

换相失败对距离保护的影响分析及防范措施的研究

黄少锋, 费彬, 申洪明, 赵远

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 交直流互联系统换相失败时引起的电磁暂态过程与纯交流环境时不同, 因而会对距离保护的动作性能产生影响。以交流系统单相接地故障引发换相失败为例, 将换相失败等效为双故障源模型, 详细分析了换相失败对接地距离继电器的影响。分析结果表明传统的傅氏算法在换相失败时不能很好地准确测量短路电抗值。然后定义了混联系统中交流保护风险因子的概念及其表达式, 并进一步地从风险因子和算法两方面提出了相应的解决措施。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了结论的准确性, 并对几种可能的解决措施进行了比较, 比较结果表明解微分方程算法在换相失败时性能更好。

关键词: 换相失败; 距离保护; 非周期分量; 风险因子; 微分方程算法

Effect of commutation failure on distance protection and the countermeasures

HUANG Shao-feng, FEI Bin, SHEN Hong-ming, ZHAO Yuan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The transient process caused by commutation failure in AC-DC interconnected system is not the same as that in pure AC system, which has effect on the performance of distance protection. This paper takes single-phase earth fault as an example to analyze the effect of commutation failure on ground distance relay based on double fault sources model. Analysis results show that the calculated short circuit reactance is not accurate by using Fourier algorithm during commutation failure. Then, AC risk factor is defined and its expression is also provided. Then, the countermeasures are put forward based on AC risk factor and protection algorithm. At last, a large amount of simulation results using PSCAD/EMTDC prove the conclusion to be reasonable and the countermeasures are compared. The comparison results show that differential equation algorithm has better performance in commutation failure environment.

This work is supported by National Key Basic R & D Program of China (973 Program) (No. 2012CB215206).

Key words: commutation failure; distance protection; aperiodic component; risk factor; differential equation algorithm

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0123-06

0 引言

目前我国正在大力建设直流输电网, 直流输电从根本上避免了交流输电存在的稳定问题。直流输电系统还具有如下优点: 不受电力系统同步运行的限制, 可以实现不同频率或相同频率交流系统之间的非同步连接; 直流线路电流和功率的调节比较容易而且迅速, 直流短路电流较小等^[1]。但是直流输电特有的一些故障形式对交流侧的保护产生了不利的影响, 其中换相失败故障就是最常见的一种故障形式。

交直流互联系统中, 交流侧故障会引起直流系

统的控制响应^[2-3], 从而使得交直流互联系统中的暂态过程与纯交流环境不尽相同。交流电网中保护原理众多, 在直流馈入环境下不同保护原理受影响的情况不同。文献[4-11]详细分析了直流馈入下对交流电网继电保护的影响, 其中对距离保护也进行了相应研究。其中文献[5]认为直流系统等值电流作用于过渡电阻会造成测量电抗的波动变化, 会造成保护的不正确动作; 文献[6]认为直流系统换相失败期间向交流侧注入的非周期分量、低频分量以及高频分量是引起保护不能正确测量的根本原因。但文章缺乏有关换相失败对距离保护影响的理论推导, 并且对防范措施的研究也略显不足。

本文详细分析了交流线路发生金属性接地故障

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB215206)

时换相失败对接地距离继电器的影响。并通过分析指出换相失败期间流入交流系统的非周期分量对距离保护产生了一定的影响。进一步定义了交流保护风险因子的概念,然后重点研究了相应的解决措施。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了结论的准确性。

1 距离保护影响分析

1.1 基于傅氏算法的距离保护

图 1 表示的是在交直流互联系统中发生交流侧故障时的等效电路图。

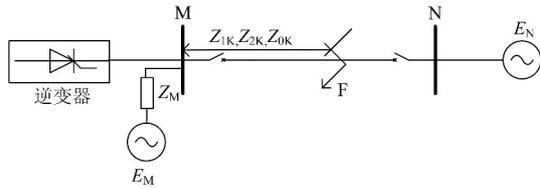


图 1 发生故障时的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit when fault occurs on the AC side

当交流侧故障引发逆变器发生换相失败时,此时无论直流系统采用何种控制方式,也无论直流系统逆变之后为何种非线性特征,对于交流系统的电气量来说,总是可以将等值直流系统的作用分解为基频分量、非周期分量与各种谐波分量的叠加。对于谐波分量可以采用滤波器予以滤除,而继电保护主要是基于工频量的保护。因此图 1 可以等效为图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)的叠加。图 2(a)中, I_L 表示的是负荷电流;图 2(b)中, Z_{1K} 、 Z_{2K} 、 Z_{0K} 分别表示保护 M 侧保护安装处到故障点处的正序、负序、零序阻抗;图 2(c)中 Δi_{dc} 表示的是等值直流故障源产生的故障电流。

