

# 高压直流输电线路暂态保护分析与展望

于洋, 孙学锋, 高鹏, 刘兴华, 陈勇强, 刘琳

(淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 现时高压直流输电线路保护广泛采用 ABB 或西门子保护方案和配置。通过对 ABB 和西门子行波保护动作特性仿真结果分析及运行经验表明, 二者保护方案无法可靠、灵敏地切除高阻接地故障, 且易受噪声等外界信号干扰。同时, 对国内外直流线路暂态保护的新思想进行分析总结, 提出了提高高压直流输电线路暂态保护抗过渡电阻能力及区内、区外故障暂态分析所必须解决的几个关键性问题, 为日后高品质直流线路保护判据的提出提供研究方向。

**关键词:** 高压直流输电线路; 行波保护; 高阻接地故障; 暂态保护; 线路边界

## Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines

YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng, LIU Xinghua, CHEN Yongqiang, LIU Lin

(Zibo Power Supply Company, Zibo 255000, China)

**Abstract:** Nowadays, most HVDC transmission lines use the protections developed by ABB or Siemens Company. The two traveling wave protections are simulated and their merits and drawbacks are summarized, which show that these protection schemes can not reliably and sensitively cut out the high impedance ground fault and be vulnerable to external noises interference. At the same time some new ideas about the transient protection of the DC line are introduced; at last several key issues that could advance the reliability and sensitivity of the transient protection for HVDC transmission line are proposed, which will provide a theoretical basis for raising high-quality DC line protection criteria.

**Key words:** HVDC transmission lines; traveling wave protection; high impedance ground fault; transient protection; line boundary

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0148-07

## 0 引言

随着电网规模的不断发展,超/特高压远距离直流输电系统越来越广泛地应用于电力系统中。自1954年瑞典格特兰岛直流输电工程投运以来,世界各地共建成投运上百个直流工程,我国从20世纪80年代至今,建成投运了10个直流输电工程<sup>[1]</sup>。世界第一个800 kV特高压直流输电工程云广线也单极投产运行,输送容量260万kW。高压直流输电系统通常承担大系统互联的任务,具有运行电压等级高,输送容量大,输送距离远等特点,一旦发生双极闭锁停运事故,将威胁整个大电网的安全稳定性<sup>[2-3]</sup>。因此,高压直流输电系统的保护就成为保障交直流互联大电网安全稳定运行的第一道防线。

目前国内的所有直流输电控制与保护系统均采用ABB和西子公司的装备和技术。高压直流线路保护通常采用行波保护作为主保护,微分欠压保护作为行波保护的后备保护,纵联电流差动保护作为直

流线路发生高阻短路时的后备保护及前二者的后备保护。大量运行经验与研究表明,上述高压直流输电保护的原理、方案以及配置有较大缺陷,多起直流输电系统的闭锁停运事故是由于保护的误动和拒动引起的。例如,天广直流(广西天生桥至广州北)自2001年投运至2006年,共发生5次双极闭锁事故,其中两次是因为直流线路保护误动引起<sup>[4]</sup>;2007年天广直流双极闭锁事故则是由于高压直流线路高阻短路时,纵联差动保护延时过长导致触发角过大保护闭锁直流系统<sup>[5-6]</sup>。

由此可见研究高速、可靠、高灵敏度的行波保护新原理和方案是高压直流输电系统亟待解决的问题。

## 1 国内外应用现状

目前,高压直流输电线路保护广泛采用ABB和Siemens的保护和控制装备,其中直流线路保护的配置为<sup>[7]</sup>:行波保护(Traveling wave Protection)为

直流线路主保护,微分欠压保护(Under Voltage Sensing and Under Voltage Protection)作为直流线路行波保护的后备,电流纵差动保护作为上述二者的后备保护(DC Line Longitudinal Differential Protection),电流横差动保护(DC Line Transversal Differential Protection)用来保护单极运行时金属回线的接地故障。下面分别介绍 ABB 和 Siemens 公司的行波保护的原理与特点。

