

# 交流系统强度与所联直流输电系统换相失败关系研究

艾 飞<sup>1</sup>, 李兴源<sup>1</sup>, 王晓丽<sup>2</sup>, 任永生<sup>3</sup>, 韦 立<sup>4</sup>, 刘 建<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 杭州余杭供电局, 浙江 杭州 311100;

3. 杭州萧山供电局, 浙江 杭州 311200; 4. 重庆綦南供电局, 重庆 400000)

**摘 要:**从换相失败的本质原因出发, 研究不同短路比对 CIGRE HVDC 模型换相过程的影响。研究表明, 增大交流系统强度可减小系统波动, 加速系统的恢复过程。在 CIGRE HVDC 模型的基础上, 建立双馈入直流输电系统, 探讨故障及非故障交流系统强度对多馈入直流输电系统同时换相失败的影响。计算结果表明, 增大非故障交流系统强度有利于避免同时换相失败, 而增大故障交流系统强度对于避免同时换相失败基本无效。

**关键词:**换相失败; CIGRE HVDC 模型; 短路比 (SCR); 多馈入直流输电系统 (MIDC); 同时换相失败

**Abstract:** Based on the essential reason of commutation failure, the commutation conditions of CIGRE HVDC model under different short circuit ratios (SCRs) are studied. The results show that strengthening the AC system could reduce the system disturbance and accelerate the recovery process. Based on CIGRE HVDC model, a dual-feed HVDC system is established to explore the influence of faulted and non-faulted AC system strength on simultaneous commutation failures of MIDC. The calculation results show that strengthening the non-faulted AC system is beneficial to avoiding simultaneous commutation failures, while strengthening the faulted AC system has little effect on avoiding simultaneous commutation failures.

**Key words:** commutation failure; CIGRE HVDC model; short circuit ratio (SCR); multi-feed HVDC (MIDC); simultaneous commutation failures

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0001-04

直流输电是目前世界发达国家作为解决高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段<sup>[1~3]</sup>, 但高压直流输电系统的投入在带来各种好处的同时也引进了新的问题, 换相失败就是换流站采用晶闸管作为换流阀元件所面临的常见故障之一<sup>[4,5]</sup>。换相失败与很多因素有关, 主要有换流母线电压、直流电流、换相电抗、越前触发角、不对称故障时换相电压的过零点相位移、换流阀的触发脉冲控制方式、交流系统的频谱特性和所联交流系统强度等<sup>[6~8]</sup>。文献 [6] 以 CIGRE HVDC 标准模型为研究对象比较详细地分析了上述部分因素对逆变器换相失败的影响, 得出了逆变器发生换相失败的一般规律, 但没有分析交流系统强度对换相失败的影响。文献 [9] 对一个联于弱交流系统的直流输电系统的动态特性及换相失败进行了仿真, 没有对交流系统强度如何影响直流系统换相失败进行定性或定量分析。文献 [10] 针对一个两端直流输电系统分析了不同交流系统强度情况下, 所研究系统换相失败及直流电压、直流电流、交流电压

等的恢复情况, 讨论了交流系统强度对所联 HVDC 系统故障恢复特性的影响。

这里以 CIGRE HVDC 为基本模型, 研究了不同交流系统强度下换相失败的动态情况。并在 CIGRE HVDC 的基础上构建了一双馈入直流输电系统, 在相同故障而不同短路比的情况下, 利用 PSCAD/EMTDC 软件中的连续仿真功能, 求出导致两逆变器同时发生换相失败的临界电抗的值, 来初步研究多馈入系统中交流系统强度与同时换相失败的关系。

## 1 换相失败的机理

换相失败是指在换相电压反向 (具有足够的去游离度) 之前未能完成换相的故障<sup>[11]</sup>。换流器的阀是一种可控电力电子开关, 它需要一定时间完成载流子复合, 恢复正向阻断能力。一般地, 晶闸管的恢复时间以电角度  $\gamma_{min}$  表示, 当晶闸管的换相余裕角小于  $\gamma_{min}$  时, 换流器就换相失败, 一般取为  $7^\circ$ <sup>[8,12]</sup>。直流输电系统的大部分换相失败发生在逆变器。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (50595412); 国家重点基础研究专项经费项目 (2004CB217901); 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01)