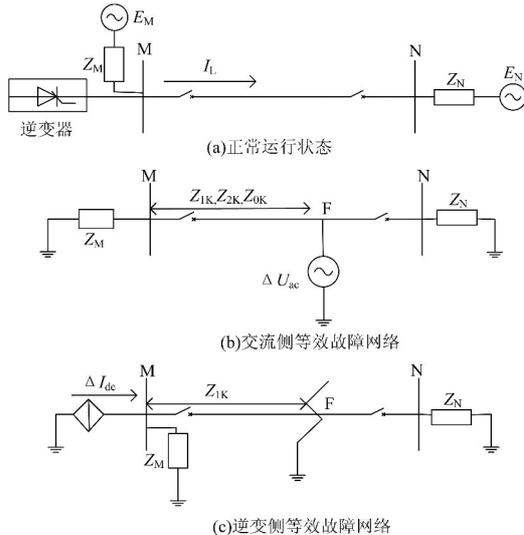


图 2 叠加等效电路图

Fig. 2 Superposition circuit diagram

由于直流系统中换流变的网侧为 Y 形接地,阀侧为 Y 形不接地或者 Δ 形,因此无论交流系统是否发生接地故障,直流系统的等效故障源均不会向交流系统注入零序分量,此时利用叠加原理可以得出 M 侧保护安装处的测量电压为

$$\dot{U}_m = C_1 \dot{I}_1 Z_{1K} + C_2 \dot{I}_2 Z_{2K} + C_0 \dot{I}_0 Z_{0K} + \dot{I}_L Z_{1K} + C \Delta i_{dc} Z_{1K} \quad (1)$$

式中: \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、 \dot{I}_0 表示的是图 2(b)中故障点处的正序、负序、零序电流; C_1 、 C_2 、 C_0 表示的是 M 侧保护安装处的三序电流分配系数; C 表示图 2(c)中 Δi_{dc} 在保护安装处的分配系数。

由于输电线路存在 $Z_{1K}=Z_{2K}$, 因此对式(1)进行变形,可得

$$\dot{U}_m = (C_1 \dot{I}_1 + \dot{I}_L + C_2 \dot{I}_2 + C_0 \dot{I}_0 + C \Delta i_{dc}) Z_{1K} + C_0 \dot{I}_0 Z_{0K} - C_0 \dot{I}_0 Z_{1K} + C \Delta i_{dc} Z_{1K} - C \Delta i_{dc} Z_{1K} \quad (2)$$

对式(2)进行化简可得

$$\dot{U}_m = (C_1 \dot{I}_1 + C_2 \dot{I}_2 + C_0 \dot{I}_0 + \dot{I}_L + C \Delta i_{dc} + C_0 \dot{I}_0 \frac{Z_{0K}}{Z_{1K}} - C_0 \dot{I}_0) Z_{1K} + C \Delta i_{dc} (Z_{1K} - Z_{1K}) \quad (3)$$

因为 $C_1 \dot{I}_1 + \dot{I}_L + C_2 \dot{I}_2 + C_0 \dot{I}_0 + C \Delta i_{dc}$ 为保护安装处的电流,不妨记为 \dot{I}_m , 此时式(3)可以进一步化简为

$$\dot{U}_m = (\dot{I}_m + C_0 \dot{I}_0 (\frac{Z_{0K}}{Z_{1K}} - 1)) Z_{1K} + C \Delta i_{dc} (Z_{1K} - Z_{1K}) \quad (4)$$

考虑到零序补偿系数 $K = \frac{Z_{0K} - Z_{1K}}{3Z_{1K}}$, 因此式(4)可变为

$$\dot{U}_m = (\dot{I}_m + 3KC_0 \dot{I}_0) Z_{1K} \quad (5)$$

由于式(5)中 $C_0 \dot{I}_0$ 就是保护安装处的总零序电流, 因此可得

$$\frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m + 3KC_0 \dot{I}_0} = Z_{1K} \quad (6)$$

