

直流馈入下的输电线路电流差动保护动作特性分析

张璞, 王钢, 李海锋, 朱革兰

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 基于不同交流系统故障下的直流系统等值故障分量电流暂态特性, 分别对直流馈入环境下输电线路电流差动保护故障分量判据和稳态量判据的动作特性进行了分析。研究表明在一定条件下直流系统将降低电流差动保护动作的灵敏性, 且故障分量判据受影响的程度更为严重; 基于 PSCAD/EMTDC 的仿真验证上述理论分析的正确性。

关键词: 交直流互联电网; 电流差动保护; 换相失败; 灵敏性

Performance of current differential protection for transmission lines in HVDC/AC interconnected system

ZHANG Pu, WANG Gang, LI Hai-feng, ZHU Ge-lan

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the characteristics of equivalent DC-system power-frequency current variants under different fault conditions of AC system, the influence of HVDC system on the performance of two differential current relays using fault current and fault component current for transmission lines is analyzed respectively in the paper. It shows that the infeed of HVDC system can make the sensitivity of current differential relay lower under certain conditions, and the impact on fault component current differential relay is more serious. Extensive simulations using PSCAD/EMTDC testify the conclusion's correctness.

This work is supported by National Key Project of Scientific and Technical Supporting Programs Funded by Ministry of Science & Technology of China (No. 2006BAA02A30), National Natural Science Foundation of China (No. 50977032), the Crucial Field and Key Breakthrough Project in "Guangdong-Hongkong" (No. 2009498B3201), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(No.2009ZM0080).

Key words: AC/DC interconnected system; current differential relay; commutation failure; sensitivity

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0001-05

0 引言

在交直流互联电网中, 由于直流系统的运行特性, 交流电网故障暂态过程可能产生与纯交流电网运行环境所不同的特征, 如受端交流系统故障所引发的直流系统换相失败, 将造成直流系统的等值交流电流、阻抗、功率等电气量均会发生突变, 从而使交流系统故障特征发生改变。这必然会对现有交流保护的動作行为造成影响, 严重时将造成交流保护的不正确动作^[1-2]。随着光纤技术的发展, 分相电流差动保护已作为输电线路的主保护得到了广泛的应用。因此, 在直流馈入环境下, 分析输电线路电流差动保护的動作特性对确保交直流互联电网的安全稳定运行具有重要意义。

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大项目 “特高压输电系统开发与示范” 课题 30 (2006BAA02A30); 国家自然科学基金项目 (50977032); 粤港关键领域重点突破项目 (2009498B3201); 中央高校基本科研业务费 (2009ZM0080)

以往针对直流馈入环境下的交流保护动作特性的研究主要集中在直流系统谐波对传统交流保护的影响^[3]。而目前人们更多的是关注在故障暂态过程中, 直流系统动态特性对交流保护的影响: 文献 [4-5]利用电磁暂态仿真的方法就直流系统换相失败对交流保护的影响问题进行了定性的分析; 文献 [6-8]则通过建立工频变化量阻抗模型全面分析了直流系统换相失败对工频变化量方向保护的影响。

本文在对不同交流故障情况下的直流系统等值故障分量电流暂态特性仿真分析的基础上, 结合输电线路电流差动保护常用的故障分量判据和稳态量判据的特点, 对直流馈入环境下输电线路电流差动保护的動作特性进行了分析, 并基于 PSCAD/EMTDC 的仿真验证理论分析的正确性。

1 电流差动保护判据

输电线路电流差动保护在实际应用中为了确保在外部故障时保护不误动, 通常采用具有制动特性的保护判据。而且为了克服全电流差动保护在重负荷高

阻故障情况下灵敏度不足的缺点,还利用故障分量电流实现电流差动保护。因此,现有保护装置的电流差动继电器都含有故障分量差动和稳态量差动两部分。其具体的动作方程为:

$$\text{稳态分量: } \begin{cases} I_d > K_1 I_r \\ I_d > I_{\text{Thre}} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $I_d = |i_M + i_N|$ 为动作量, $I_r = |i_M - i_N|$ 为制动量, i_M 和 i_N 为线路两端电流; K_1 为制动系数; I_{Thre} 为动作门槛。

$$\text{故障分量: } \begin{cases} \Delta I_d > K_2 \Delta I_r \\ \Delta I_d > \Delta I_{\text{Thre}} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\Delta I_d = |\Delta i_M + \Delta i_N|$ 为动作量, $\Delta I_r = |\Delta i_M - \Delta i_N|$ 为制动量, Δi_M 和 Δi_N 为线路两端故障分量电流; K_2 为制动系数; ΔI_{Thre} 为动作门槛。