### 1.1 SIEMENS 保护的配置及判据分析

SIEMENS的直流线路保护配置采用3取2的原则,即配备3套功能相同的保护系统,当多于2套保护系统同时动作时,保护出口启动直流线路故障重启功能。如果运行时有一套保护故障退出,则由剩余的2套保护系统构成2取1方式。直流线路端电压  $U_{dl}$  和电流  $I_{dl}$  的测量分别由阻容式直流分压器和混合式光学电流互感器来实现,从而保证了采样的稳定性和快速性<sup>[8]</sup>。每套保护系统均配置以下几类直流线路保护:行波保护也可称为波前保护(Wave Front Protection, WFPDL)、微分欠压保护( $27du/dt$ )、直流线路纵差保护(87DCLL),如图1所示。

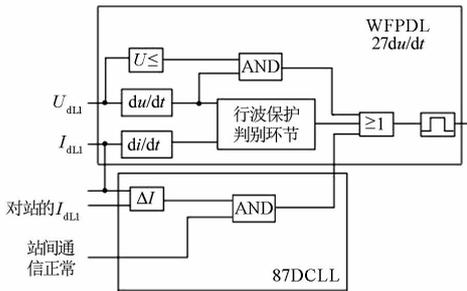


图1 SIEMENS的直流线路保护配置

Fig. 1 Scheme of SIEMENS DC-line protection

#### 1.1.1 Siemens 行波保护判据

Siemens 行波保护判据如式(1)所示<sup>[9-11]</sup>。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du}{dt} > \Delta_{set1} \quad \text{上升沿展宽6ms} \\ \Delta u > \Delta_{set2} \\ \frac{di}{dt} > \Delta_{set3} \quad \text{整流侧} \\ \frac{di}{dt} > \Delta_{set4} \quad \text{逆变侧} \end{array} \right. \quad (1)$$

该保护判据的动作顺序:同时检测整流侧(假设保护安装在整流侧出口处)直流电压变化率  $du/dt$  和电压变化量  $\Delta u$ ,二者同时满足动作要求时才能启动检测电流变化率  $di/dt$ ;当整流侧和逆变侧电流变化率也大于各自的定值时,则判断直流线路区内故障。其中,  $\Delta_{seti}$  是各个条件的设定值;  $u$  和  $i$  分别为直流

线路端电压和电流。

具体仿真计算过程中,电压、电流变化率均以差分代替微分,本文建立的直流输电系统中的采样频率为 10 kHz,所以取电压、电流变化率的差分间隔为 0.1 ms,电压变化量的差分间隔为 5 个采样点的时间间隔,即 0.5 ms。

通过判据(1)不难发现,  $du/dt$  就是利用电压的波头变化率(波前宽度)来判断区内故障的发生,同时,电压的变化率放大了高频扰动量,因此利用电压突变量  $\Delta u$  来保证行波保护的可靠性;两侧电流变化率则用来保证故障发生在线路上,因为线路故障时,由于控制系统起作用,使得整流侧电流增大而逆变侧电流减少。

#### 1.1.2 仿真实例

本文以国内某±500 kV、输送容量为 1 200 MW、长度为 1 046 km 的双极高压直流输电系统模型为仿真平台,如图 2 所示。模型中以正极直流输电线路为被研究线路,F1 和 F2 为正极线路区内故障,F4 为负极线路接地故障(区外故障),F3 为正极线路区外故障。