因此在金属性接地故障时,从理论上讲,换相失败故障的工频分量对接地距离继电器并没有影响,显然 N 侧保护也无影响。

1.2 暂态量分析

在没有任何故障时,由于交流滤波器的缘故,流入交流系统的电流主要以基波分量为主^[1]。表 1 列出了图 1 在线路中点处发生 A 相接地故障引发换相失败时利用 Prony 分析得到的流入交流系统电流的非周期及谐波分量。假设故障发生的时刻为 t_0 , 则表 1 中 $t=0$ ms 表示数据窗位于 $[t_0, t_0+20]$ 之间; $t=10$ ms 表示数据窗位于 $[t_0+10, t_0+30]$ 之间,以此类推。

通过表 1 可以看出,故障开始的第一个周波内,非周期分量非常大,与基波分量的幅值几乎相当;而且故障后第二个周期内非周期分量仍然很大,这与纯交流环境相差较大。因此,在故障开始的一段

时间内, 傅氏算法受非周期分量的影响较大, 可能无法准确测量。相比于 M 侧距离保护而言, 由于 N 侧背后连接的是纯交流系统, 显然受暂态量影响较小。

表 1 换相失败时电流谐波含量

Table 1 Harmonic content during commutation failure

t/ms	电流谐波幅值/kA				
	0 Hz	50 Hz	100 Hz	150 Hz	500 Hz
0	8.31	8.32	0.22	0.15	0.055 4
10	4.24	5.87	0.33	0.13	0.044 1
20	1.25	6.39	0.52	0.08	0.033 5
30	0.41	6.86	0.34	0.06	0.009 0

2 解决措施

通过上面的分析可以得出在交直流互联系统中换相失败会对距离保护产生不良的后果。为了更好地研究交直流互联系统对交流侧继电保护的影响, 下文探讨性地给出一个衡量指标, 即交流保护风险因子 γ 。

2.1 交流保护风险因子的研究

交流保护风险因子是分析交流侧保护受换相失败的影响程度的一个指标。 γ 值越大, 表示交流保护受影响程度越大; 反之, 保护受影响程度越小。下面从理论层面定性地给出交流保护风险因子的表达式。

随着 HVDC 输电容量越来越大, 交流系统相对直流系统传输的容量而言, 已经不能算是强系统, 直流输送容量越大, 对交流系统的影响也就越大; 对一定的直流传输容量而言, 显然受端系统越强, 其受直流系统扰动的能力就越强。因此保护风险因子理应与受端系统的强度(即 SCR)成反比, 而与直流系统传输的容量成正比; 考虑到交流系统可能是多回输电方式, 如果在消除双回线零序互感的影响前提下, 每回输电线路注入的非周期分量与换流母线处总的非周期分量存在一个分支系数 c , 显然 c 与 γ 成正比。考虑到上述因素, 交流侧保护风险因子可以如式(7)所示。

$$\gamma \propto \frac{C}{SCR} P_{dc} \quad (7)$$

式(7)中, P_{dc} 表示额定直流功率。

通过式(7)可以得出, 在一定的故障条件下, 要想降低交流保护风险因子, 一般有三种措施: 1) 加强受端系统强度, 即增大 SCR; 2) 减小比值 c 的大小。尽管从数学层面确定 c 的取值非常困难, 但明显采用多回输电方式将会使得每回输电线路所受的

影响降低; 3) 既增强受端系统强度, 又采用多回输电方式。

2.2 保护不同算法的分析

考虑到改变受端系统强度在现场中不易实现, 下面着重从保护算法出发来解决换相失败对距离保护的影响。

傅里叶算法能滤除一切整数次谐波, 但短路电流中含有非周期分量时, 则计算误差较大; 两点乘积算法、导数法及半周积分算法等都需要输入信号为纯正弦信号, 对非周期分量抑制作用差; 解微分方程算法可以消除非周期分量的影响, 但受高次谐波的影响。考虑到换相失败期间流入交流系统的电流中主要以非周期分量为主, 因此建议在交直流互联系统中采用解微分方程算法来实现保护的测量。

微分方程算法的特点如下^[12]:

(1) 它不需要用滤波器滤除非周期性分量。因为电流中的非周期性分量符合算法所依据的方程, 显然低频分量也是满足微分方程算法的。而且微分方程算法只要求采用低通滤波器, 相比较带通滤波器而言, 其算法时间可以较短。

(2) 微分方程算法不受电网频率变化的影响。微分方程算法所依据的方程在相当宽的一个频段内都成立, 因而可以在很大的频率范围内准确地计算出故障线路的正序电阻和正序电抗。

