

多馈入直流输电系统功率稳定性分析

陈虎¹, 张英敏¹, 贺洋², 李兴源¹, 赵睿¹, 王鹏飞¹

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065;

2. 重庆电力公司 永川供电局, 重庆市 永川区 402160)

Analysis on Power Stability of Multi-Infeed HVDC Power Transmission System

CHEN Hu¹, ZHANG Yingmin¹, HE Yang², LI Xingyuan¹, ZHAO Rui¹, WANG Pengfei¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;

2. Yongchuan Power Supply Bureau, Chongqing Electric Power Company, Yongchuan District, Chongqing 402160, China)

ABSTRACT: The transmission capability of HVDC power transmission system is principally restricted by the strength of AC power system to which the HVDC system is connected. There are much research results on both transmission capability and power stability of single HVDC power transmission system, however along with the appearance of multi-infeed HVDC power transmission systems the complex interaction among HVDC lines makes the power stability of multi-infeed HVDC power transmission system more complicated. Based on two-infeed HVDC power transmission system, the influences of the variation of operation condition of multi-infeed HVDC power transmission lines, the coupling degree between HVDC lines and the value of multi-infeed short circuit ratio on power stability of multi-infeed HVDC power transmission system are researched. Analysis results show that for multi-infeed HVDC power transmission system the power stability margin of multi-infeed HVDC power transmission system as well as the transmission capability and maximum DC power can be effectively improved by reducing the current of HVDC system to which the multi-infeed HVDC power system is connected, reducing the electrical distance between HVDC systems and increasing multi-infeed short circuit ratio of the connected HVDC system.

KEY WORDS: multi-infeed HVDC power transmission; power stability; transmission capability; maximum DC power; multi-infeed short circuit ratio

摘要: 直流输电系统的功率输送能力主要受所联交流系统强度的限制, 单条直流系统的功率输送能力和功率稳定已有较多的研究。随着多馈入直流系统的出现, 直流系统间的复杂相互作用使得多馈入直流系统的功率稳定性更为复杂。以两

馈入直流系统为基础, 研究多馈入直流系统运行状态变化、直流间耦合程度以及多馈入短路比大小对多馈入直流系统功率稳定性的影响。分析结果表明, 在多馈入直流系统中, 减小所联直流系统电流、减小直流系统间电气距离、增大所联系统多馈入短路比均能有效增大直流系统的功率稳定裕度、提高功率输送能力和最大直流功率。

关键词: 多馈入高压直流输电; 功率稳定; 输送能力; 最大直流功率; 多馈入短路比

0 引言

直流输电系统的输送功率主要受所联交流系统的强度限制, 交流系统的等值阻抗和交流系统的机械惯量都会对直流系统的功率输送能力造成影响。对于连接于弱交流系统的单条直流输电系统, 交直流的相互作用以及直流系统的功率稳定性已有较多的研究^[1-5]。

文献[6]利用简化单馈入直流输电系统模型分析了直流输送功率极限与换流节点电压稳定性之间的关系; 文献[7-8]针对多馈入直流系统, 分析了各直流子系统对系统电压稳定性的影响, 得到了多馈入直流最大功率曲线; 文献[9]利用单馈入交直流系统简化模型, 讨论了直流输送功率极限与短路比的关系, 并由最大功率曲线法得出了交流系统强弱弱的划分标准。但目前在我国华东电网和南方电网, 已形成了典型的多馈入直流输电系统^[10-12], 直流间复杂的相互作用对多馈入直流系统功率输送能力的影响不容忽视^[13-19], 多馈入直流系统的功率稳定性需要进一步深入研究。

本文将单条直流系统功率输送能力的分析方法推广到多馈入直流系统中, 以两馈入直流系统简化模型为基础, 研究计及直流间相互作用后, 多馈入

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大项目(2008BAA13B01); 国家自然科学基金项目(51037003)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2008BAA13B01); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51037003).