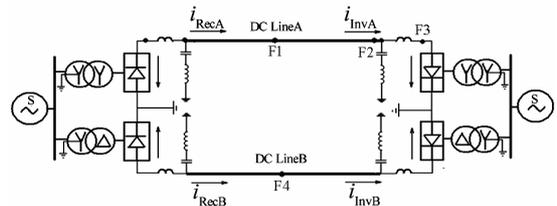


图2 典型双极直流输电系统

Fig. 2 Typical bipolar DC transmission system

图3为2.5 s时刻在区内距整流侧500 km的F1处发生过渡电阻为50 Ω的接地故障时,行波保护的動作特性。

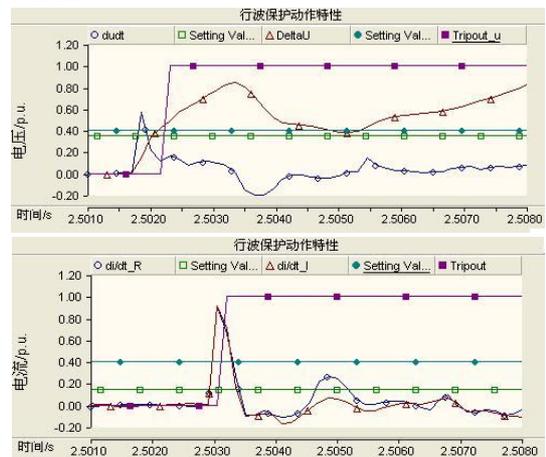


图3 区内F1点故障时波前保护动作情况

Fig. 3 Result of WFPDL as internal fault happened at F1

图中:  $du/dt$  为直流电压变化率;  $\Delta U$  为直流电压变化量; Setting Value 为各个条件的阈值; Tripout<sub>u</sub> 为  $du/dt$  和  $\Delta U$  联合动作的情况;  $di/dt_R$  为整流侧直流电流变化率;  $di/dt_I$  为逆变侧直流电流变化率; Tripout 为波前保护整体的动作情况。

由图 3 可以知, 在 2.5023 s 时刻检测到 Tripout<sub>u</sub> 发出动作信号(其中电压变化率的动作信号在 2.5016 s 时就已发出, 而电压变化量在 2.5023s 达到阈值, 但是由于电压变化率  $du/dt$  附带 6 ms 时间延时, 故 Tripout<sub>u</sub> 在 2.5023 s 发出动作信号); 于是启动电流变化率判据, 并在 2.5032 s 时两侧直流电流变化率同时满足动作条件, 因此最终判断为极 A 直流线路上发生接地故障, 整个判据的动作时间为 3.2 ms。

图 4 为 2.5 s 时刻在直流线路末端 F2 处发生过渡电阻为 50 Ω 的接地故障时, 行波保护的動作特性。由于电压变化率  $du/dt$  未达到阈值, 所以行波保护拒动, 不能可靠切除区内故障。

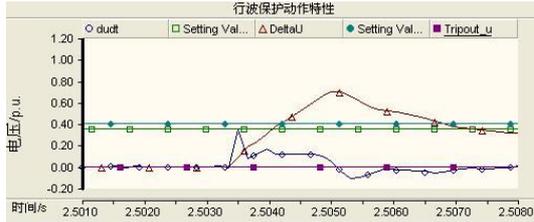


图 4 区内 F2 点故障时波前保护动作情况

Fig. 4 Result of WFPDL in case of internal fault at F2

图 5 和图 6 分别为 2.5 s 时刻区外 F3(逆变侧平波电抗器逆变器侧)和 F4(负极直流线路距整流侧 500 km)发生金属接地故障。

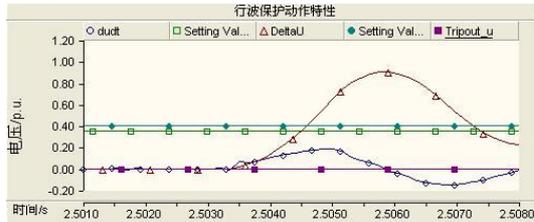


图 5 区外 F3 点故障波前保护动作情况

Fig. 5 Result of WFPDL as external fault happened at F3

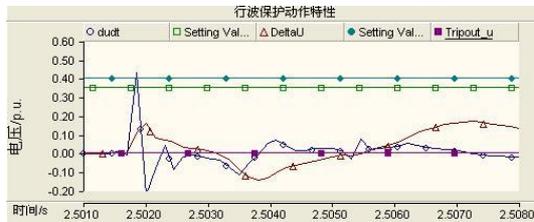


图 6 区外 F4 点故障波前保护动作情况

Fig. 6 Result of WFPDL in case of external fault at F4

由图 5 可知, 当逆变侧平波电抗器逆变器侧故障时, 由于平波电抗器的平滑作用, 电压变化率将远远小于动作的阈值, 波前保护正确不误动; 由图 6 可知, 由于架空线的耦合作用, 当负极线路故障时将对正极线路保护产生一定的影响, 但是由于耦合系数较小, 正极线路保护的电压变化量未达到阈值, 所以行波保护正确不误动。

### 1.2 ABB 行波保护判据及仿真分析

#### 1.2.1 ABB 行波保护判据

ABB 线路保护配置与 Siemens 公司基本类似, 其行波保护采用如式(2)判据<sup>[12-13]</sup>。

$$\begin{cases} W_{\text{COMM}} = Z_{\text{COM}} i_{\text{COM}} - u_{\text{COM}} \\ W_{\text{POLE}} = Z_{\text{DIF}} i_{\text{DIF}} - u_{\text{DIF}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $W_{\text{COMM}}$  为地模波;  $W_{\text{POLE}}$  为极模波; 下标 DIF 表示极模, 即将两极电气量之差组成极模, 两极电气量之和为地模 COM;  $Z_{\text{COM}}$  为共模阻抗 479 Ω;  $Z_{\text{DIF}}$  为差模波阻抗 258 Ω。