通过解微分方程算法特点的描述可以看到微分方程算法不受非周期分量的影响, 而且在金属性接地故障情况下, 保护安装处的电流和电压会完全满足微分方程算法的要求, 因此解微分方程算法可以准确计算短路电抗值。即在金属性接地故障情况下, 解微分方程算法的 γ 值几乎为零, 远小于其他保护算法的 γ 值。

3 仿真验证

仿真验证分为两大部分, 第一部分是基于实际录波图的仿真验证; 第二部分是基于 PSCAD/EMTDC 的仿真分析。

3.1 故障录波仿真分析

2010年11月7日10分30秒北增甲线在2s时间内相继发生了两次故障(CN故障单跳→重合C相成功→BC相间故障永跳), 导致了广州换流站、穗东换流站、肇庆换流站、宝安换流站出现短时换相失败情况。

其中 BCN 故障造成周围换流站相继发生了换相失败故障, 如广州换流站、肇庆换流站以及宝安换流站等。表 2 给出利用软件分析出的几个不同时刻 C 相接地距离继电器的测量值(时标以录波图给

出的时间为准,电抗值都是故障后至少 20 ms 后的数据,故障开始的时刻为 1 959.968 ms)。

通过表 2 中 NO.1 可以看出,测量电抗值一开始并不稳定,故障后大约 35 ms 后才趋于稳定;NO.2 列出了 1 983.292 ms 时暂态量的分析结果,结果表明此时暂态量很大。这也进一步证明了换相失败期间,距离继电器很难一开始就能正确跟踪实际短路电抗值。

表 2 短路电抗计算值
Table 2 Measured value of short reactance

NO.	t/ms	X/Ω
1	1 981.626	1.91
	1 983.292	1.77
	1 988.290	1.87
	1 989.123	1.93
	1 993.288	2.23
	1 994.954	2.25
2	直流分量/A	基波分量/A
	3.253	8.354

3.2 基于 PSCAD/EMTDC 仿真分析

在国际大电网会议 (GIGRE) 直流输电标准测试系统基础上进行了相应的修改,如图 3 虚线框所示。受端系统 AC1 与 AC2 的额定电压为 230 kV,直流线路的额定电压为 500 kV,额定功率为 1 000 MW。线路 T₁、T₂ 的正序参数为: $r_1=0.025e-3(\Omega/m)$, $x_1=0.3e-3(\Omega/m)$; 零序参数 $r_0=0.075e-3(\Omega/m)$, $x_0=0.9e-3(\Omega/m)$ 。线路全长为 100 km,采样频率为 2 000 Hz,故障时间为 0.5 s,持续时间为 0.2 s。采用傅里叶算法时为了减小非周期分量的影响,采样数据先经过差分处理;为了使微分方程算法计算准确,采样数据必须先通过低通滤波器滤除,以消除由分布电容引起的高频分量的影响。需要指出的是只有在 3.3 节仿真分析中线路 T₂ 才投入运行。

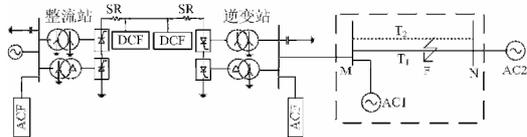


图 3 PSCAD 仿真模型

Fig. 3 PSCAD simulation mode

3.2.1 换相失败对保护算法的影响

图 4 表示的是不同受端系统强度下线路中点发生了 A 相接地故障时短路电抗的仿真结果。通过图 4(a)熄弧角的大小可以看出交流侧故障引发了换相失败故障;图 4(b)可以看出无论系统强度如何,故

障刚开始时,测量电抗值并不稳定,测量误差较大。这是由于故障后的较短时间内,数据窗内数据包含了大量的非周期分量,如图 4(b)所示,测量电抗大约需要 0.55 s 左右时才趋于稳定。