2 直流系统换相失败暂态特性分析

直流换相失败暂态过程的直流系统等值电流的变化特性是分析其对电流差动保护影响的关键所在。由于直流换相失败暂态过程较为复杂,尚无精确的定量计算方法,本文利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真的方法分析直流系统的等值电流变化情况。

基于 CIGRE 的 HVDC 标准模型对逆变侧交流母线故障时,直流系统注入交流系统的等值电流变化情况进行研究。为了考察不同容量的受端交流系统情况,在仿真中,对受端交流系统进行了一些修改,即在确保直流系统运行参数不变的条件下,修改了受端交流系统的短路容量。

图 1 为受端系统 $SCR = 5$, 逆变侧交流母线发生 AB 两相短路时,直流系统逆变侧(含无功补偿装置)注入交流系统的故障分量电流的变化情况。仿真计算中,故障时刻为 0 s,由于工频量的提取采用全波傅氏算法,因此图中 20 ms 后才有波形输出。图中纵坐标,幅值变化指该故障分量电流与正常电流的幅值比的变化情况,相位变化则是以故障分量电压相位为参考时的电流相位变化情况,其中电流取流向直流系统为正方向。参照文献[6]的分类,仿真中也考虑了四种不同换相失败情况:换相失败的临界状态、轻微换相失败、较严重换相失败和严重换相失败,过渡电阻取 165 Ω 、120 Ω 、30 Ω 、5 Ω ,分别对应图中曲线(1)~(4)。

由图 1 可见,不同过渡电阻情况下引起的直流换相失败不同,随之而产生的直流系统等值电流的变化也有所不同。故障分量电流幅值随着故障电阻的减少而增加,相位则是超前于故障分量电压。此外,当过渡电阻较小时,不同情况下的直流系统等

值电流的变化已经差别不大,如曲线(3)和(4)。

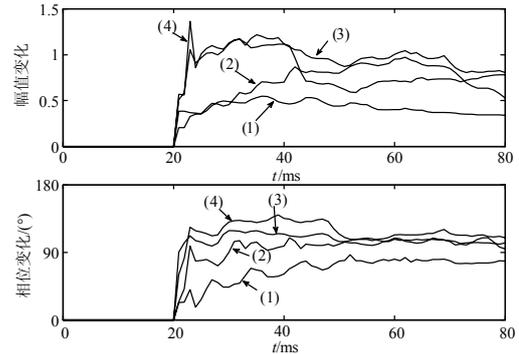


图 1 直流系统逆变侧等值故障分量电流

Fig.1 Equivalent power-frequency current variation of HVDC system under different commutation failure

3 直流系统对电流差动保护的影响

以图 2 所示的交直流互联电网为例,分析直流系统对输电线路电流差动保护的影响。由图 2 可知,对于交流输电线路而言,在区外故障时虽然由于直流系统的影响使得流经线路的电流特征发生变化,但是不管短路电流的特征如何变化,线路两端的短路电流必然还是满足基尔霍夫电流定律,即两端的电流近似相等。因此,区外故障时,直流系统对输电线路电流差动保护的影响,不管是故障分量判据还是稳态量判据均很小。下面重点分析线路区内故障时的情况。

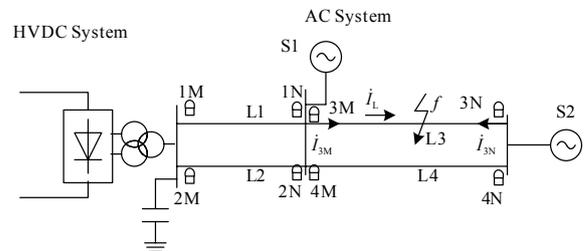


图 2 交直流互联电网

Fig.2 AC/DC interconnected system

3.1 故障分量判据

首先分析线路 L3 单回路运行时的情况,即相当于图 2 中的线路 L4 退出运行。考虑到与直流系统直接连接线路通常很短,在分析中不妨忽略线路 L1 和 L2,则此时线路 L3 故障时的故障分量电路如图 3 所示。图中, Z_{S1} 、 Z_{S2} 为线路 L3 两侧等值系统阻抗; Z_{3M} 和 Z_{3N} 为故障点两侧的线路阻抗; $\Delta i_{dc,eq}$ 为直流系统(含无功补偿装置)等值故障分量电流源。