ABB 行波保护是通过检测极模波  $W_{\text{POLE}}$  的变化率来判断直流线路故障; 利用地模波  $W_{\text{COMM}}$  的极性判断故障极, 即当地模波大于某个正值时, 为正极线路故障, 当其小于某个负值时为负极线路故障。此行波保护可以在两站失去通信的情况下仍能正常工作, 定值不变。

#### 1.2.2 仿真实例

依然利用图 2 所示的仿真模型和模型中设定的故障类型对 ABB 行波保护进行仿真分析。

图 7 为 2.5 s 时刻在区内距整流侧 500 km 的 F1 处发生过渡电阻为 50 Ω 的接地故障时, 行波保护的動作特性。

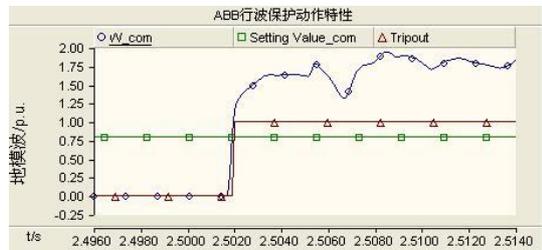


图 7 区内 F1 点故障时行波保护动作情况

Fig. 7 Result of TWP as internal fault happened at F1

图中:  $W_{pole}$  为极模波的变化率;  $W_{com}$  为地模波值; Setting Value 为各个条件的阈值; Tripout\_dif 为极模波条件的动作情况; Tripout 为行波保护整体的动作情况。

由图 7 可知,在 2.5018 s 左右极模波的变化率达到阈值,发出信号,说明直流线路区内故障;并且地模波的值在 2.502 s 也超过某正的阈值,故可以判断正极直流线路故障;二者配合正确判断 F1 处 50  $\Omega$  接地故障,整个保护的动作为 2 ms。

图 8 和图 9 分别为 2.5 s 时刻 F2 直流线路末端 50  $\Omega$  接地故障和 F3 逆变侧平波电抗器逆变器侧金属性接地故障。图 8 由于过渡电阻过大,使极模波的波头变化平滑,不能够到达阈值而使整个保护拒动;图 9 区外故障时,由于平波电抗器的平滑作用,波头的变化也远达不到阈值,保护准确不动作。

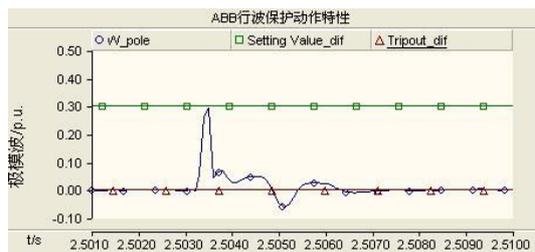


图 8 区内 F2 点故障时行波保护动作情况

Fig. 8 Result of TWP in case of internal fault at F2

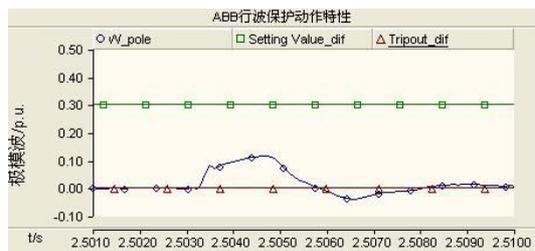


图 9 区外 F3 点故障行波保护动作情况

Fig. 9 Result of TWP as external fault happened at F3

图 10 为 F4 处金属性接地故障。

由图 10 可知,保护可以正确判断直流线路故障及故障极(负极,  $W_{com} < -\Delta$ ),整个保护的动作为 2 ms。

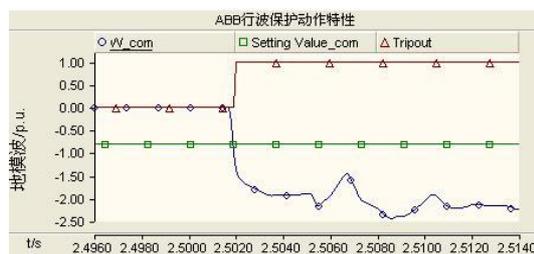
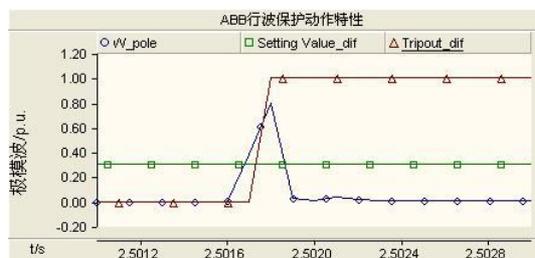


