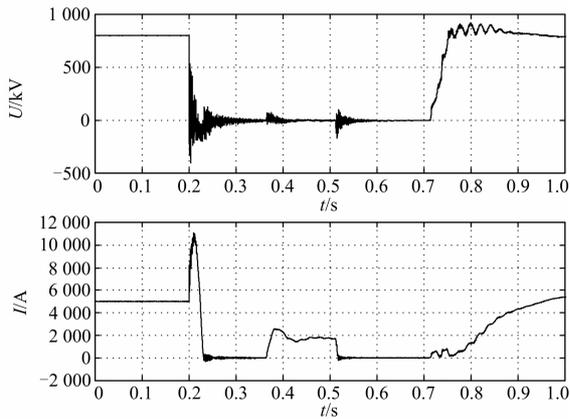


图 5 宜宾站极 1 直流电压、电流仿真波形

Fig. 5 DC voltage and current simulation waves of Yibin station pole 1

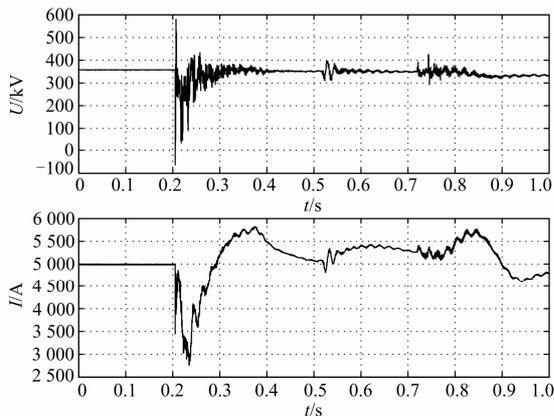


图 6 金华站极 2 直流电压、电流仿真波形

Fig. 6 DC voltage and current simulation waves of Jinhua station pole 2

试验结果与现场动作情况一致, 即宜宾站极 1 行波保护、电压突变量保护动作, 极 1 重启 2 次, 重启成功。极 1 接地故障期间, 极 2 电压、电流扰动较大, 金华站极 2 电压突变量保护动作(为了完整地观察极 2 波形, 试验室控制保护程序中临时允许极 2 的重启动, 因此极 2 重启成功)。

3.2 故障分析及保护功能优化策略

通过直流线路电磁耦合机理分析和 RTDS 仿真试验可知, 宾金直流在不对称运行方式下(一极 800kV、一极 400kV 运行), 800kV 运行极线路故障导致 400kV 运行极电压突变量保护动作的原因为: 故障极对非故障极的电磁耦合造成非故障极电压、电流发生较大的扰动, 满足了现有的电压突变量保护逻辑。

进行各种工况仿真试验发现双极不对称运行时, 故障极对非故障极的电压扰动最大(为了研究故障特征, 暂时退出非故障极的线路保护)。如图 7 所示, 两种波形分别为宜宾站极 1 附近和极 2 附近直流线路故障时的极 2 金华站电压波形, 即分别为区外故障和区内故障时的电压波形。由波形可知, 在故障发生的较短时间内, 区外扰动与区内线路故障的暂态过程基本相同, 且直流电压存在短时振荡。约十几毫秒后区外故障扰动电压和区内线路故障电压波形有较为明显的差异, 即区外故障造成的扰动, 直流电压在振荡一段时间后将会上升, 而区内故障则引起直流电压持续降低。

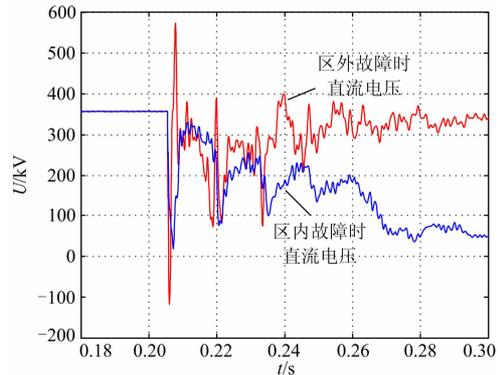


图 7 区外及区内故障时的直流电压波形

Fig. 7 DC voltage waves of external and internal faults

根据电磁耦合机理分析, 区外故障时由于故障极在故障开始一段时间内电流突变严重, 极间电磁耦合产生的感应电压很大, 抵消了非故障极原有电压。故障后期, 故障极的线路电流趋于平稳, 感应电压基本消失, 非故障直流电压逐渐恢复。

