

HVDC 附近继电保护装置中 工频故障分量元件的适用性分析

赵成勇, 赵强

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003)

Analysis on Applicability of Fundamental Frequency Fault Component Element of Protective Relays Near to HVDC Transmission Line

ZHAO Cheng-yong, ZHAO Qiang

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: In view of the fact that in actual HVDC projects the directional comparison pilot protection containing directional element based on abrupt-changed quantity may malfunction, the protection principle based on fundamental frequency fault component is analyzed. Because fundamental frequency fault component is derived from superposition principle, so the applicable range of fundamental frequency fault component element depends on the applicable range of superposition principle. By means of analyzing the difference between HVDC transmission line and traditional HVAC transmission lines, it is proved that it is not suitable to apply superposition principle to the power grid containing HVDC transmission lines, thus following conclusions are obtained: in the place near to HVDC transmission line the fundamental frequency fault component element should be not adopted; and there is definite relation between the maloperation of directional comparison pilot protection applied in practical project and the adoption of fundamental frequency fault component element.

KEY WORDS: HVDC; fundamental frequency fault component; superposition principle

摘要: 针对实际高压直流输电(HVDC)工程中含突变方向元件的纵联方向保护可能误动的情况,分析了工频故障分量保护原理。工频故障分量是基于叠加原理派生出来的,叠加原理的适用范围决定了工频故障分量元件的适用范围。通过分析 HVDC 的特性与传统交流系统的不同,证明叠加原理不能应用在含有 HVDC 的系统中,从而得出结论:在 HVDC 附近不应该采用工频故障分量元件,实际工程中的纵联方向保护误动作与使用工频故障分量元件有一定关系。

关键词: 高压直流输电; 工频故障分量; 叠加原理

0 引言

随着电力系统的发展,高压直流输电(HVDC)在实际工程中的应用已经越来越广泛。高压直流输电带来巨大效益的同时,也使得电网运行更加复杂。故障工况下,直流系统派生的电气故障分量已成为影响交流侧继电保护判据并导致保护误动作的不可忽视的重要因素。

实际工程中, HVDC 系统附近已出现过多起继电保护装置误动的现象。2003年6月,天广直流系统广州北涌乙线误动^[1]。2005年12月,广东横东甲、乙线保护误动^[2]。这些工程中,交流系统配备了含有突变方向元件的纵联方向保护。

很多文献^[1-4]对这些误动现象进行了分析。但是,适用于传统交流系统的一些继电保护装置和器件是否适用于含有 HVDC 的系统,却没有人考虑过。本文将详细分析工频故障分量方向元件(突变方向元件)在 HVDC 附近是否适用的问题。

1 工频故障分量保护原理

图 1(a)所示的电力系统在正常状态下运行时,在 k 点发生金属性短路,故障点的电压降为 0,这时系统的状态可用图 1(b)所示的等值网络来代替,图中 2 个附加电压源的电压大小相等、符号相反。若令故障点处附加电源的电压等于故障前状态下故障点处的电压,可将图 1(b)所示的运行状态分解为图 1(c)和图 1(d)所示的 2 个运行状态的叠加。则图 1(c)就对应于故障前的系统状态,各点处的电压、

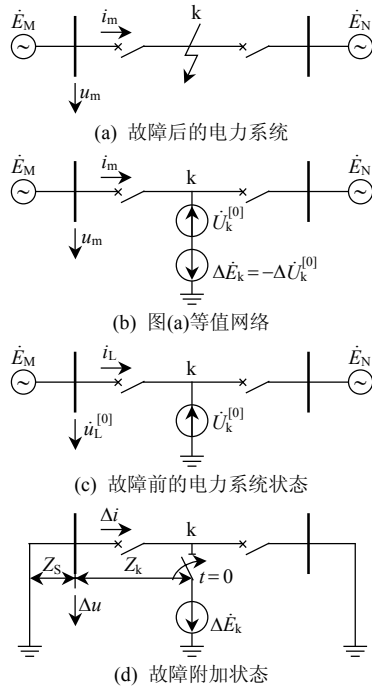


图 1 故障分量原理分析

Fig. 1 Analysis scheme of fault component

电流均与故障前的情况一致。图 1(d)为故障引入后的附加故障状态，该系统中各点的电压、电流称为电压电流的故障分量或故障变化量、突变量^[5]。

在系统发生故障时，保护安装处测量得到的全电压 u_m 、全电流 i_m 可以看作是故障前状态下非故障分量电压 $u^{[0]}$ 、电流 $i^{[0]}$ 与故障分量电压 Δu 、电流 Δi 的叠加，即

$$\begin{cases} u_m = u^{[0]} + \Delta u \\ i_m = i^{[0]} + \Delta i \end{cases} \quad (1)$$