在不考虑直流系统时,由图 3 可知线路 L3 故障时,其动作量为:

$$\Delta I_d = |\Delta i_{3M} + \Delta i_{3N}| = |\Delta i_r| \quad (3)$$

式中: $\Delta i_f = \frac{\Delta \dot{E}_f}{R_f + (Z_{S1} + Z_{3M}) \parallel (Z_{S2} + Z_{3N})}$, “ \parallel ”表示阻抗的并联。

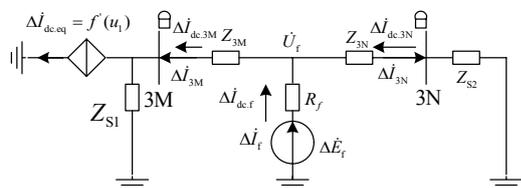


图3 L3内部故障时的故障附加电路

Fig.3 Superimposed circuit for the fault in L3

制动量为:

$$\Delta I_r = |\Delta i_{3M} - \Delta i_{3N}| = |k \Delta i_f| \quad (4)$$

式中: $k = \frac{(Z_{S2} + Z_{3N}) - (Z_{S1} + Z_{3M})}{Z_{S1} + Z_3 + Z_{S2}}$, $Z_3 = Z_{3M} + Z_{3N}$ 。

考虑直流系统时,动作量和制动量则分别变为:

$$\Delta I'_d = |\Delta i_f + \Delta i_{dc,f}| \quad (5)$$

$$\Delta I'_r = |k \Delta i_f + (\Delta i_{dc,3M} + \Delta i_{dc,3N})| \quad (6)$$

式中: $\Delta i_{dc,3M}$ 、 $\Delta i_{dc,3N}$ 和 $\Delta i_{dc,f}$ 分别为直流系统等值故障分量电流 $\Delta i_{dc,eq}$ 在线路两侧以及故障点的分流,由图3可知有 $\Delta i_{dc,f} = \Delta i_{dc,3M} - \Delta i_{dc,3N}$ 。

由式(5)和式(6)可知,直流系统的存在是否会对故障分量差动保护原理叠加新的影响,主要由 $\Delta i_{dc,eq}$ 与 Δi_f 之间关系以及 $\Delta i_{dc,eq}$ 在交流系统的分布特性决定,且都包含了两方面的因素:相位关系和幅值关系。

对于 $\Delta i_{dc,eq}$ 与 Δi_f 的关系,从相位上看,由图1可知在各种情况下直流系统的等值故障分量电流 $\Delta i_{dc,eq}$ 均超前于故障分量电压而呈现出容性,而且除交流故障未引发换相失败的情况外,超前的角度均大于 90° ,这与纯交流系统中的故障分量电流的特征是相反的。考虑到纯交流系统中,一般情况下 Δi_f 滞后故障分量电压接近 90° ,因此, $\Delta i_{dc,f}$ 的存在对 Δi_f 具有削减作用。即直流系统的存在将造成动作电流 $\Delta I'_d$ 的减少。

而对于制动电流,由式(6)可知,直流电流的影响还取决 k 。考虑到线路阻抗和系统阻抗以电抗为主,不妨假设其为纯电抗,则 k 为一实数。则有:

a) 当 $|Z_{S2} + Z_{3N}| = |Z_{S1} + Z_{3M}|$ 时,有 $k = 0$,此时直流系统的存在使制动电流 $\Delta I'_r$ 增大程度最大,由0增大到 $|\Delta i_{dc,3M} + \Delta i_{dc,3N}|$;

b) 当 $|Z_{S2} + Z_{3N}| < |Z_{S1} + Z_{3M}|$ 时,则 $k < 0$,此时由于 $\Delta i_{dc,3M} + \Delta i_{dc,3N}$ 与 $k \Delta i_f$ 夹角小于 90° 而对制动电流 $\Delta I'_r$ 同样起到增大作用;

c) 当 $|Z_{S2} + Z_{3N}| > |Z_{S1} + Z_{3M}|$,则 $k > 0$,此时由于 $\Delta i_{dc,3M} + \Delta i_{dc,3N}$ 与 $k \Delta i_f$ 夹角大于 90° ,因此直流系统的存在可能使制动电流 $\Delta I'_r$ 减少。