## 2 短路比及其相关问题

电力系统中各种元件的性能由其所处网络特性尤其是系统强弱决定。系统的强弱反映了系统内组成元件对各种扰动的敏感度。强电力系统对负荷变化扰动不会有显著的电压或功角变化,但是弱电力系统对一个小扰动都会有巨大的电压或其他量的偏移,将会对系统产生危害。因此,换流母线处的短路容量或等值阻抗通常是在该点处衡量系统强弱的很好的指标。传统上,利用指标“短路比”(short circuit ratio, SCR, 其值表示为  $S_{CR}$ )来衡量单馈入换流站的母线特性<sup>[13]</sup>。

$$S_{CR} = \frac{S_{SC}}{P_{dN}} \quad (1)$$

式中,  $S_{SC}$ 为换流母线处的短路容量,  $P_{dN}$ 为换流站的额定直流功率。以 HVDC 换流站的额定直流功率和换流母线的交流电压为基准时,式 (1)可表示为

$$S_{CR} = \frac{1}{Z_L} \quad (2)$$

式中,  $Z_L$ 是交流系统阻抗的标么值。短路比越小系统越弱,反之越强。系统的强弱与稳定性直接相关,系统越强则越稳定,反之不稳定。

多馈入系统中各直流子系统传输功率不同,因此需对短路比重新定义。文献 [14]提出用基准功率比(power base ratio, PBR)来描述系统短路比的方法。子系统  $i$  的短路比可表示为:

$$M_{SCRi} = \frac{1}{R_{PBi}} \cdot \frac{1}{Z_i} \quad (3)$$

式中,  $R_{PBi} = P_{dNi} / P_{dNj}$ 即选定某个子系统  $j$  的直流传输功率  $P_{dNj}$ 为 MDC 系统直流功率基准值,计算子系统  $i$  的基准功率比;  $Z_i$ 为以子系统  $j$  的直流传输功率  $P_{dNj}$ 和换流母线的交流电压为基准时子系统  $i$  的阻抗标么值。

## 3 两端直流输电系统研究

### 3.1 仿真系统模型

这里以 PSCAD/EMTDC<sup>[15]</sup>为仿真工具,采用 CIGRE HVDC<sup>[16]</sup>为仿真模型。其逆变侧短路比  $S_{CR} = 2.5$ ,换流母线额定电压为 230 kV。由短路比的概念知,改变交流系统的阻抗就可以改变系统的短路比,

并分析当逆变侧分别为 2.0、2.5、4.0 时系统的动态特性。

### 3.2 仿真结果及分析

设定仿真中系统的运行时间为 8.0 s, 3.0 s 时换流母线发生三相接地故障, 0.1 s 后故障切除。以下各图是  $S_{CR}$  分别为 2.0、2.5、4.0 时系统的动态仿真结果。从图 1 中可以看出,  $S_{CR}$  为 2.0 也就是交流系统很弱时,系统反应强烈,故障发生时逆变侧直流电压、电流冲击幅值较大,扰动后的振荡也比较明显,系统发生了换相失败,且不能够顺利恢复。图 2 中  $S_{CR}$  为 2.5 时故障对系统的冲击不大,在故障切除后系统能够较快速从换相失败恢复,并达到故障前的稳定状态。图 3 中  $S_{CR}$  为 4.0 时,系统在故障切除后立即从换相失败中恢复,较  $S_{CR}$  为 2.5 时迅速。

