

利用电流突变特性的高压直流输电线路纵联保护新原理

高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 张健康, 侯 卓

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

摘要: 通过对直流输电线路区内、区外故障电流特征的分析可知: 直流线路内部发生故障后的暂态过程中, 线路两端电流突变方向相同; 而线路外部故障后的暂态过程中, 线路两端电流突变方向相反。根据该特征, 提出了一种新的直流输电线路纵联保护原理, 它仅利用线路两端电流的突变, 就可以有效地识别出区内、区外故障。文中还构造了电流突变的识别判据, 并给出了其整定原则。仿真结果表明, 在各种工况下该保护都能够灵敏、可靠地区分区内、区外故障。

关键词: 高压直流输电线路; 纵联保护; 故障分量

0 引言

高压直流(HVDC)输电以其传输功率大、线路造价低、控制性能好等优点, 在远距离、大功率输电中占有越来越重要的地位, 也作为大容量、远距离送电和异步联网的主要手段。目前, 中国直流输电工程数量在世界上已名列前茅^[1-2]。

由于直流线路长, 发生故障的概率高, 因此提高直流输电线路继电保护的技术水平与运行水平对于保证直流输电系统的安全性与可靠运行意义重大^[3-5]。然而从现有的直流输电工程来看, 国内外投运的直流线路继电保护存在着理论不完备、没有普遍适用的整定原则、仅依赖于仿真结果进行整定等问题, 从而导致了直流线路保护可靠性不高^[3-5]。

目前, 直流输电线路多以行波保护作为快速主保护, 电流差动保护作为慢速后备保护^[3-5]。行波保护动作速度快, 有较强的耐过渡电阻能力, 在波头能够被检测的情况下不受过渡电阻、负载、长线分布电容等因素的影响, 但可靠性不高, 易误动^[3-5]。电流差动保护动作慢、灵敏度不高。文献^[6]提出了特高压直流线路能量保护原理, 该原理能满足特高压直流线路对保护性能的要求, 但是需要测量两端的电压数据。因此, 研究新型直流输电线路的继电保护原理, 有效减少故障的发生, 提高直流输电线路的安全性和可靠性已变得非常重要。文献^[7]提出了一种高压直流输电线路电流差动保护新原理, 该差动保护具有良好的性能, 但要求两端采样数据严格同步, 且对通信速率和采样频率有一定要求。

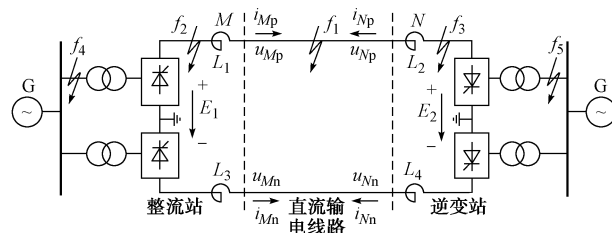
本文在分析直流输电线路故障电流特征的基础

上, 提出了一种新的直流输电线路纵联保护原理。该原理仅利用直流输电线路两端电流突变量, 就可以有效地识别出区内、区外故障, 原理简单、易于整定、可靠性高。该原理不需要两端数据严格同步, 对采样频率要求低, 由于仅需传送状态信号, 对通道的通信速度要求不高。

1 高压直流输电线路故障电流特征分析

目前世界上已运行的直流输电工程多为两端直流输电系统。双极直流输电系统主要由整流站、逆变站和直流输电线路构成。

图 1 为两端双极直流输电系统的构成简图^[1]。



u_{Mp} , u_{Mn} 为 M 端所测正、负极电压; i_{Mp} , i_{Mn} 为 M 端所测正、负极电流; u_{Np} , u_{Nn} 为 N 端所测正、负极电压; i_{Np} , i_{Nn} 为 N 端所测正、负极电流; $f_1 \sim f_5$ 为故障发生的位置, 其中, f_1 位于直流输电线路内部, f_2 位于整流站的电抗器外侧, f_3 位于逆变站的电抗器外侧, f_4 , f_5 分别位于整流站和逆变站的交流母线; E_1 , E_2 分别为发生故障时, 整流站和逆变站的极电压