Δu 和 Δi 不仅包含系统短路引起的工频电压、电流的变化量，还包含短路引起的暂态分量，即

$$\begin{cases} \Delta u = \Delta u_{st} + \Delta u_{tr} \\ \Delta i = \Delta i_{st} + \Delta i_{tr} \end{cases} \quad (2)$$

式中： Δu_{st} 、 Δi_{st} 分别为电压、电流故障分量中的工频稳态成分，即工频故障分量； Δu_{tr} 、 Δi_{tr} 分别为电压、电流故障分量中的暂态成分。

纵联方向保护中所用的突变量方向元件，其实就是工频故障分量元件，它通过提取工频故障分量来判别故障区域。

2 工频故障分量的适用范围和 HVDC 的特性

2.1 工频故障分量的适用范围

工频故障分量的分析方法是根据叠加原理得出的，而叠加原理只适用于线性系统。对于非线性系统，如果采用叠加原理进行计算，就可能得到错误的结果^[6]。

2.2 HVDC 的非线性特性

传统的交流输电系统虽然也不是纯线性系统，但是在很短的时间内可以看作是线性系统，按照上述的叠加原理进行分析，其结果是符合要求的。

对于含有 HVDC 的系统，其特性是非线性的，不能等效为线性系统，也就不能采用叠加原理。HVDC 稳态运行时，其电气特性很大程度上受其控制方式的影响。下面证明 HVDC 的非线性特性。

对于图 2(a)所示的理想纯交流系统，应用叠加原理可分解为图 2(b)和(c)。并且可以得出 $i_m = i_{m1} + i_{m2}$ ， $u_m = u_{m1} + u_{m2}$ ，这是已有定论的。

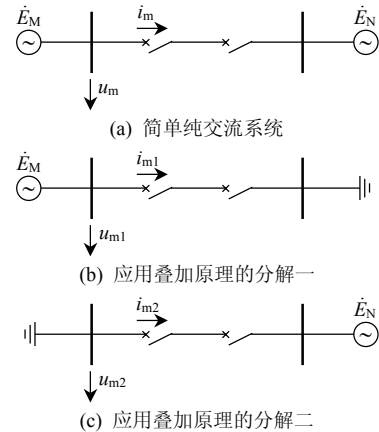


图 2 简单纯交流系统分解

Fig. 2 Decomposition of simple AC system

对于图 3(a)所示的含 HVDC 的系统，如果也应用叠加定理来分解，则对于图 3(b)，由于逆变侧交流系统电压为零，HVDC 系统就无法建立直流电压，使得直流系统输送的有功为零，可得出 $i_{m1} = 0$ ， $u_{m1} = 0$ 。对于图 3(c)，整流侧交流系统电压为零，直流系统也无法建立直流电压，直流系统输送的有功为零。 i_{m2} 是一个无功电流，是交流电压作用在直

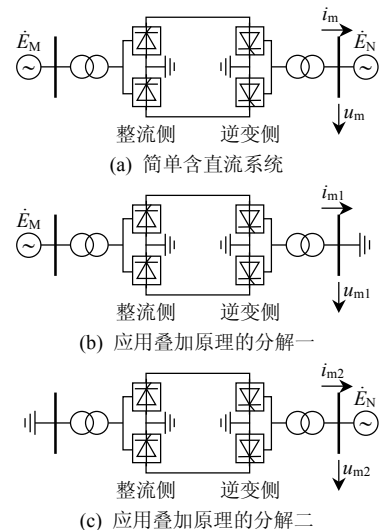


图 3 含有 HVDC 的系统分解

Fig. 3 Decomposition of system containing HVDC

流系统逆变侧的无功补偿设备上产生的。最后 $i_{m1} + i_{m2} = i_m$, $u_{m1} + u_{m2} = u_m$ 。明显 i_m 和 u_m 是以传递有功为主的 2 个量, 而 i_{m2} 和 u_{m2} 传递无功。所以 $i_m = i_{m2}$ 、 $u_m = u_{m2}$ 这 2 个等式至少有 1 个不成立。即 $i_m = i_{m1} + i_{m2}$ 、 $u_m = u_{m1} + u_{m2}$ 至少有 1 个等式不成立。所以最后可得出结论: 含有直流的系统是非线性系统, 对其不能应用叠加原理。