## 4 多馈入直流输电系统研究

### 4.1 系统模型

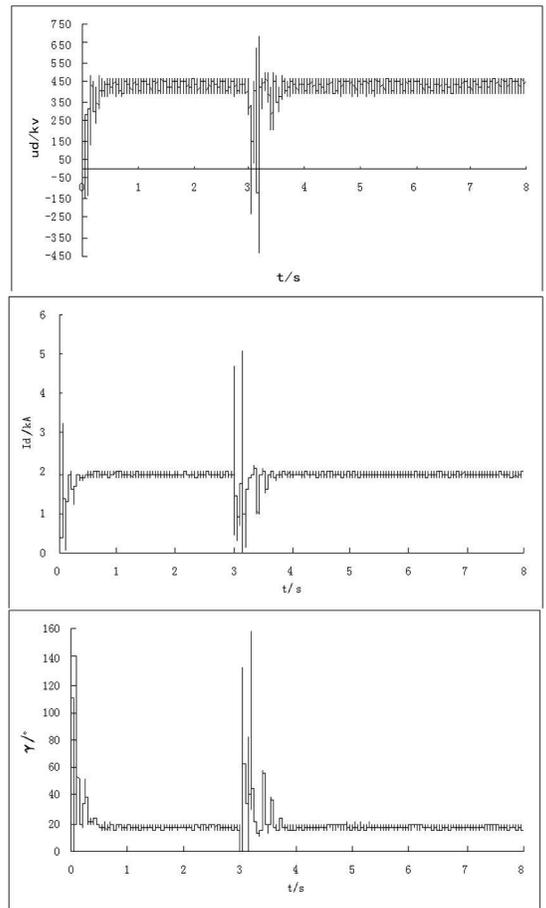


图 1 短路比为 2.0 时系统的动态特性

在 CIGRE HVDC 标准测试系统模型的基础上建立双馈入直流输电系统,其接线如图 4 所示,两直流

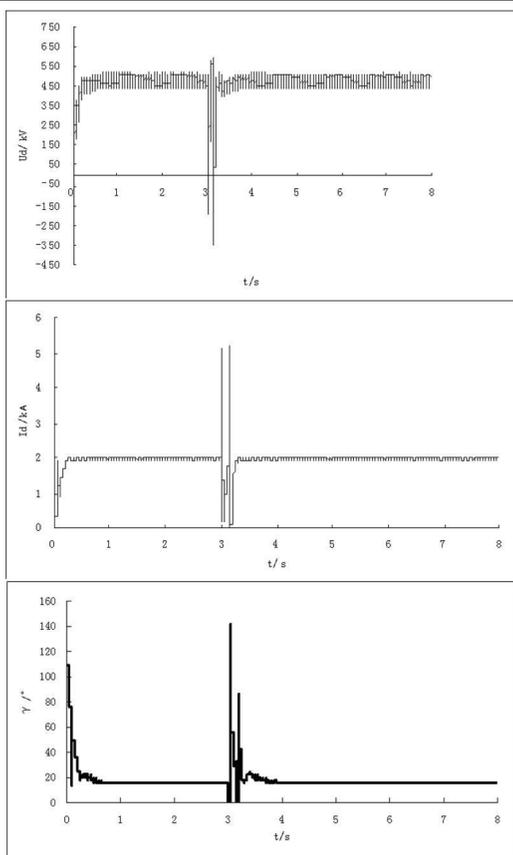


图 2 短路比为 2.5 时系统的动态特性

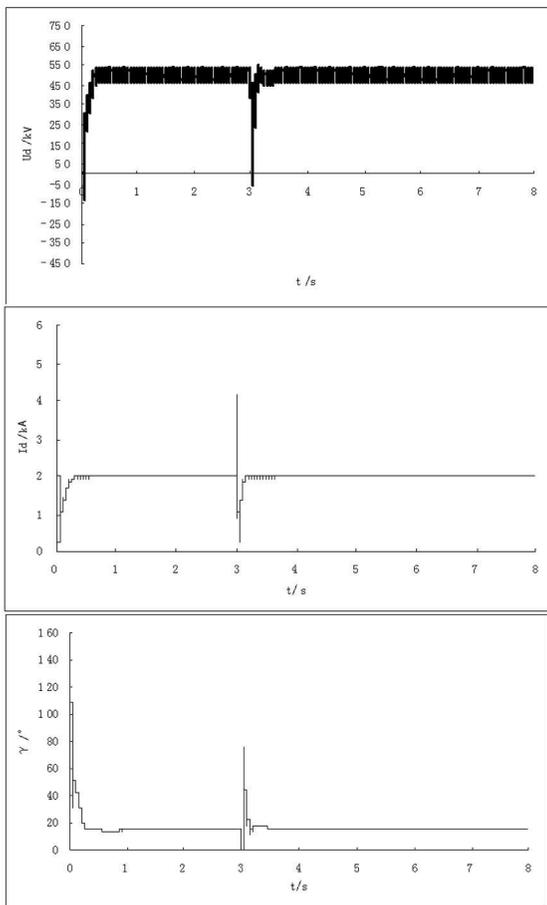


图 3 短路比为 4.0 时系统的动态特性

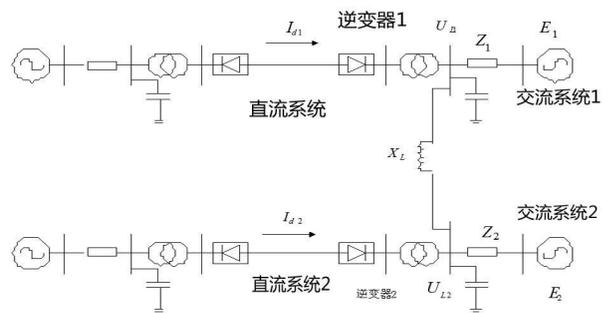


图 4 双馈入系统接线图

系统在逆变端通过相互间的耦合电抗关联。

以图 4 中逆变站 2 为例, 逆变站 2 的换相电压可由下式表示:

$$U_{L2} = \left[ \frac{E_2}{Z_2} + \frac{U_{L1}}{X_L} + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_{L2} \right] \cdot \left[ \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{X_L} \right]^{-1} \quad (4)$$

其熄弧角模型为:

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \arccos \left[ \frac{\sqrt{2n_2} I_{L2} X_2}{U_{L2}} + \cos \beta_2 \right] \\ &= \arccos \left[ \sqrt{2n_2} I_{L2} X_2 \left[ \frac{E_2}{Z_2} + \frac{U_{L1}}{X_L} + \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cdot