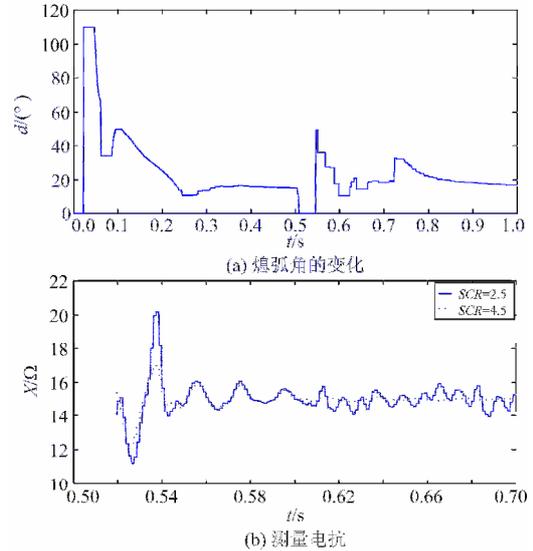


图 4 接地故障时 M 侧计算短路电抗值

Fig. 4 Measured reactance at M side when grounding fault occurs

因此可以看出即使采用差分算法也不能消除非周期分量的影响。继电保护首先要保证不误动,因此要保证距离保护的可靠性,需要牺牲保护的灵敏性。距离保护要做到能准确跟踪实际的短路电抗值,就要延时一段时间,牺牲距离保护 I 段的速动性。

3.2.2 系统强度对保护的影响

如图 3 所示的仿真模型中,要降低换相失败对保护的影响,最直接的方法便是增强系统 AC1 的强度。图 4 中实线表示当 $SCR_{AC1}=2.5$ 时测量短路电抗值;虚线表示当 $SCR_{AC1}=4.5$ 时 M 侧系统测量电抗值。通过图 4 中不同系统强度下测量电抗的对比可以看出,当增大系统强度时虽然不能够消除非周期分量带来的影响,但能使测量阻抗的波动性降低,而且测量误差也变小。

3.2.3 多回线对距离保护的影响研究

图 5 表示的是双回线与单回线测量结果的对比示意图。其中双回线考虑到了零序互感后进行补偿算法后的测量结果^[13]。其中图 5(a)中受端系统强度都一样,均为 $SCR=2.5$;图 5(b)中双回线时 $SCR_{AC1}=4.5$ 。通过图 5(a)可以看出,双回线下测量结果的波动性比单回线下要小,能更快地趋向准确值;从图 5(b)可以看出,既加强受端系统强度又采用双回线

输电模式, 此时测量结果一开始波动就很小, 能很快地达到准确值。

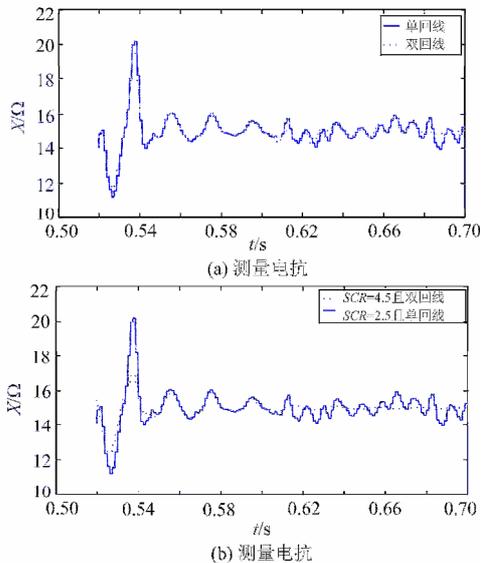


图 5 双回线与单回线测量结果示意图

Fig. 5 Comparison diagram between double-circuit line and single circuit line

3.2.4 解微分方程算法对保护的影响

通过上面的分析可以看出, 如果利用傅氏算法, 无论采取何种措施, 测量结果刚开始时都会波动, 要想准确测量, 必须牺牲保护的速动性。下面分析解微分方程算法对保护的影响。图 6 是运用解微分方程的算法来计算的短路电抗, 此时 $SCR_{AC1}=SCR_{AC2}=2.5$ 。

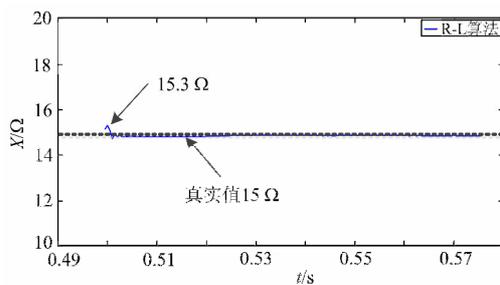


图 6 微分方程算法计算测量电抗

Fig. 6 Measured reactance by using differential equation algorithm

由图 6 可以看出, 运用解微分方程算法能更加准确地计算短路电抗, 其测量误差最大为 $(15.3-15)/15=2\%$ 。表 3 列出了在线路不同位置发生不同故障时运用解微分方程算法求得的短路电抗值, 表 3 中误差表示三个不同位置的最大相对误差。由表 3 可以看出, 相比于傅氏算法, 解微分方程算法的计算精度更高。