另外, HVDC 的换流器是由晶闸管构成的, 在 HVDC 的运行过程中, 控制系统对晶闸管触发角的控制速度是在 ms 级的, 响应速度非常快。所以在故障过程中, HVDC 系统本身就不停地发生着变化。特别是在 HVDC 的逆变侧, 当逆变侧交流系统故障时, 逆变侧容易发生换相失败^[7-15]。在实际工程中, HVDC 还存在闭锁和重启动的过程^[16-18], 这样一个动态过程已和正常运行的 HVDC 状态有很大不同。由此也可以看出, 对含有 HVDC 的系统不能应用叠加原理。

3 纯交流系统与含有直流的系统使用突变量方向元件的仿真对比

3.1 工频突变量正方向元件的实现公式

工频突变量正方向元件的动作判据^[19]为

$$\phi_+ = \arg \frac{\Delta U_{12} - \Delta I_{12} Z_{com}}{\Delta I_{12} Z_d} \quad (3)$$

其中

$$\Delta U_{12} = \Delta U_1 + M \Delta U_2 \quad (4)$$

$$\Delta I_{12} = \Delta I_1 + M \Delta I_2 \quad (5)$$

以上各式中: ΔU_{12} 为正序电压故障分量 ΔU_1 与负序电压故障分量的综合分量; ΔI_{12} 为正序电流故障分量 ΔI_1 与负序电流故障分量的综合分量; M 为转换因子, 将负序电流故障分量转换为与正序故障分量同相位, 以提高方向元件的灵敏度; Z_d 为模拟阻抗; Z_{com} 为补偿阻抗。

为了使正方向元件不发生误动, 通常取正方向元件的动作范围为

$$90^\circ < \phi_+ < 270^\circ \quad (6)$$

3.2 工频突变量正方向元件应用于纯交流系统的仿真结果

以图 4 所示交流系统故障为例进行仿真。系统参数: $\dot{E}_M = 230 \angle 0^\circ \text{ kV}$, $Z_{sM1} = 7.6705 \angle 90^\circ \Omega$, $Z_{sM0} = 17.3512 \angle 90^\circ \Omega$, $\dot{E}_N = 240 \angle 0^\circ \text{ kV}$, $Z_{sN1} = 4.3378 \angle 90^\circ \Omega$, $Z_{sN0} = 2.2747 \angle 90^\circ \Omega$, $Z_1 = 0.02596 + j0.3156 \Omega/\text{km}$, $Z_0 = 0.1298 + j0.8909 \Omega/\text{km}$ 。

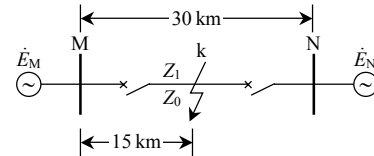


图 4 简单交流系统故障

Fig. 4 Fault in simple AC system

图 4 所示系统在 0.5 s 时刻在 k 点发生 C 相接地故障, 图 5 为 M 侧正方向元件的判据角度。可以看出工频突变量正方向元件的判据在动作范围内, 它正确反映了故障发生的方向。表 1 给出了各种故障情况下突变量方向元件的动作角度。可以看出, 在纯交流系统发生故障时, 突变量方向元件的动作角度都在正确动作的范围内, 并且在特定故障时, 其动作角度很平稳, 基本没有波动。

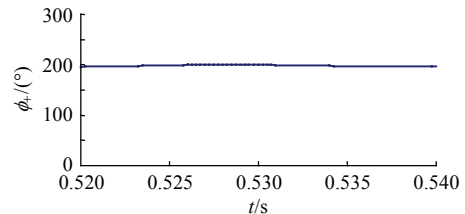


图 5 单相接地故障下突变量正方向元件的判据角度

Fig. 5 Criterion angle of jump-value positive direction element with single phase to ground fault

表 1 各种故障条件下突变量正方向元件的判据角度

Tab. 1 Criterion angle of jump-value positive direction element under different fault conditions

故障类型	动作角度/(°)	故障类型	动作角度/(°)
A-G	181	BC-G	181
B-G	161	ABC-G	200
C-G	195	AB	210
AB-G	210	AC	148
AC-G	149	BC	181