I_{L2} \right]^{-1} \cdot \left[ \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{X_L} \right] + \cos \beta_2 \right] \quad (5) \end{aligned}$$

当熄弧角  $\gamma_2$  小于  $7^\circ$  时, 就认为逆变器发生换相失败。

#### 4.2 仿真方案

多馈入直流输电系统中多个换流站是否同时发生换相失败与各子系统间的电气联系密切相关。当各直流子系统交流母线间的电气联系较强时, 某一子系统的交流侧电压或无功功率的波动会影响邻近交流母线电压, 则可能导致多个换流器同时或相继换相失败。对于相互关联的两个直流子系统来说, 当一个子系统故障导致其逆变器换相失败时, 存在一个临界的耦合阻抗, 使得另一个直流子系统刚好同时发生换相失败。这样, 当系统间电气距离大于这个临界值时, 两逆变站间的电气联系相对较弱, 一个直流子系统故障不足以引起另一个直流子系统的换相失败; 当两系统间电气距离小于这个临界值时, 两系统同时发生换相失败。

在相同故障而不同短路比的情况下, 利用 PSCAD/EMTDC 软件中的连续仿真功能, 求出导致两逆变器同时发生换相失败的临界电抗的值 (以  $X_{LC}$  表示), 来初步探讨多馈入系统中短路比与换相失败的关系。

#### 4.3 仿真结果分析

方案 1: 逆变站 1 换流母线发生三相金属性接地故障, 使得换流母线电压下降为零, 此时逆变站 1 必定发生换相失败。改变逆变器 2 交流侧阻抗的值以改变其交流系统强度, 求出在不同短路比情况下两逆变器同时换相失败的临界耦合电抗。电抗以子系统 1 的直流传输功率  $P_{dn1}$  和换流母线的额定电压为基准:  $Z_B = \frac{V_{ac}^2}{P_{dn}} = 52.9 \Omega$ 。