图 1 双极直流输电系统
Fig. 1 HVDC transmission system with two electrodes

与交流系统不同, 直流系统发生故障时短路电流受控。本文利用故障后的暂态过程中的电流突变进行故障判别, 该判别是在发生故障的瞬间, 即控制角(α 和 β)未变化、或控制角开始调整但仍未调整到稳定状态。下面着重分析直流系统故障后的电流突变特征。

众所周知, 当发生故障时, 直流线路的电压会下

降,利用叠加原理就可以将发生故障的网络等效为正常运行的系统和故障电源单独作用系统的叠加。为了便于分析,将正常运行时的正极直流系统的电路网络简化为图 2。 U_M, U_N 分别为直流线路整流侧和逆变侧的电压,正常运行时, U_M 略大于 U_N ; I_M, I_N 分别为直流线路整流侧和逆变侧的电流,在正常运行时其幅值为负荷电流 I_h ,如果 I_M, I_N 都以流向线路为正,则有:

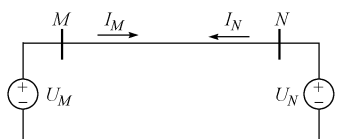
$$\begin{cases} I_M = I_h \\ I_N = -I_h \end{cases} \quad (1)$$


图 2 正常运行时正极直流系统

Fig. 2 A positive HVDC scheme when HVDC system has no fault

1.1 直流线路区内 f_1 处发生故障时的电流特征

根据叠加原理,当图 1 中直流线路内部 f_1 处发生故障时,可以等效为正常运行的电路网络和故障网络的叠加^[8],由于电压下降,相当于在正常运行的网络上叠加了一个负电源,其故障分量网络如图 3 所示。

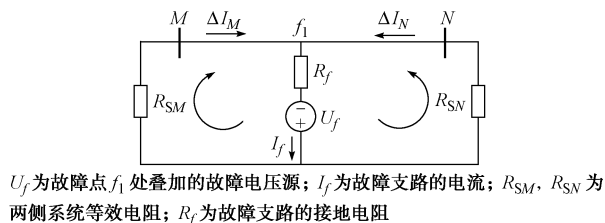


图 3 正极直流系统 f_1 故障处简图

Fig. 3 A positive HVDC scheme when fault occurs at f_1 point

由图 3 中的参考方向可知,在故障电源的作用下,流过整流侧和逆变侧的突变电流 ΔI_M 和 ΔI_N 都为正值。且有

$$\begin{cases} I_f = \Delta I_M + \Delta I_N \\ \Delta I_M = k_M I_f \\ \Delta I_N = k_N I_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta I_M, \Delta I_N$ 分别为整流侧、逆变侧的突变电流; k_M, k_N 为正数,且有 $k_M + k_N = 1$ 。

整流侧和逆变侧的突变电流可以通过下式计算得到:

$$\begin{cases} \Delta I_M = I_M - I_h \\ \Delta I_N = I_N + I_h \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)可知,直流输电线路发生区内故障时,

整流侧突变电流 ΔI_M 和逆变侧突变电流 ΔI_N 都是增加的,即两侧突变电流都具有正向突变。

1.2 整流站 f_2 处发生故障时的电流特征

在整流站 f_2 处发生故障时,故障分量网络如图 4 所示,可知:

$$\begin{cases} \Delta I_M = -I_{fR} \\ \Delta I_N = I_{fR} \end{cases} \quad (4)$$

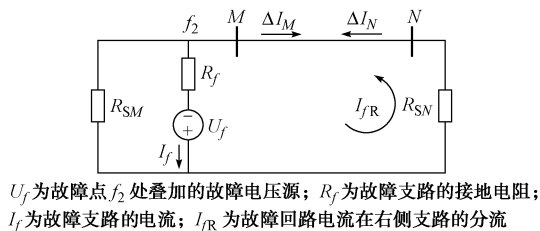


图 4 正极直流系统 f_2 故障处简图

Fig. 4 A positive HVDC scheme when fault occurs at f_2 point

由式(4)可知,整流侧 f_2 处发生故障(即直流线路区外故障)时,整流侧突变电流 ΔI_M 为负向突变,逆变侧突变电流 ΔI_N 为正向突变,即两侧突变电流方向相反。