图 10 F4 点故障行波保护动作情况

Fig. 10 Result of TWP in case of fault at F4

### 1.3 行波保护动作性能分析

经过上述的仿真分析可知:

Siemens 行波保护的主要问题是抗过渡电阻能力太弱,即使在整流侧出口故障,当过渡电阻超过 113  $\Omega$  时,由于过渡电阻阻值过大将导致波头陡度降低,导致行波变化率上升沿展宽不足而拒动;当故障距离较远时,由于输电线路本身对行波波头高频量的衰减作用,导致波前保护的灵敏度下降,以至于在线路末端抗过渡电阻能力不超过 50  $\Omega$ ;另外,由于保护判据利用的是电压电流的瞬时值,在对其微分的同时放大扰动的干扰,因此易受噪声等外界信号的干扰。

ABB 行波保护判据与 Siemens 行波保护判据相似,而且其抗过渡电阻能力依然较差(线路末端 50  $\Omega$  发生拒动),同时受扰动和噪声的影响较大,当噪声扰动超过 2% 时,行波保护易误动;另外,这种行波保护原理不能判断行波波头中高频暂态分量的衰减程度,导致从原理上无法识别逆变侧换相失败与逆变侧线路出口故障之间的差异<sup>[12]</sup>。

二者行波保护的后备保护为低电压和电压变化率  $du/dt$  保护,其判据与行波保护类似,所不同的是电压变化率上升沿展宽 20 ms,同样具有无法识别较高过渡电阻短路的故障;另外,当直流系统的交流侧发生不对称故障时,该保护存在误动的可能性<sup>[13]</sup>。

因此,对于过渡电阻超过 100  $\Omega$  的线路接地故障,目前大多依靠电流纵差动保护来检测<sup>[5-6]</sup>。但是由于在线路故障后控制系统的作用,如低电压限流控制系统(Voltage Dependant Current Order Limiter, VDCOL)的作用下,整流侧和逆变侧电流出现较大的波动而产生较大的不平衡电流,必须延时 500 ms 加以躲避。同时为了防止通信的错误,设置了电流差动闭锁模块,即在检测到某侧电流与 65 ms 前电流的差值大于 210 A 时,闭锁 600 ms,如果再次检测到该差流超过阈值,则重新计时。电流纵差动的原理和配置很难使得差动保护起到后备的作用,

因为 VDCOL 控制起作用时,也会导致某侧电流与 65 ms 前电流的差值大于门槛值,造成电流纵差动保护的延时达到 1.1 s 以上。这就导致其他的后备保护,如触发角过大保护提前动作闭锁直流输电系统而导致整个系统停运<sup>[7]</sup>。

## 2 直流线路行波保护研究现状

目前的高压直流输电线路的行波保护以及其后备保护的原理和配置还有许多漏洞,需要进一步研究新的保护原理和算法。事实上,交流输电线路的行波保护自 20 世纪 70 年代就已经出现,包括行波方向判别式、行波距离、行波极性判别式等保护原理<sup>[14-15]</sup>。进入 90 年代以来,随着小波分析、多分辨分析与波形奇异性检测等技术的不断成熟和发展,研究者们又赋予了行波保护新的内涵,即不再仅限于行波波头的信息,而是对在一个时间段内的整个暂态行波波形的时频信息进行综合分析,得到区内外故障的特征差异,进而构造新的暂态保护或边界保护<sup>[16]</sup>。

近年来,在交流输电线路的行波保护、暂态保护以及边界保护的启发下,众多保护研究者将交流输电线路的行波保护原理“移植”到高压直流输电线路的保护中,取得了一系列的成果。PSCAD 的仿真结果表明,这些成果均在不同程度上改善了直流输电线路行波保护的动作用安全性和可靠性<sup>[17-24]</sup>。