3.3 工频突变量正方向元件应用于含有 HVDC 系统的仿真结果

3.3.1 仿真系统模型及参数

图 6 给出了含 HVDC 的系统故障情况, 直流部分采用 CIGRE 模型, 把整流侧和逆变侧交流系统修改为含有输电线路的形式。系统参数: $Z_1 = 0.02596 + j0.3156 \Omega/\text{km}$, $Z_0 = 0.1298 + j0.8909 \Omega/\text{km}$ 。

图 6 中 HVDC 的详细模型见图 7, 该 HVDC 系统为一额定直流电压 500 kV、额定输送功率为 1000 MW 的单极直流输电系统。基本控制方式为: 整流侧定直流电流控制, 逆变侧定熄弧角控制。

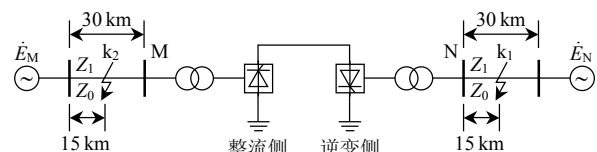


图 6 含有 HVDC 的系统故障图

Fig. 6 Fault in the system containing HVDC

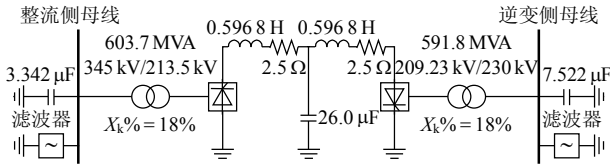


图 7 HVDC 第一基准模型

Fig. 7 HVDC first benchmark model

3.3.2 逆变侧交流系统故障

图 6 所示系统 0.5 s 时在 k_1 点发生 C 相接地故障，图 8 为 N 处突变量正方向元件的判据角度。从图 8 可以看出工频突变量正方向元件不在动作范围内，它没有正确反映故障发生的方向。

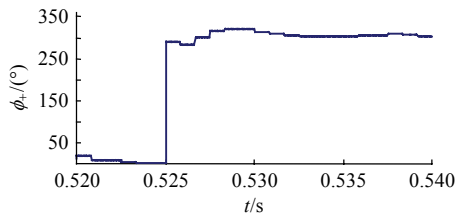


图 8 逆变侧交流系统故障时突变量正方向元件的判据角度

Fig. 8 Criterion angle of jump-value positive direction element with AC line fault on inverter side

表 2 是各种故障时，突变量方向元件的动作角度。可以看出，在含有直流的系统中，当逆变侧交流线路故障时，突变量方向元件不能够正确反映出故障发生的方向。并且，同一处故障但故障类型不同时，其动作角度分布在 4 个象限。可见，突变量方向元件在这种拓扑结构的逆变侧交流线路故障时不具有判别故障方向的能力。

表 2 逆变侧交流系统各种故障条件下突变量正方向元件的判据角度

Tab. 2 Criterion angle of jump-value positive direction element under different fault conditions on inverter side

故障类型	动作角度/(°)	故障类型	动作角度/(°)
A-G	327~365	BC-G	223~299
B-G	347~393	ABC-G	273~281
C-G	283~367	AB	145~276
AB-G	268~311	AC	176~360
AC-G	182~287	BC	206~360

3.3.3 整流侧交流系统故障

图 6 所示系统 0.5 s 时在 k_2 点发生 C 相接地故障，图 9 为 M 处突变量正方向元件的判据角度。可以看出工频突变量正方向元件不在动作范围内，它没有能够正确反映故障发生的方向。

表 3 是各种故障时，突变量方向元件的动作角度。可以看出，在含有直流的系统中，当整流侧交流线路故障时，突变量方向元件不能够正确反映出故障发生的方向。同逆变侧交流系统故障时的情况类似，在同一处故障但故障类型不同时，其动作角

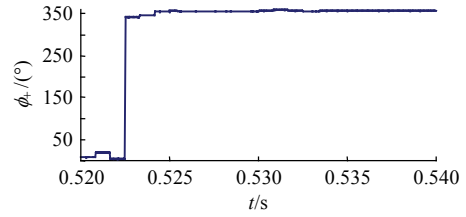


图 9 整流侧交流系统故障时突变量正方向元件的判据角度

Fig. 9 Criterion angle of jump-value positive direction element with AC line fault on rectifying side

表 3 整流侧交流系统各种故障条件下突变量正方向元件的判据角度

Tab. 3 Criterion angle of jump-value positive direction element under different fault conditions on rectifying side

故障类型	动作角度/(°)	故障类型	动作角度/(°)
A-G	193~225	BC-G	57~114
B-G	52~78	ABC-G	62~118
C-G	339~378	AB	59~84
AB-G	185~335	AC	77~94
AC-G	65	BC	58~101