1.3 逆变站 f_3 处发生故障时的电流特征

同理,当逆变站 f_3 处发生故障时,故障分量网络如图 5 所示,可知:

$$\begin{cases} \Delta I_M = I_{fL} \\ \Delta I_N = -I_{fL} \end{cases} \quad (5)$$

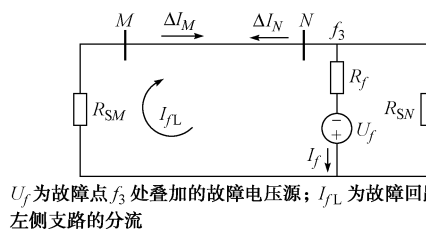


图 5 正极直流系统 f_3 故障处简图

Fig. 5 A positive HVDC scheme when fault occurs at f_3 point

由式(5)可知,逆变侧 f_3 处发生故障(即直流线路区外故障)时,整流侧突变电流 ΔI_M 为正向突变,逆变侧突变电流 ΔI_N 为负向突变,即两侧突变电流方向仍相反。

1.4 交流系统故障

交流系统故障对直流系统的影响是通过加在换流器上的换相电压的变化起作用的。下面分别论述整流侧和逆变侧交流系统故障对直流线路故障电流特征的影响。

当整流侧交流母线 f_4 处发生短路故障时,会导

致交流侧母线电压下降,从而导致整流侧直流电压下降,对于直流输电线路而言,等同于整流站 f_2 处发生故障;同理,当逆变侧交流母线 f_5 处发生短路故障时,会引起交流侧母线电压下降,从而导致逆变侧直流电压下降,对于直流输电线路而言,等同于逆变站 f_3 处发生故障。因此, f_4, f_5 处发生故障时的分析方法和结论分别与 f_2, f_3 处发生故障时相同。即直流输电线路两侧电流突变方向相反。

1.5 故障分析结论

综上所述,可得出如下结论:当直流线路发生区外故障时,线路两端所测电流突变方向相反;当直流线路发生区内故障时,线路两端所测电流突变方向相同。因此,可利用直流系统故障后的线路两端电流突变的特征,进行输电线路区内、区外故障的判别。

需要说明的是,故障分量网络中两端系统的等值是一个复杂的问题,故障后它们是时变的,且取决于两端系统的调节特性。为便于理解,图 3~图 5 中仅用固定阻抗表示它们,虽然与实际不符,但并不影响故障电流特征分析结论的正确性。

2 故障方向的判别原理

由第 1 节分析可知,直流线路区内故障时,线路两侧电流突变方向相同,都为正向突变;直流线路区外故障时,线路两侧电流突变方向相反。因此,根据电流突变方向可实现线路区内、区外故障的判别。

为了利用暂态电流的这一特征,在时域中可用突变电流在一段时间内的积分来提取突变,并将该突变与设定阈值进行比较来实现电流突变方向的判别。

要实现电流突变方向的判别会涉及到 2 个问题:①积分数据窗长度的选取;②定值的整定。总体来讲,所选取的数据窗越长,抗干扰能力越强;定值越高,选择性越好。在数据窗的选取上,考虑到发生故障后调节器的调节过程一般约为 30 ms,因此数据窗的长度不宜超过 30 ms;考虑到雷电干扰,则数据窗的长度不宜小于 3 ms。综合以上 2 点,选择 10 ms 的数据窗。在定值的整定上,考虑到故障稳态电流为 0.1 倍的额定电流^[7],因此门槛值的整定可按照 0.1 倍的额定电流在 10 ms 内的积分来选择。根据以上分析,可构造如下判据:

$$\sum_{m=1}^N \Delta i > k_r N I_{\text{set}} \quad (6)$$

式中: $m=1, 2, \dots, N$; N 为 10 ms 内的采样点个数; k_r 为可靠系数,可取 1.2~1.5; $I_{\text{set}}=0.1 I_n$, I_n 为直流输电系统的额定电流。