文献[17-18]根据线路内部故障时故障暂态高频分量较为丰富而外部故障时高频分量较少的特征,利用小波多分辨分析,提出了高压直流线路暂态边界保护判据,并对雷电冲击进行了识别。文献[19-21]在同样利用小波分析,结合交流线路行波距离保护思想提出了直流线路的行波距离保护原理和判据。文献[22]则结合了边界保护和行波距离保护,提出了直流线路的行波/边界混合保护原理和方案。文献[23-24]则利用区内故障行波极性相同,而区外故障行波极性相反的特征,利用小波变换工具,提出了直流线路的行波极性比较式的保护判据。

## 3 问题总结

上述保护新思想虽然在一定程度上改善了直流线路保护的动作用特性,但是要想提出可靠的高品质直流输电线路的保护,必须解决下面几个方面的基础理论问题。

(1) 边界保护类型实际上是利用直流输电线路边界对高频暂态分量的影响特征:区外故障时,初始暂态行波透过线路边界,而区内故障时不需透过线路边界,从而使得区内外故障在高频分量特征上

具有较大差异。那么具有非线性电力电子开关器件的线路边界的透射系数的模型,当故障发生在整流或逆变的交流侧行波透过非线性的线路边界后的特征就成为必须解决的问题。

(2) 行波距离保护类型是利用检测初始行波和在本端线路边界发射后再从故障点反射的行波之间的时间差构成保护原理,那么对于具有非线性边界的直流线路边界的反射系数的模型和行波在边界反射后的特征的研究就对行波距离保护的可靠性和安全性至关重要。

(3) 目前所有的行波保护的新原理都是基于故障后的叠加原理,即认为故障后的故障附加网络是在故障点叠加一个与故障前电压大小相等方向相反的电压源,在这个附加电源的作用下,行波向线路两端传播,例如行波极性判别式原理。但叠加原理仅适用于线性网络,对于非线性的直流输电系统,这一原理是否有效就值得深入研究,探索新的适合直流系统故障暂态过程分析的方法是解决高压直流输电线路暂态保护的基础问题之一。

(4) 对于暂态行波保护来说,高过渡电阻短路是一道很难逾越的鸿沟,因为当过渡电阻较大时,行波波头中含有的高频分量大量减少,从而导致波头不明显,给暂态行波检测带来困难。因此必须有一套能够反映包括暂态量和稳态量在内的克服较大过渡电阻的保护作为高过渡电阻故障的主保护,由于故障后低电压限流等控制系统的作用,电流纵差动保护不能满足速动性要求。研究反映全部电气量信息具有灵敏度高,抗过渡电阻能力强,故障特征持续,不受控制系统作用的影响,不受线路边界特征的影响等,这些新型直流输电线路的暂态保护原理、判据、算法和方案是继电保护研究者的主要内容。

## 参考文献

- [1] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等. 直流输电系统电压等级序列的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.  
LIU Zhenya, SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.
- [2] 吴宝英,陈允鹏,陈旭,等.  $\pm 800$  kV 云广直流输电工程对南方电网安全稳定的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 5-12.  
WU Baoying, CHEN Yunpeng, CHEN Xu, et al. Study on impacts of  $\pm 800$  kV Yunnan-Guangdong HVDC Transmission Project on security and stability of China Southern Power Grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 5-12.
- [3] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安