直流系统运行状态变化、直流间耦合程度以及直流系统多馈入短路比大小对多馈入直流系统功率输送能力的影响, 分析多馈入直流系统功率稳定性。

1 两馈入直流系统简化模型

研究多条直流馈入同一个交流系统时, 通常需要在保持原有系统动态特性不变的情况下简化系统模型, 这样可在保持基本系统响应、行为与原系统的性能不变的情况下简化研究。对多馈入直流系统相互作用机制的分析, 本文采用图 1 所示的两馈入直流系统简化模型进行研究。模型系统中, 交流系统采用戴维宁等效电路, 用固定阻抗和固定电动势串联来模拟。由于在逆变运行时, 直流系统对交流系统的要求更高, 因此模型中换流器均视为逆变器且 2 条直流均工作在恒定熄弧角/恒定电流控制方式。

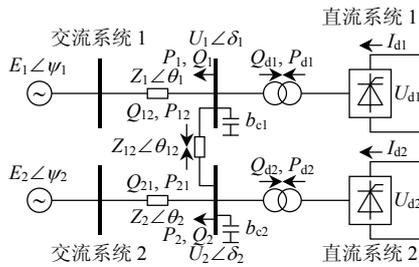


图 1 两馈入直流系统简化模型

Fig. 1 Simplified model of two-infeed HVDC

图 1 中: $E_i \angle \psi_i$ 为交流系统等值电势; $Z_i \angle \theta_i$ 为交流系统等值阻抗; $Z_{12} \angle \theta_{12}$ 为交流系统之间的耦合阻抗; P_i 、 Q_i 为交流系统有功和无功功率; P_{di} 、 Q_{di} 为直流系统有功和无功; P_{ij} 、 Q_{ij} 为交流系统之间的有功和无功交换; $U_i \angle \delta_i$ 为换流站交流母线电压; b_{ci} 为交流滤波器和无功补偿电容的等值导纳; U_{di} 、 I_{di} 为直流电压和电流, 其中 $i, j=1, 2$, 且 $i \neq j$ 。

2 多馈入短路比

交直流相互作用强度的大小, 主要取决于交流系统短路容量相对于直流系统容量的强弱。短路比表示为 2 者的比值, 因此短路比常被用于评估交直流相互作用。文献[20]给出了考虑多条直流通过交流电网的相互作用和影响后, 直流系统 i 的多馈入短路比(multi-infeed short circuit ratio, MSCR)

$$K_{MSCRi} = \frac{U_i^2 / |Z_{eqii}|}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij} / Z_{eqii}| P_{dj}} \quad (1)$$

式中: U_i 为直流系统 i 换流母线电压; Z_{eqij} 为从各直流换流母线看进去的等值节点阻抗矩阵 Z_{eq} 的第

i 行、第 j 列元素; P_{di} 、 P_{dj} 为直流系统 i 、 j 的直流功率。若以换流母线额定电压 U_i 为基准电压, 则可得

$$K_{MSCRi} = \frac{1}{|Z_{eqii}| P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij}| P_{dj}} \quad (2)$$

若考虑换流站换流母线侧的并联无功补偿设备的影响, 则可推广定义多馈入有效短路比(multi-infeed effective short circuit ratio, MESCR)

$$K_{MESCRi} = \frac{1/|Z_{eqii}| - 1/|Z_{ci}|}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij} / Z_{eqii}| P_{dj}} \quad (3)$$