由以上仿真试验结果分析, 延长低电压的判断时间及定值并将振荡电压采用一阶惯性环节进行平滑处理能够有效避免区外扰动造成的保护动作, 提

出宾金直流电压突变量保护优化策略:

1) 电压突变量保护中直流低电压判据由 0.7 p.u. 改为 0.5 p.u.;

2) 电压突变量判断逻辑出口后的展宽和延时由 2ms 改为 18ms, 并使用时间常数为 2ms 的一阶惯性环节进行平滑处理。

优化后的电压突变量保护逻辑如图 8 所示。

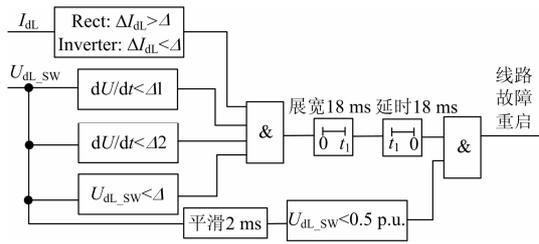


图 8 优化后的电压突变量保护逻辑图

Fig. 8 New logic diagram of voltage derivative protection

4 试验验证

为了验证优化后的电压突变量保护的正确性和可靠性,进行了多种典型运行方式和不同故障位置的线路接地故障试验,各运行方式下分别模拟极 1 线路首端、极 1 中点、极 1 末端、极 2 线路首端、极 2 中点和极 2 末端共 6 个故障点,共 66 项试验。结果表明电压突变量保护区内故障时均正确动作,区外故障时均能避免动作,详细的试验项目及结果如表 2 所示。

5 总结及建议

通过现场动作情况初步分析,极间线路电磁耦合产生的扰动为极 2 动作的原因,通过电磁耦合机理分析和 RTDS 仿真分析,提出了电压突变量保护逻辑的优化措施。通过区内外各种试验验证表明,优化后的保护功能能够实现区内故障正确动作,区外故障扰动时避免动作。针对本次故障情况建议后续工作如下:

1) 线路电磁耦合对直流控制保护的影响需进一步研究。特高压直流线路耦合较常规直流严重,当新的电压等级、直流线路输送距离增大或输送容量提高时均需要研究电磁耦合对直流控制保护的影响。

2) 仿真试验时 RTDS 线路模型的准确度对直流线路保护动作结果有很大影响,建议研究如何提升直流线路仿真模型的准确程度。

3) 后续特高压直流工程系统调试建议增加“800kV+400kV”运行方式下的 800kV 线路故障试验。

表 2 电压突变量保护测试结果

Table 2 Test results of voltage derivative protection

| 直流输电工程运行方式 | 极 1 动作 | 极 2 动作 |
|---|--------|--------|
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 单阀组 400 kV 运行, 600 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 单阀组 400 kV 运行, 6 000 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 单阀组 400 kV, 极 2 单阀组 400 kV 运行, 400 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 单阀组 400 kV, 极 2 单阀组 400 kV 运行, 4 000 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 双阀组 800 kV 运行, 800 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 双阀组 800 kV 运行, 8 000 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 停运, 400 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 停运, 4 000 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 单阀组 400 kV, 极 2 停运, 200 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 单阀组 400 kV, 极 2 停运, 2 000 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 双阀组降压 560 kV 运行, 800 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 双阀组降压 560 kV 运行, 6 800 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 停运, 金属回线运行, 400 MW | 正确 | 正确 |
| 极 1 双阀组 800 kV, 极 2 停运, 金属回线运行, 4 000 MW | 正确 | 正确 |