3 纵联保护的策略

鉴于直流输电系统的能量来源于整流侧,识别故障后的电流关断和系统重启功能都是在整流侧完成的。因此,直流输电系统的纵联保护仅需要逆变侧向整流侧提供故障信息,在判别出区内故障后通知逆变侧即可。采用数据单向传输策略,可减少一半的数据通信量。

当逆变侧电流减小时必然为逆变侧背后故障,是线路的区外故障,此时无需向对端传送故障信息。因此,仅需当逆变侧保护装置发现故障位于逆变侧前方时,即逆变侧电流增加时,才有向整流侧提供方向信息的必要。

当整流侧背后发生接地故障时,整流侧电流减小,是线路的区外故障,方向元件无需启动。只有当故障点在整流侧前方时,即整流侧电流增加时,整流侧电流突变方向元件才会启动。

综上所述,只有当整流侧的方向元件启动且收到逆变侧正方向的信息时,才是直流线路区内故障,才可以动作,故可靠性较高。整流站突变电流纵联方向元件动作的逻辑图如图 6 所示。

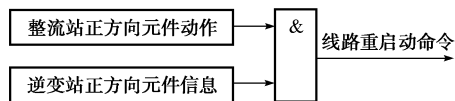


图 6 整流站突变电流纵联方向保护逻辑
Fig. 6 Fault component current pilot protection logic scheme at rectifier-side

4 仿真验证

±500 kV 双极直流输电系统仿真模型见图 1, 额定电流 2 kA, 线路全长 1 000 km, 用 PSCAD 进行电力系统仿真, MATLAB 进行算法仿真。

PSCAD 仿真时,直流输电线路采用频变参数模型,其杆塔结构见文献[9]。数据采样频率为 2 kHz,故障发生在 $t=0.5$ s 时刻,故障持续时间为 0.5 s。

4.1 直流输电线路区内 f_1 处发生故障的仿真结果

图 7 给出了距离 M 端 500 km 处发生正极金属性接地时,整流站线路突变电流纵联方向保护动作情况。从图 7 可以看出,当直流线路区内发生故障时,整流侧和逆变侧的故障极电流突变方向相同,在故障后的 10 ms 内,整流侧和逆变侧的方向元件都能可靠判别出电流突变的方向,并正确动作。

4.2 整流站 f_2 处发生故障的仿真结果

图 8 给出了整流侧平波电抗器外发生正极金属性接地时,整流站线路突变电流纵联方向保护动作情况。

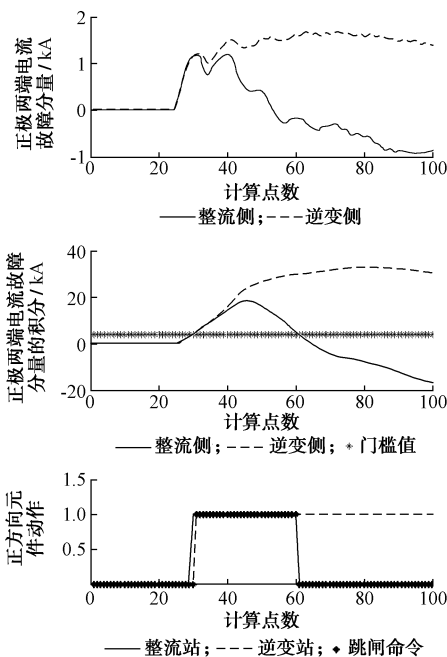


图 7 距 M 端 500 km 处金属性接地故障时故障极电流波形

Fig. 7 Results of current and relay protection operation at positive pole when metallic ground fault occurs at 500 km from the M side