式中 Z_{ci} 为直流系统 i 对应滤波器及无功补偿的阻抗值。

3 功率稳定分析

3.1 数学模型描述

针对图 1 所示的两馈入直流系统简化模型, 可用以下 11 个方程来描述整个模型系统的特性

$$P_{di} = C_i U_i^2 [\cos 2\gamma_i - \cos(2\gamma_i + 2\mu_i)] \quad (4)$$

$$Q_{di} = C_i U_i^2 [2\mu_i + \sin 2\gamma_i - \sin(2\gamma_i + 2\mu_i)] \quad (5)$$

$$I_{di} = K_i U_i [\cos \gamma_i - \cos(\gamma_i + \mu_i)] \quad (6)$$

$$U_{di} = P_{di} / I_{di} \quad (7)$$

$$P_i = [U_i^2 \cos \theta_i - E_i U_i \cos(\delta_i + \theta_i - \psi_i)] / |Z_i| \quad (8)$$

$$P_{ij} = [U_i^2 \cos \theta_{ij} - U_i U_j \cos(\delta_i + \theta_{ij} - \delta_j)] / |Z_{ij}| \quad (9)$$

$$Q_i = [U_i^2 \sin \theta_i - E_i U_i \sin(\delta_i + \theta_i - \psi_i)] / |Z_i| \quad (10)$$

$$Q_{ij} = [U_i^2 \sin \theta_{ij} - U_i U_j \sin(\delta_i + \theta_{ij} - \delta_j)] / |Z_{ij}| \quad (11)$$

$$Q_{ci} = b_{ci} U_i^2 \quad (12)$$

$$P_{di} = P_i + P_{ij} \quad (13)$$

$$Q_{di} + Q_i + Q_{ij} = Q_{ci} \quad (14)$$

式中: $i, j=1, 2$, 且 $i \neq j$; γ_i 为熄弧角; μ_i 为换向角; C_i 和 K_i 为与换流变压器参数及直流系统有关的 2 个常数, 其中 C_i 的表达式为

$$C_i = 3S_{Ti} / (4\pi P_{dNi} u_{ki} \tau_i^2) \quad (15)$$

式中: S_{Ti} 为换流变压器的容量; P_{dNi} 为直流系统额定容量; u_{ki} 为短路比; τ_i 为变压器分接头。

在上述方程的变量中 S_{Ti} 、 u_{ki} 、 C_i 、 K_i 、 b_{ci} 、 τ_i 为换流站设备参数。| Z_1 |、 θ_1 、| Z_2 |、 θ_2 、| Z_{12} |、 θ_{12} 为受端系统参数。若在系统运行过程中, 不改变变压器分接头和不投切补偿电容器, 则可认为换流站设备参数是固定不变的。同样在系统运行方式确定后, 受端系统参数也是固定的。交流系统采用戴维宁等效电路得到的等效电源参数也假定是固定的。这样上述方程中剩余的运行状态变量: γ_i 、 μ_i 、 U_{di} 、

I_{di} 、 P_{di} 、 Q_{di} 、 U_i 、 δ_i 、 P_i 、 P_{ij} 、 Q_i 、 Q_{ij} 、 Q_{ci} ($i, j=1, 2$, 且 $i \neq j$) 共有 26 个。而方程(4)~(14)在 $i, j=1, 2$ 且 $i \neq j$ 情况下共有 22 个约束方程。因此一旦确定 26 个状态变量中的任意 4 个变量, 其余变量也就能被确定。

在图 1 所示的两馈入直流系统简化模型中, 2 条直流均工作在恒定熄弧角/恒定电流控制方式。在以下分析中, 选取 γ_1 、 I_{d1} 、 γ_2 、 I_{d2} 为独立分量。首先假定换流站设备参数和受端系统参数, 暂定 $S_{Ti}=1.15P_{dNi}$, $u_{ki}=0.18$, $\tau_i=1$, 则利用式(15)得出 $C_i=1.525$ 。取 $Q_{cNi}=Q_{dNi}$, 受端系统参数 $|Z_1|=1/2$, $|Z_2|=1/4$, $|Z_{12}|=1$, $\theta_1=\theta_2=\theta_{12}=90^\circ$, 则 2 条直流系统的多馈入有效短路比由式(3)计算为 $K_{MESCR1}=1.84$, $K_{MESCR2}=3.06$ 。