综合上面的分析可知,直流系统的存在将造成电流差动保护故障分量判据中的动作量减少,但制动量则对应于不同的故障条件既可能增加,也可能减少。从对保护的影响而言,考虑影响最严重的情况,即情况a)和b),此时直流系统的存在将引起制动量增加,从而降低了保护动作的灵敏性。

上面是定性方面的,而 $\Delta i_{dc,eq}$ 与 Δi_f 间的大小关系以及 $\Delta i_{dc,eq}$ 在交流电网的分流情况则决定了直流对电流差动保护的影响程度。显然, $\Delta i_{dc,eq}$ 与 Δi_f 相比越小则直流系统的影响程度将越小。由式(3)可知,交流系统越强(即 Z_{S1} 和 Z_{S2} 越小),过渡电阻越小, Δi_f 将越大。而与此同时过渡电阻越小时, $\Delta i_{dc,eq}$ 也将越大,但是由于直流系统的调节作用,其增加的速度显然要低于 Δi_f 。因此随着过渡电阻的减少, $\Delta i_{dc,eq}$ 与 Δi_f 的大小比值将大大减少,使得直流换相失败对交流保护的影响程度反而减轻。而对于 $\Delta i_{dc,eq}$ 在交流系统中的分布情况,则由图3可知系统阻抗 Z_{S1} 的存在使得流入线路L3的直流系统等值电流减少,因此 Z_{S1} 越小直流系统对电流差动保护的影响也将越小。反之极端情况下,直流系统对与其直接连接的线路影响最大。

3.2 稳态量判据

由叠加原理可知,故障后电流可以分解为故障前负荷电流与故障分量电流之和。因此,对于不考虑直流系统的情况,在忽略线路电容电流时可知线路L3单回线运行方式下发生故障时,有:

$$I_d = |\dot{i}_{3M} + \dot{i}_{3N}| = |(-\Delta i_{3M} + \dot{i}_L) + (-\Delta i_{3N} - \dot{i}_L)| = |\Delta i_f| \quad (7)$$

$$I_r = |\dot{i}_{3M} - \dot{i}_{3N}| = |\Delta i_{3M} - \Delta i_{3N} - 2\dot{i}_L| = |k \Delta i_f - 2\dot{i}_L| \quad (8)$$

考虑直流系统时,动作量和制动量则分别变为:

$$I'_d = |\Delta i_f + \Delta i_{dc,f}| \quad (9)$$

$$I'_r = |k \Delta i_f - 2\dot{i}_L + (\Delta i_{dc,3M} + \Delta i_{dc,3N})| \quad (10)$$

通过与式(5)和式(6)对比可知,稳态量判据与故障分量判据的不同地方在于制动量中增加了电流负荷分量的作用,这使其增加了一个影响因素。当负荷电流较小或者过渡电阻较小时,有 $\Delta i_f \gg 2\dot{i}_L$,此时可忽略负荷电流的影响,即直流系统对其影响与故障分量判据相似。而当线路负荷电流较大且过渡电阻较大时,则由于负荷电流 \dot{i}_L 较大,而 Δi_f 和 $(\Delta i_{dc,3M} + \Delta i_{dc,3N})$ 较小, \dot{i}_L 在制动电流 I_r 中

占据了主导地位，因此可忽略直流系统对制动量的不利影响因素，仅需像在纯交流电网中如何考虑重负荷对稳态量判据的影响。总体而言，直流系统对电流差动保护稳态量判据的影响要比故障分量判据小。

3.3 双回线运行情况分析

对于双回线运行的情况，由于另一回线路的存在必然使得流入故障线路的直流系统等值电流减少，从而使其受直流系统的影响比单回线运行时小。

4 仿真验证

为了验证上面的理论分析，采用图 2 所示的系统进行仿真分析。其中直流系统采用了 CIGRE 的 HVDC 标准模型，受端交流系统的电源 S1 和 S2 均取 $SCR=2.5$ ，输电线路 L1、L2 和 L3、L4 分别为 2 km 和 80 km，均采用分布参数模型，参数为：