表 3 不同故障及不同故障地点时的测量电抗值

Table 3 Measured reactance value with various fault type and in different fault position

故障位置	出口/ Ω	线路		误差/%
		中点/ Ω	末端/ Ω	
A 相接地	0.014	14.765	29.107	2.9
BC 接地	0.013	14.823	29.237	2.5
BC 相间	0.015	14.912	29.426	1.9
三相故障	0.012	14.903	29.468	1.8

3.3 解决措施的对比

通过上面的分析可以看出, 增强系统强度并且采用多回输电方式, 虽然能使得测量结果更快地趋于稳定, 但多回线输电方式要做到正确测量, 就要引入邻线的零序电流, 这无疑增加了保护装置接线的复杂性; 而增加系统强度在现场中也不易实现; 解微分方程算法本身的特点决定了在换相失败期间能很好地消除对金属性接地距离保护的影响。因此建议在交直流互联系统当中采用解微分方程算法。

4 结论

换相失败期间注入的大量非周期分量对傅氏算法产生了一定的影响, 即使采用差分傅氏算法也不能很快地准确测量短路电抗; 利用交流保护风险因子可以很好地说明交流侧故障对保护的影响程度; 解微分方程的算法能很好地适应换相失败的环境, 能更好更快地实现保护的准确测量, 因此建议在交直流互联系统中采用微分方程算法实现距离保护的测量。

参考文献

- [1] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 181-182.
- [2] 李晓华, 刘洋, 蔡泽祥. 直流输电换流变压器阀侧交流单相接地故障[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 38-45. LI Xiao-hua, LIU Yang, CAI Ze-xiang. Analysis of grounding fault at HVDC converter transformer valve side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 38-45.
- [3] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52. YANG Fen-yan, XU Zheng. Typical transient responses in HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 45-52.
- [4] 张璞, 王钢, 李海峰, 等. 直流馈入下的输电线路电流差动保护动作特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 1-5.

- ZHANG Pu, WANG Gang, LI Hai-feng, et al. Performance of current differential protection for transmission lines in DC/AC interconnected power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 1-5.
- [5] 张璞, 王钢, 李海峰. 直流馈入下的输电线路距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 56-62.
- ZHANG Pu, WANG Gang, LI Hai-feng. Performance of distance protection for transmission lines in an DC/AC interconnected power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 56-62.
- [6] 索南加乐, 张健康, 刘林林, 等. 交直流混联系统对距离保护暂态超越的影响及解决措施[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 57-61.
- SUONAN Jia-le, ZHANG Jian-kang, LIU Lin-lin, et al. Impact of AC-DC component power system on distance protection transient overreach and resolving measures[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(4): 57-61.
- [7] 张健康, 索南加乐, 孙成, 等. 基于参数识别的纵联保护在交直流混连电网中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 34-39.
- ZHANG Jian-kang, SUONAN Jia-le, SUN Cheng, et al. Application of pilot protection based on parameter identification in AC-DC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 34-39.
- [8] 李晓华, 蔡泽祥, 黄明辉, 等. 交直流故障暂态功率倒向解析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 61-67.
- LI Xiao-hua, CAI Ze-xiang, HUANG Ming-hui, et al. Transient power converse in an AC/DC interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 61-67.
- [9] 雷虹云, 于占勋, 赵强, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 65-71.
- LEI Hong-yun, YU Zhan-xun, ZHAO Qiang, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 65-71.
- [10] 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.
- [11] 李海峰, 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[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 to frequency components in HVDC/AC interconnected system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 41-46.
- [12] 杨奇逊, 黄少锋. 微机继电保护基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [13] 宋国兵, 刘志良, 康晓宁, 等. 一种同杆并架双回线接地距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 102-106.
- SONG Guo-bing, LIU Zhi-liang, KANG Xiao-ning, et al. A scheme for ground distance protection of parallel transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 102-106.

收稿日期: 2014-01-08; 修回日期: 2014-05-01

作者简介:

黄少锋 (1958-), 男, 教授, 博士生导师, 从事继电保护与控制的研究;

费彬 (1989-), 男, 硕士研究生, 从事继电保护的研究;

申洪明 (1988-), 男, 博士研究生, 从事继电保护的研究. E-mail: shen198806@126.com