模型系统在额定状况下运行时, 有 $\gamma_i=\gamma_N=18^\circ$, $U_i=1$, $P_{di}=1$, $I_{di}=1$ 。可由式(4)确定 μ_{Ni} , 由式(6)确定常数 K_i , 又由式(5)(12)确定 b_{ci} , 最后取 $E_1 \angle \psi_1$ 为平衡节点, 由式(13)(14)确定交流系统等效电源参数。保持交流系统等效电源参数不变, 对于给定的 γ_1 、 I_{d1} 、 γ_2 、 I_{d2} , 求解式(6)(13)(14)组成的非线性方程组, 可以确定其余所有的运行状态变量。通过以上方法, 可以画出在给定不同的 γ_1 、 γ_2 、 I_{d2} 时, 状态变量 P_{d1} 随 I_{d1} 的变化曲线。

3.2 最大直流功率分析

图 1 中直流系统 1 工作在恒定熄弧角控制方式时, 直流系统 2 的电流不发生变化, 且保持稳定运行。 I_{d1} 增加时, P_{d1} 也随之增加, 但当增加到某一值时, 由于 U_{d1} 的下降程度大于 I_{d1} 的增加, P_{d1} 开始下降, 因此存在该运行方式下的最大直流功率。文献[8]定义多馈入直流系统的最大直流功率(multi-infeed maximum available power, MMAP)应满足

$$\left. \frac{dP_{di}}{dI_{di}} \right|_{\Delta\psi_i=0} = 0, \quad i \neq j \quad (16)$$

图 2 给出了两馈入直流系统简化模型中直流系统 1 单独运行和与直流系统 2 形成多馈入运行 2 种情况的功率曲线。图 2 中横坐标为直流系统 1 的直流电流, 纵坐标为直流系统 1 的直流有功功率, 单位均为标么值。由最大功率曲线法可知, 当系统运行在最大直流功率点的左侧时, 即 $\left. \frac{dP_{di}}{dI_{di}} \right|_{\Delta\psi_i=0} > 0$ ($i \neq j$) 区域内, 系统是稳定的; 当系统运行在最大直流功率点的右侧时, 即 $\left. \frac{dP_{di}}{dI_{di}} \right|_{\Delta\psi_i=0} < 0$ ($i \neq j$) 区域内, 系统是不稳定的。由图 2 得出, 直流系统 1 单独运

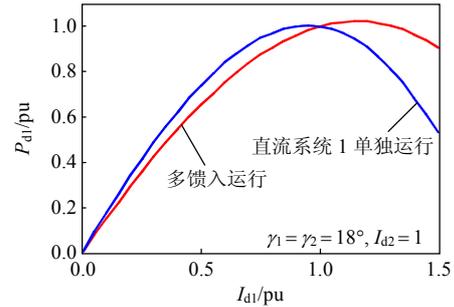


图 2 单馈入与多馈入最大功率曲线
Fig. 2 Maximum power curve of single-infeed and multi-infeed

行时, 额定工作点位于最大功率点右侧, 系统处于不稳定状态。当与直流系统 2 相联形成多馈入运行后, 直流系统 1 的额定工作点位于最大功率点左侧, 系统能够稳定运行。这说明与强交直流系统相联, 能有效提高直流系统功率稳定裕度和直流功率输送能力, 改善系统稳定性。

计及直流间相互作用后, 直流系统 2 运行状态变化会对直流系统 1 功率稳定性造成影响。让 2 条直流均工作在恒定熄弧角控制方式 $\gamma_1=\gamma_2=18^\circ$, 设定 I_{d2} 为 0.1~1.5 pu 之间的任意常数, 这样每一个 I_{d2} 都能画出一条直流功率 P_{d1} 随 I_{d1} 的变化曲线, 这些曲线共同构成了一个三维图形, 如图 3 所示。