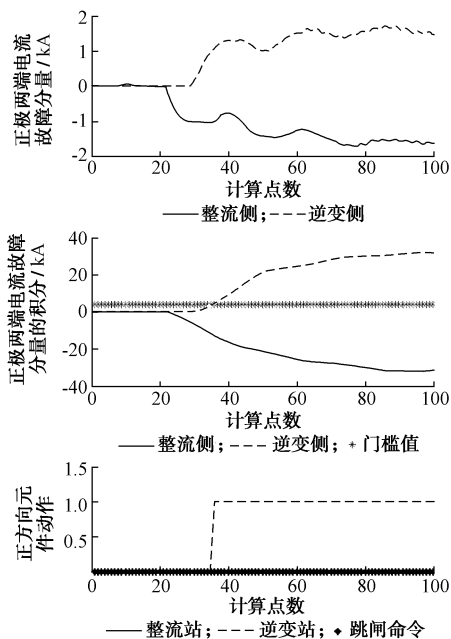


图 8 整流侧平波电抗器外金属性接地故障时故障极电流波形

Fig. 8 Results of current and relay protection operation at positive pole when metallic ground fault occurs beyond the line on rectifying side

从图 8 可知,整流侧平波电抗器外 f_2 处发生直流线路区外故障时,正极整流侧电流为负突变,逆变侧电流为正突变。因此,在整流站正极故障时,逆变

侧正极方向元件因电流正向突变而动作,但整流侧正极方向元件因电流负向突变而无法启动,从而保证了直流线路突变电流纵联保护在区外故障时不动作。

4.3 逆变站 f_3 处发生故障的仿真结果

图 9 给出了逆变侧平波电抗器外发生正极金属性接地时,整流站线路突变电流纵联方向保护动作情况。

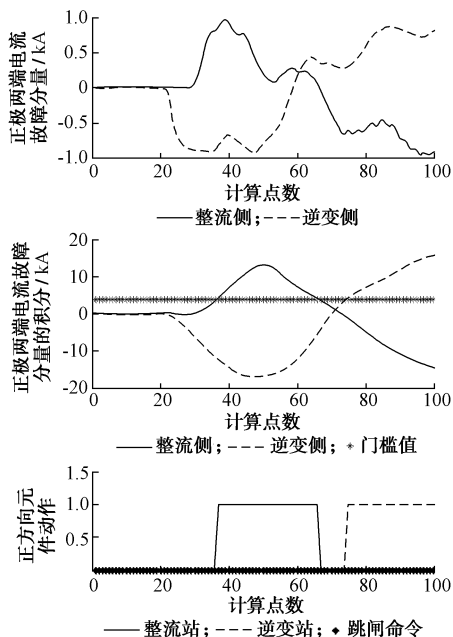


图 9 逆变侧平波电抗器外金属性接地故障时故障极电流波形

Fig. 9 Results of current and relay protection operation at positive pole when metallic ground fault occurs beyond the line on inverting side

从图 9 可知,逆变侧平波电抗器外 f_3 处发生直流线路区外故障时,正极整流侧电流具有正向突变,逆变侧电流具有负向突变。正极整流侧电流突变方向元件启动,而逆变侧电流突变方向元件不会启动,保证了区外故障时保护不动作。

由以上仿真分析可知,无论发生区内故障还是区外故障,整流侧和逆变侧的突变电流方向元件的仿真结果和理论分析是一致的,从而验证了理论分析的正确性。从判据的仿真结果来看:线路区内故障时,继电保护在 10 ms 内能可靠动作;线路区外故障时,保护装置均能可靠不动作。此外,当发生高阻接地故障时,故障极仍然能够正确动作,不拒动。限于篇幅,此处省略了仿真图。