参考文献

- 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.
- 黄金海, 冯雷, 李曼丽, 等. 糯扎渡送电广东特高压直流输电工程直流滤波器 C1 不平衡保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 46-51.
HUANG Jinhai, FENG Lei, LI Manli, et al. Study of DC filter C1 unbalance protection for Nuozhadu-Guangdong ultra high voltage direct current transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 46-51.
- 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 一种新型三取二逻辑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] 张保会, 孔飞, 张嵩, 等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(4): 179-185.
ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Technical development of non-unit protection devices based on transient signals for HVDC transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(4): 179-185.
- [5] 田庆. 天广工程直流线路电压突变量保护误动作分析[J]. *高压电器*, 2012, 48(4): 33-38.
TIAN Qing. Analysis on the fault trip of bipole DC line protection in Tianguang HVDC[J]. *High Voltage Apparatus*, 2012, 48(4): 33-38.
- [6] ZHANG S, ZHANG B H, YOU M. Realization of the transient-based boundary protection for HVDC transmission lines[C] // *POWERCON: Hangzhou, China*, 2010.
- [7] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(15): 18-23.
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(15): 18-23.
- [8] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. ± 800 kV 云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(31): 179-188.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Simulation and analyses for Yun-Guang ± 800 kV HVDC transmission line protection system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(31): 179-188.
- [9] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 团林换流站电压突变量保护研究[J]. *南方电网技术*, 2014, 8(4): 37-41.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. Research of undervoltage sensing protection at Tuanlin Converter Station[J]. *Southern Power System Technology*, 2014, 8(4): 37-41.
- [10] 李新年, 吕鹏飞, 杨鹏, 等. 同杆架设直流线路的相互影响研究[J]. *电网技术*, 2012, 36(11): 222-228.
LI Xinnian, LÜ Pengfei, YANG Peng, et al. Inter-influences between HVDC transmission lines erected on same tower[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(11): 222-228.
- [11] 石岩, 王庆, 聂定珍, 等. 500 kV 直流输电工程同杆并架技术的综合研究[J]. *电网技术*, 2006, 30(21): 1-6.
SHI Yan, WANG Qing, NIE Dingzhen, et al. Comprehensive study on technology of two bipole lines on the same tower for 500 kV HVDC project[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(21): 1-6.
- [12] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江 ± 800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(1): 115-121.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ± 800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 42(2): 115-121.
- [13] 李宝聚, 周浩, 郭雷. 特高压交流线路对平行架设特高压直流线路的工频电磁感应影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(10): 20-26.
LI Baoju, ZHOU Hao, GUO Lei. Electromagnetic influence of AC transmission lines on parallelly erected UHVDC transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(10): 20-26.
- [14] 蒲莹, 舒畅, 蒋维勇, 等. 宁东—山东 ± 660 kV 直流输电示范工程二次系统实时仿真试验及关键问题对策[J]. *电网技术*, 2011, 35(1): 76-83.
PU Ying, SHU Chang, JIANG Weiyong, et al. Real-time simulation test for secondary system of ± 660 kV HVDC Power Transmission Demonstration Project from Ningdong to Shandong and countermeasures to key problems[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(1): 76-83.
- [15] 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.
- [16] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 基于 HCM3000 平台的高岭扩建工程直流极保护系统实施策略[J]. *东北电力技术*, 2012, 33(10): 35-40.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy of Gaoling II project based on HCM3000 platform[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2012, 33(10): 35-40.
- [17] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2014-11-25; 修回日期: 2015-01-26

作者简介:

郭宏光(1968-), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电控制保护系统的设备开发和工程管理工作; E-mail: guohongguang@xjgc.com

吴庆范(1982-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电保护软件设计及研究工作;

黄金海(1975-), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究工作。

(编辑 魏小丽)