$$R_1 = 0.0255 \Omega/\text{km}, R_0 = 0.235 \Omega/\text{km}$$

$$L_1 = 0.2659 \Omega/\text{km}, L_0 = 1.1836 \Omega/\text{km}$$

$$C_1 = 0.0135 \mu\text{F}/\text{km}, C_0 = 0.007608 \mu\text{F}/\text{km}$$

图 4 为线路 L3 单回运行时在不同地点发生单相接地故障时，其稳态量以及故障分量动作电流与制动电流比值的变化情况。仿真中，过渡电阻取 50Ω ，此时故障将引发直流系统轻微换相失败。为了对比直流系统的影响，还考虑了纯交流系统的情况，对于有无直流系统这两种情况，通过改变线路两侧电源相位使流过线路 L3 输送的功率相当。分析计算中，采样频率取每周 48 个点，相量的提取均采用了全波差分傅式算法。图中，曲线组 (1) 和 (2) 分别对应故障点距离 3M 端 70 km 和 10 km 两种情况，虚线为不考虑直流系统的情况，实线为存在直流系统的情况。故障发生在 0 s，图中的横坐标为时间 (ms)，纵坐标则是动作量和制动量的比值。

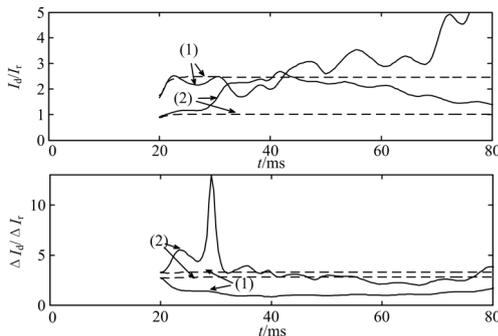


图 4 L3 不同地点故障时动作电流与制动电流的比值
Fig.4 Ratio of operating current and restraining current for faults in L3

对于故障分量判据，由图 4 可知，当故障发生在距 3M 端 70 km 时 (曲线组 (1))，直流系统的存

在使 $\Delta I_d/\Delta I_r$ 明显减少；而发生在距 3 M 端 10 km 时，则反而使得 $\Delta I_d/\Delta I_r$ 有所增加。这是因为上述故障条件分别对应于 $k < 0$ 和 $k > 0$ 两种条件，虽然直流系统的存在均造成动作量 ΔI_d 减少，但是由于前者造成制动量 ΔI_r 的增加，而后者减少，因此使得 $\Delta I_d/\Delta I_r$ 发生了不同的变化。而对于稳态量判据，虽然直流系统的存在对于 I_d/I_r 的影响与故障分量的相似，但其影响的程度则比故障分量判据的要小。

图 5 则是在距 3M 端 70 km 发生不同过渡电阻单相接地故障时，稳态量以及故障分量动作电流与制动电流比值的变化情况。仿真中考虑了 50Ω 、 10Ω 和 1Ω 三种情况。图中，虚线为不考虑直流系统的情况，实线为存在直流系统的情况。由图可见，对于故障分量在没有直流系统时，不同过渡电阻下 $\Delta I_d/\Delta I_r$ 相差很少；而存在直流系统时，则以过渡电阻为 50Ω 时影响最大，过渡电阻越小影响越小。对于稳态量判据，直流系统则可能造成 I_d/I_r 的增加或减少，这是负荷电流的存在造成 I_r 不同于 ΔI_r 的变化特性所致，但其影响程度同样比故障分量判据的要小。

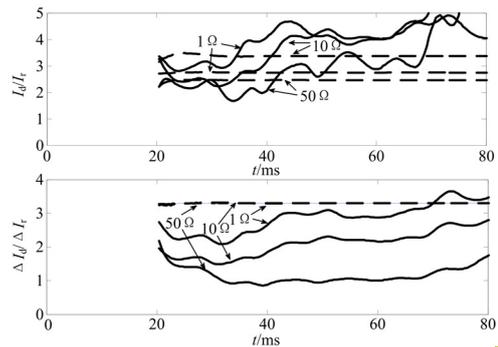


图 5 不同过渡电阻时动作电流与制动电流的比值
Fig.5 Ratio of operating current and restraining current for faults with different fault resistance