仿真计算结果如表 1 所示。

表 1  $M_{SCR1}$  固定时  $X_{LC}$  (pu) 随  $M_{SCR2}$  的变化

		$M_{SCR1} = 2.5$				
$M_{SCR2}$	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$X_{LC}$ (pu)	8.7	6.9	5.6	4.5	3.7	3.1

从表中可以看出, 随着  $M_{SCR2}$  的增大, 避免同时换相失败所需的耦合电气距离减小, 两直流系统可以在近电气距离安全运行。从表中也可以看出, 增大  $M_{SCR2}$  避免同时换相失败的效果是明显的:  $M_{SCR2}$  从 2.5 增加到 5.0 时, 临界电抗从 8.7 pu 下降到 3.1 pu, 可以得出结论: 增大非故障交流系统的强度有利于避免同时换相失败。这对于多馈入直流输电系统的设计和运行具有重要意义。

方案 2: 逆变站 1 换流母线发生三相金属性接地故障, 使得换流母线电压下降为零, 此时逆变站 1 必定发生换相失败。改变逆变站 1 交流侧阻抗以改变其交流系统强度, 求出在不同短路比情况下两逆变器同时换相失败的临界耦合电抗。同方案 1, 基准阻抗为  $Z_B = \frac{V_{ac}^2}{P_{dn}} = 52.9 \Omega$ 。

仿真计算结果如表 2 所示。

表 2  $M_{SCR2}$  固定时  $X_{LC}$  (pu) 随  $M_{SCR1}$  的变化

		$M_{SCR2} = 2.5$				
$M_{SCR1}$	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$X_{LC}$ (pu)	8.7	9.9	9.9	9.7	9.7	9.8

从表中可以看出, 随着  $M_{SCR1}$  的增大, 临界电抗变化不规律, 它没有随着  $M_{SCR1}$  的增大而减小, 可以说明: 增大故障交流系统的强度对于避免同时换相失败基本无效。

## 5 结 论

通过仿真分析及计算讨论了交流系统强度与所联直流输电系统换相失败的关系, 得出如下结论。

(1) 两端直流输电系统中, 故障情况下, 弱受端

系统会延缓整个系统的恢复过程, 甚至导致后续的换相失败。减小逆侧交流系统阻抗即增大交流系统强度可减小系统波动, 加速系统的恢复过程。

(2) 多馈入直流输电系统中, 当系统其他参数一定时, 增大非故障交流系统强度有利于避免同时换相失败, 而增大故障交流系统强度对于避免同时换相失败基本无效。

在系统设计阶段, 可以通过仿真分析及计算求出避免换相失败所需的交流系统参数, 这样可以在一次设备设计阶段选出有利于系统换相的设备, 对于实际系统的设计和运行具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 管秀鹏, 孙元章, 赵国梁, 等. 南方电网西电东送暂态功率传输极限研究 [J]. 电网技术, 2004, 28(2): 1-5.
- [2] 李峰, 管霖, 钟杰峰, 等. 广东交直流混合电网的运行稳定性研究 [J]. 电网技术, 2005, 29(11): 1-4.
- [3] 周孝信. 我国电网技术的现状与未来 [J]. 电网技术, 1995, 19(2): 1-4.
- [4] 吴冲, 李兴源, 黄宗君. 高压直流输电系统换相失败及其相关问题研究 [J]. 现代电力, 2007, 24(3): 1-5.
- [5] 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.
- [6] 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]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5-8.
- [7] Kristmundsson G M, Carroll D P. The effect of system frequency spectrum on commutation failure in HVDC inverter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 1121-1128.
- [8] 荆勇, 欧开健, 任震. 交流单相故障对高压直流输电换相失败的影响 [J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 60-62.
- [9] 黎敬霞, 王肩雷, 钱晶, 等. 联于弱交流系统的 HVDC 换相失败研究 [J]. 昆明理工大学学报 (理工版), 2006, 31(2): 48-52.
- [10] 魏星. 交流系统强度对 HVDC 故障恢复特性影响的仿真分析 [J]. 电力科学与工程, 2007, 23(3): 24-26.
- [11] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [12] 荆勇, 任震, 欧开健. 天广直流输电系统换相失败的研究 [J]. 继电器, 2003, 31(10): 32-36.
- [13] Paulo Fischer de Toledo, Bemt Bergdahl, Gunnar Aspplund. 多馈入 HVDC 交直流混合系统短路比的定义和应用 [J]. 南方电网技术研究, 2005, 11(6): 24-29.