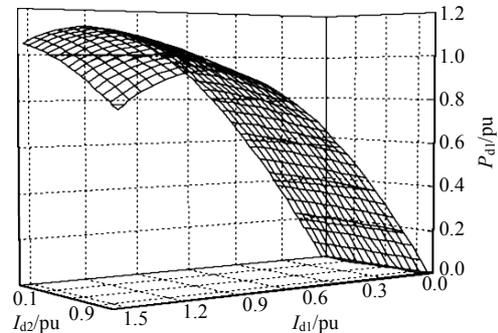


图 3 多馈入最大功率曲线三维图
Fig. 3 Three dimensional view of multi-infeed maximum power curve

图 3 中 I_{d2} 取值的不同, 能明显影响 P_{d1} 最大直流功率和最大功率点的位置。将三维图形从正视角投影到 1 个平面, 可观察直流系统 2 的电流 I_{d2} 变化对直流系统 1 功率稳定性的影响, 如图 4 所示。

由 3 条曲线对比可看出, 当直流系统 2 的电流越小, 第 1 回直流的功率稳定裕度越大, 所能达到的多馈入直流系统最大直流功率也越大。

在多馈入直流系统中, 直流与直流通过联接在换流站换流母线上的耦合阻抗 Z_{12} 来相互作用。耦合阻抗 Z_{12} 的大小, 反映了直流系统 1、2 之间电气耦合的紧密程度。 Z_{12} 越小, 表明直流系统 1、2 之间

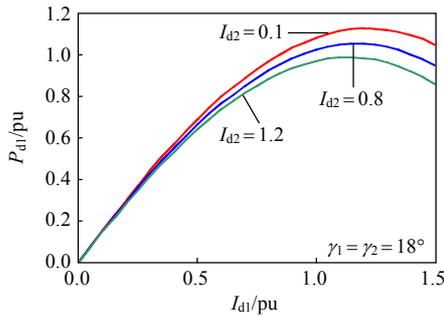


图 4 三维图正视图

Fig. 4 Front view of three dimensional view

电气距离越近, 2 直流系统耦合程度越紧密。图 5 给出了当耦合阻抗 Z_{12} 取不同值时, 直流系统 1 的直流功率 P_{d1} 随 I_{d1} 的变化曲线。图 5 表明减小与强交直流系统之间的电气距离, 能有效提高直流系统功率稳定裕度, 增大多馈入直流系统最大直流功率, 改善系统稳定性。

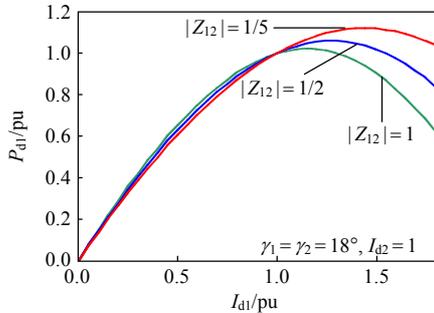


图 5 不同 Z_{12} 的多馈入最大功率曲线

Fig. 5 Multi-infeed maximum power curve with different Z_{12}

在单条直流系统功率输送能力分析中得到, 直流系统短路比较小时, 额定工作点可能位于最大功率点的右侧, 系统处于不稳定状态。提高直流系统短路比, 可以有效改善系统稳定性, 提高功率稳定裕度。为考察两馈入直流系统简化模型中, 直流系统 2 短路比大小的变化对直流系统 1 功率稳定性的影响, 改变直流系统 2 受端系统参数 $|Z_2|$ 分别为 1/3、1/5、1/7。从而得到直流系统 2 多馈入有效短路比等于 2.31、3.81、5.30。3 种情况下, 直流系统 1 的直流功率 P_{d1} 随 I_{d1} 的变化曲线, 如图 6 所示。