5 故障极对健全极的影响

双极直流系统在发生单极故障时,除故障极电流、电压发生突变外,非故障极电气量由于电磁耦合

作用也会发生突变,下面就故障极对非故障极的影响问题进行分析。

图 10 给出了距离 M 端 500 km 处发生正极金属性接地时,负极整流站线路突变电流纵联方向保护动作情况。

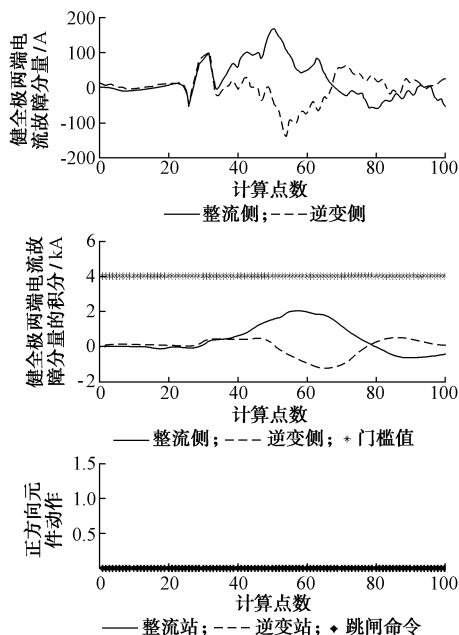


图 10 距 M 端 500 km 处金属性接地故障时健全极电流波形

Fig. 10 Results of current and relay protection operation at negative pole when metallic ground fault occurs at 500 km from the M side

从图 10 可以看出,在正极线路区内金属性接地故障时,健全极的整流侧和逆变侧电流突变量的积分都达不到设定的阈值,故健全极的整流侧和逆变侧的方向元件都能可靠不动作。

区内不同故障距离、过渡电阻下的仿真结果和区外故障情况下的仿真结果均表明,健全极的整流侧和逆变侧的方向元件都能可靠不动作。由于篇幅所限,此处省略了仿真图。

综上所述,单极故障时,故障极能够正确动作,不拒动,而非故障极则会由于电流未达到设定的阈值而可靠不动作。

6 结语

通过对直流输电线路故障电流特征的分析,本文提出了一种新的直流输电线路电流纵联保护原理,它仅利用线路两端电流的变化特征,就能有效识别直流线路区内、区外故障。该纵联方向保护原理简单,不需要两端数据严格同步,只需传送状态信号而对通道的通信速率要求不高,对采样频率的要求低。仿真结果表明,在各种工况下该原理都能够快

速、灵敏、可靠地区分区内、区外故障,具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 1-25.
- [2] 杨勇. 高压直流输电技术发展与应用前景[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9): 58-60.
YANG Yong. High voltage DC transmission technique and its future application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 58-60.
- [3] 高锡明, 张鹏, 贺智. 直流输电线路保护行为分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 96-99.
GAO Ximing, ZHANG Peng, HE Zhi. Analysis of performance of HVDC line protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 96-99.
- [4] 周红阳, 余江, 黄佳胤, 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. Issues over DC line differential protection[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 17-21.
- [5] 李爱民, 蔡泽祥, 任达勇, 等. 高压直流输电控制与保护对线路故障的动态响应特性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 72-75.
LI Aimin, CAI Zexiang, REN Dayong, et al. Analysis on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 72-75.
- [6] 王钢, 罗健斌, 李海峰, 等. 特高压直流输电线路暂态能量保护[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 28-31.
WANG Gang, LUO Jianbin, LI Haifeng, et al. Transient energy protection for ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 28-31.
- [7] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 高压直流输电线路电流差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 45-49.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 45-49.
- [8] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [9] SUONAN Jiale, GAO Shuping, SONG Guobing, et al. A novel fault-location method for HVDC transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(2): 1203-1209.

高淑萍(1970—),女,博士研究生,讲师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: gao.sp@stu.xjtu.edu.cn

索南加乐(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: relay@mail.xjtu.edu.cn

宋国兵(1972—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: song.gb@mail.xjtu.edu.cn

(下转第 86 页 continued on page 86)

A New Pilot Protection Principle for HVDC Transmission Lines Based on Current Fault Component

GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, ZHANG Jiankang, HOU Zhuo

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For high voltage direct current (HVDC) transmission lines, the transient fault characteristics are that, if the fault point is in the line, the currents measured at both convert stations will be increased, and with the same changing trends; if the fault point is out of the line, the current measured at one convert station is increased, and the current measured at the other convert station is decreased, and with the opposite changing trends. According to such characteristics, and using the currents measured at both convert stations, a new pilot protection principle for HVDC transmission lines based on current fault component is proposed. This principle has no limitation on the sampling frequency. Internal and external faults of the line can be effectively identified only using the current fault component at both convert stations. On the other hand, the setting principle of the current fault component is given. The simulation results show that the method proposed can identify the fault reliably and rapidly in different conditions.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51037005).

Key words: HVDC transmission line; pilot protection; fault component