(下转第 35 页)

表 2 两种雷击情况不同条件下的仿真结果

类型	条件	Ea	E <sub>d1</sub>	E <sub>d2</sub>	E <sub>d3</sub>	E <sub>d4</sub>	E <sub>d5</sub>	
直击雷	故障性 30 kA	200 km	98.961 4	0.128 3	0.255 9	0.381 2	0.170 4	0.102 7
		150 km	99.188 6	0.092 4	0.186 3	0.355 1	0.114 4	0.063 3
		50 km	99.392 9	0.068 5	0.143 7	0.234 4	0.096 2	0.064 3
	非故障性 15 kA	200 km	45.403 3	9.432 3	14.019 2	16.778 4	9.96	4.406 7
		150 km	37.041 6	9.784 8	16.701 2	19.052 9	11.432 4	5.987 1
		50 km	47.392 2	7.470 5	14.093 9	16.341 3	9.43	5.272 1
感应雷	非故障性 5 kA	200 km	60.593 2	4.653 4	7.330 3	10.295 1	10.524 4	6.603 6
		150 km	57.637 2	4.395 1	7.619 2	11.966 3	10.966 3	7.800 2
		50 km	59.956 4	4.657 8	7.026 8	12.213 3	7.531 7	8.614 0

首先介绍了雷电流的波形,并利用 MATLAB 软件构建雷电流和输电线路仿真模型,通过参数的设定,对四种常见的普通短路和两种形式的雷击进行仿真实验。由仿真的数据和波形可以明显看出普通短路与雷电干扰及故障性雷击的区别,实现了输电线路雷电干扰暂态的识别方法,大量的仿真数据说明了该方法的可靠性和可行性。

参考文献

[1] 钟麟,王峰. MATLAB 仿真技术与应用教程 [M]. 国防工业出版社, 2004. 1.  
 [2] 施围,邱毓,等. 高电压工程基础 [M]. 机械工业出版社, 2006. 8.  
 [3] 董杏丽,葛耀中,董新洲,等. 行波保护中雷电干扰问题的对策 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 74-78.  
 [4] 李海峰,王钢,赵建仓,等. 输电线路感应雷击暂态特性分析及识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):

114-119.

[5] 王钢,李海峰,赵建仓,等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139-144.  
 [6] 段建东,张保会,等. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 30-35.  
 [7] 司大军,束洪春,陈学允,等. 输电线路雷击的电磁暂态特性分析及识别方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 64-67.  
 [8] 段建东,任晋峰,张保会,等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, (23): 7-13.

作者简介:

张丽娜 (1984-),女,硕士研究生,研究方向是电力系统继电保护。

(收稿日期: 2008-12-12)

(上接第 4 页)

[14] Denis Lee Hau Aik Goran Andersson. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC system [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1316.  
 [15] 林良真,叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC [J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66.  
 [16] M. O. Fauque Yuyan Zhang Venkata Dinavahi. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SMULNK [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 378-387.

作者简介:

艾飞 (1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

李兴源 (1945-),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE 高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究;

王晓丽 (1981-),女,硕士,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

任永生 (1982-),男,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

韦立 (1983-),男,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

刘建 (1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009-02-19)