度分布在 4 个象限。可见，突变量方向元件在这种拓扑结构的整流侧交流线路故障时不具有判别故障方向的能力。

从上述仿真结果可以看出，工频突变量正方向元件应用在含直流的系统中时，出现了误判断的现象，因此将含有工频突变量方向元件的继电保护装置应用在含有 HVDC 的系统中就有可能出现继电保护装置的误动。

4 结论

1) 从本文的分析结果可以看出，在 HVDC 附近不能应用叠加原理，这种情况下使用工频故障分量元件得出的结果是否正确受到质疑。故障分量元件在这种情况下超出了它正确使用的范围，为继电保护装置的误动作埋下了隐患。

2) 在其它的电力电子装置附近是否能应用叠加原理，是否能使用工频故障分量元件作为故障方向判断，也是一个值得重视的问题。

3) 传统交流系统中应用的继电保护装置和元件，在加入 HVDC 系统后的情况下是否还能够使用，是一个值得注意的问题。应分析其适用情况，根据分析结果来决定在 HVDC 系统附近配备什么样的保护装置。

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作分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 104-107.
Liu Zhiyao, Tang Zhuoyao, Zhang Wenfeng, 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(in Chinese).
- [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 Defeng, Mao Weimin, Xian Weixiong. 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(in Chinese).
- [3] 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 Zexiang, Liu Weixiong, et al. Transient power converse in AC/DC interconnected power grid and its influence on protective relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 34-38(in Chinese).
- [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 Bingyan. Analysis on influence of HVDC commutation failure on AC relay protection[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 42-45(in Chinese).
- [5] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 121-122.
- [6] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 80-83.
- [7] 罗隆福, 周金萍, 李勇, 等. HVDC 换相失败典型暂态响应特性及其抑制措施[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 5-9. Luo Longfu, Zhou Jinping, Li Yong, et al. Typical transient response of HVDC commutation failure and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 5-9(in Chinese).
- [8] 郝跃东, 倪汝冰. HVDC 换相失败影响因素分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 38-41. Hao Yuedong, Ni Rubing. Analysis on influence factors of commutation failure in HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 38-41(in Chinese).
- [9] 欧开健, 任震, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一): 换相失败的影响因素分析[J]. 电力系统自动化设备, 2003, 23(5): 5-8. Ou Kaijian, Ren Zhen, Jing Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system, part 1: Commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8(in Chinese).
- [10] 任震, 欧开健, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(二): 避免换相失败的措施[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(6): 6-9. Ren Zhen, Ou Kaijian, Jing Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system, part 2: Measures against commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 6-9(in Chinese).
- [11] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24. He Chaorong, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24(in Chinese).
- [12] 刘云, 李凤祁, 王明新, 等. 葛南直流输电系统 2006 年运行及异常情况总结[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 7-11. Liu Yun, Li Fengqi, Wang Mingxin, et al. Operational situation and principal abnormal circumstance of ± 500 kV HVDC power transmission system from Gezhouba to Nanqiao in 2006[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 7-11(in Chinese).
- [13] 朱韬析, 王超. 天广直流输电系统的基本控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 22-26. Zhu Taoxi, Wang Chao. Basic control strategy for HVDC transmission system from Tianshengqiao to Guangzhou[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 22-26(in Chinese).
- [14] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电换相失败的判据标准[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 19-53. He Chaorong, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Criteria for commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 19-53(in Chinese).
- [15] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46. Lin Lingxue, Zhang Yao, Zhong Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46(in Chinese).
- [16] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 173-175. Ren Dayong. Analysis of bipolar block events over the years of Tian-Guang HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 173-175(in Chinese).
- [17] 齐旭, 曾德文, 史大军, 等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[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(in Chinese).
- [18] 周红阳, 刘映尚, 余江, 等. 直流输电系统再启动功能改进措施[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 104-107. Zhou Hongyang, Liu Yingshang, Yu Jiang, et al. Analysis and improvement of force restart function of HVDC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 104-107(in Chinese).
- [19] 张举. 微型机继电保护原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 112-116.



赵成勇

收稿日期: 2009-07-21。

作者简介:

赵成勇(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高压直流输电与柔性输配电技术、电能质量分析与控制, E-mail: chengyongzhao@ncepu.edu.cn;

赵强(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电及柔性交流输电, E-mail: akqtakqt@163.com。

(责任编辑 李兰欣)