图 6 则是与直流系统直接连接线路 L1 单回线运行时发生不同过渡电阻单相接地故障时，稳态量以及故障分量动作电流与制动电流比值的变化情况。仿真中考虑了 100Ω 、 50Ω 、 10Ω 和 1Ω 四种情况。其中， K 为制动系数。对于这种线路，在不考虑直流系统时将有 $\Delta I_d/\Delta I_r = 1$ 。由图可见，直流系统对故障分量判据的影响特点与前面分析情况是一致的，在过渡电阻为 50Ω 且刚好引起直流系统轻微换相失败时影响最严重，此时故障分量判据将难以正确判别出区内故障，因此其危害最大。而对于稳态量判据，则随着过渡电阻的减少 I_d/I_r 不断增大，这与纯交流系统下的 I_d/I_r 的变化特征是相同的。

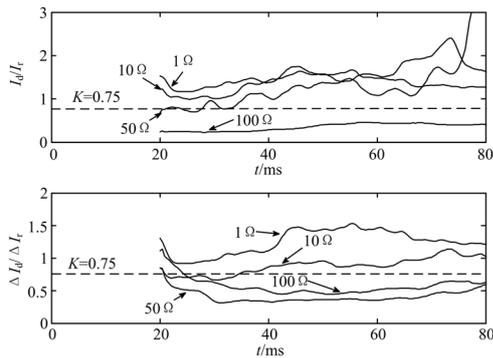


图6 L1故障时动作电流与制动电流的比值

Fig.6 Ratio of operating current and restraining current for faults in L1

5 结论

本文对直流馈入环境下输电线路电流差动保护故障分量判据和稳态量判据的动作特性进行了分析, 可得以下结论:

a) 直流系统的存在, 在一定条件下均会对输电线路电流差动保护的稳态量判据和故障分量判据造成影响, 降低其动作的灵敏性。其中对故障分量判据的影响更为严重。

b) 直流系统对电流差动保护的影响程度与交流系统情况及故障的严重程度有关。输电线路靠近直流系统侧所连接的交流电源越强、故障电阻越小, 直流系统的影响将越小; 与单回线运行相比, 双回线运行时直流系统的影响也将越小。

参考文献

- [1] 刘之尧, 唐卓尧, 张文峰, 等. 直流换相失败引起继电保护误动分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 104-107.
LIU Zhi-yao, TANG Zhuo-yao, ZHANG Wen-feng, et al. Analysis of protective relaying mal-operation caused by commutation failure in HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 104-107.
- [2] 鲁德锋, 毛为民, 洗伟雄. 直流换流站换流失败引起继电保护不正确动作的分析及防范措施探讨[J]. 电力设备, 2006, 7(1): 54-56.
LU De-feng, MAO Wei-min, XIAN Wei-xiong. Discussion on incorrect action of protection caused by commutation failure in DC converter station and its countermeasures[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(1): 54-56.
- [3] Andersson F, Juhlin L E, Jones T. AC line protection operating conditions in the near vicinity of HVDC installations[C].//Proceedings of Fifth International Conference on Developments in Power System Protection. 1993. 119-122.
- [4] 邵震, 王炳炎. 直流输电换相失败对交流侧继电保护的影响[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 42-45.

- SHAO Zhen, WANG Bing-yan. Analysis on influence of HVDC commutation failure on AC relay protection[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 42-45.
- [5] 刘强, 蔡泽祥, 刘为雄, 等. 交直流互联电网暂态功率倒向及对继电保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 34-38
LIU Qiang, CAI Ze-xiang, LIU Wei-xiong, et al. Transient power Converse in AC/DC interconnected power grid and its influence on protective relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 31(7): 34-38.
- [6] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(一) 直流系统等值工频变化量阻抗模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 41-46.
LI Hai-feng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system(I) -DC-system impedance of power-frequency component variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 41-46.
- [7] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(二) 故障线路的方向保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 47-53.
LI Hai-feng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system (II) - Response of directional protection for faulted line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 47-53.
- [8] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(三) 非故障线路的方向保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 43-48.
LI Hai-feng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system (III) - Response of directional protection for unfaulted line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 43-48.
- [9] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHU Sheng-shi. The theory and technology of relay protection in grid system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

收稿日期: 2010-02-08; 修回日期: 2010-03-30

作者简介:

张璞(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为交直流系统故障分析及保护新原理;

王钢(1966-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护、控制及自动化领域的教学与科研工作; E-mail: wg_scut@263.net

李海锋(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统故障分析与继电保护的教学与科研工作。E-mail: lihf@scut.edu.cn