- 全稳定的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 1-6.
- QI Xu, ZENG Dewen, SHI Dajun, et al. Study on impacts of UHVDC transmission on power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 1-6.
- [4] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析[J]. 高压技术, 2006, 32(9): 173-175.
- REN Dayong. Analysis of bipole block events over the years of Tian-Guang HVDC Project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 173-175.
- [5] 周红阳, 余江, 黄家胤, 等. 直流线路纵联差动保护的相关问题[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 17-21.
- ZHOU Hongyang, YU Jiang, HUANG Jiayin, et al. Improvement of the DC line transversal differential protection in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 17-21.
- [6] 张楠, 陈潜, 王海军, 等. 直流线路纵差保护算法的改进及仿真验证[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 56-59.
- ZHANG Nan, CHEN Qian, WANG Haijun, et al. Improvement and simulation validation of DC line longitudinal differential protection[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(4): 56-59.
- [7] 叶猛, 曹海艳, 马国鹏. 高压直流输电线路保护分析[J]. 南方电网技术, 2008, 2(6): 43-46.
- YE Meng, CAO Haiyan, MA Guopeng. Analysis of the line protection for HVDC power transmission systems[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(6): 43-46.
- [8] 韩昆仑, 蔡泽祥, 贺智, 等. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.
- HAN Kunlun, CAI Zexiang, HE Zhi, et al. Propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.
- [9] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等.  $\pm 800$  kV 直流输电线路边界保护的模型匹配时域算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 320-327.
- SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al.  $\pm 800$  kV DC transmission line boundary protection using model matching algorithms in time-domain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 320-327.
- [10] 蒋平, 严栋, 刘盛松, 等. 基于 GD-FNN 的高压直流输电暂态稳定控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 1-6.
- JIANG Ping, YAN Dong, LIU Shengsong, et al. Transient stability control of UHVDC based on generalized dynamic fuzzy neural network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 1-6.
- [11] 孔飞, 张保会, 甄威, 等. 高压直流输电线路边界高频电压信号衰减特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 85-90.
- KONG Fei, ZHANG Baohui, ZHEN Wei, et al. Analysis on high frequency voltage signal attenuation characteristic of HVDC transmission line boundary[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 85-90.
- [12] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
- XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [13] 胡宇洋, 黄道春. 葛南直流输电线路故障及保护动作分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 102-106.
- HU Yuyang, HUANG Daochun. Faults and protection analysis of Gezhouba 2 Nanqiao DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 102-106.
- [14] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用——A型原理[J]. 继电器, 2004, 32(2): 13-17.
- CHEN Ping, GE Yaozhong, XU Bingyin, et al. Modern travelling wave based fault location principle and its applications to actual fault analysis——Type A principle[J]. Relay, 2004, 32(2): 13-17.
- [15] 董杏丽, 董新洲, 张言苍, 等. 基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 22(2): 11-15.
- DONG Xingli, DONG Xinzhou, ZHANG Yancang, et al. Directional protective relaying based on polarity comparison of travelling wave by using wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 22(2): 11-15.
- [16] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 基于暂态量超高压输电线路无通信保护的研究[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(4): 4-7.
- HA Hengxu, ZHANG Baohui, LÜ Zhilai. Super pressure power transmission line non-communication protection based on transient component[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 4-7.
- [17] WANG Gang, WU Min, LI Haifeng, et al. Transient based protection for HVDC lines using wavelet multi-resolution signal decomposition[C] // 2005 IEEE/PES Transmission

- and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China.
- [18] LI Zhenqiang, LÜ Yanping. A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform[C] // 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, November 9-13, 2008: 163-167.
- [19] CHEN Shilong, SHU Hongchun, WANG Yongzhi, et al. Distance protection scheme with traveling wave for UHVDC transmission line based on wavelet transform[C] // Proceedings of 2008 International Conference on DRPT, Nanjing, China, April, 2008: 2162-2165.
- [20] SHANG L, HEROLD G, JAEGER J, et al. High-speed fault identification and protection for HVDC line using wavelet technique[C] // IEEE Porto Power Tech Conference, 10th-3th September, Porto, Portugal.
- [21] 全玉生, 李学鹏, 马彦伟, 等. 基于小波变换的 HVDC 行波距离保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 52-56.
- QUAN Yusheng, LI Xuepeng, MA Yanwei, et al. Distance protection scheme with traveling wave for HVDC line based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 52-56.
- [22] LIU Xiaolei, OSMAN A H, MALIK O P. Hybrid traveling wave/boundary protection for monopolar HVDC line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 569-578.
- [23] 全玉生, 李学鹏, 徐铁鹰, 等. 基于小波变换的 HVDC 线路行波电流极性比较式方向保护[J]. 现代电力, 2005, 22(6): 22-26.
- QUAN Yusheng, LI Xuepeng, XU Tieying, et al. Directional protection based on traveling wave current polarity comparison using wavelet transform on HVDC line[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(6): 22-26.
- [24] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等.  $\pm 800$  kV 直流输电线路边界保护的模型匹配时域算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 320-327.
- SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al.  $\pm 800$  kV DC transmission line boundary protection using model matching algorithms in time-domain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 320-327.

收稿日期: 2014-04-13; 修回日期: 2014-07-09

作者简介:

于洋(1986-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要从事变电设备运维检修工作。E-mail: ytplyy@126.com