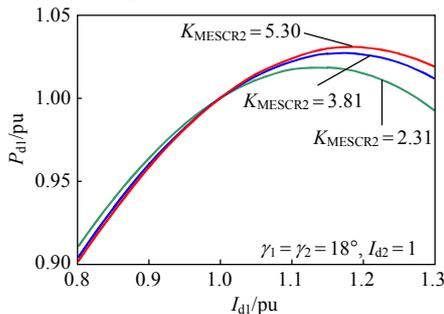


图 6 不同 K_{MESCR2} 的多馈入最大功率曲线

Fig. 6 Multi-infeed maximum power curve with different K_{MESCR2}

对比曲线得出, 适当提高直流系统 2 的多馈入有效短路比大小, 能有效提高直流系统 1 的多馈入直流系统最大功率, 提高功率稳定裕度。

4 结论

1) 与强交直流系统相联形成多馈入直流系统, 能有效增大直流系统的功率稳定裕度, 改善系统稳定性。

2) 在多馈入直流系统中, 减小所联直流系统电流、直流间电气距离、增大所联系统多馈入有效短路比均能有效增大直流系统的功率稳定裕度, 提高直流功率输送能力和最大直流功率, 有效改善系统稳定性。

参考文献

- [1] Kunder P. Power system stability and control[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 351-354.
- [2] 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: 153-167.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 10-25.
- [4] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.
Lin Weifang, Tang Yong, Bu Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12(in Chinese).
- [5] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
Shao Yao, Tang Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30 (in Chinese).
- [6] 邱革非, 束洪春, 董俊, 等. 联于弱交流系统的 HVDC 输电系统输电能力和电压稳定性的研究[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2005, 30(3): 50-55.
Qiu Gefei, Shu Hongchun, Dong Jun, et al. Analysis of power transmission capability and voltage stability of HVDC system connected to weak AC system[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology Edition, 2005, 30(3): 50-55(in Chinese).
- [7] Denis L H A, Andersson G. Power stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [8] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.
Lin Weifang, Tang Yong, Bu Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8(in Chinese).
- [9] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一: 直流输电的输送能力[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 12-16.
Xu Zheng. Characteristics of HVDC connected to weak AC systems part 1: HVDC transmission capability[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16(in Chinese).
- [10] 吴冲, 李兴源, 何朝荣. 多馈入直流交互作用因子在换相失败研

- 究中的应用[J]. 继电器, 2007, 35(9): 26-31.
- Wu Chong, Li Xingyuan, He Chaorong. Application of multi-infeed interaction factor in South Grid commutation failure research[J]. Relay, 2007, 35(9): 26-31 (in Chinese).
- [11] 洪潮, 饶宏. 多馈入直流系统的量化分析指标及其应用[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 37-41.
- Hong Chao, Rao Hong. The index parameters for analyzing multi-infeed HVDC systems and their applications[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 37-41 (in Chinese).
- [12] 张啸虎, 白加林, 陈陈, 等. 长三角地区多馈入直流输电系统交互影响特性分析[J]. 华东电力, 2009, 37(3): 444-448.
- Zhang Xiaohu, Bai Jialin, Chen Chen, et al. Interaction characteristics of multi-infeed HVDC systems in Yangtze River Delta region[J]. East China Electric Power, 2009, 37(3): 444-448(in Chinese).
- [13] 郭小江, 卜广全, 马世英, 等. 西南水电送华东多送出多馈入直流系统稳定控制策略[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 56-61.
- Guo Xiaojiang, Bu Guangquan, Ma Shiyang, et al. System stability control strategy for multi-send & multi-infeed HVDC project from Southwest hydropower stations to East China power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 56-61(in Chinese).
- [14] Krishayya P C S, Adapa R, Holm M, et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities, part I: AC/DC system interaction phenomena[R]. France: CIGRE, 1997.
- [15] Denis L H A, Andersson G. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1318-1308.
- [16] Davies J B. Systems with multiple DC infeed[J]. Electra, 2007(233): 14-19.
- [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] 李新年, 李涛, 王晶芳, 等. 云广±800 kV 特高压直流对南方电网稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 21-26.
- Li Xinnian, Li Tao, Wang Jingfang, et al. Impacts of ±800 kV DC power transmission from Yunnan to Guangdong on stability of China Southern power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 21-26(in Chinese).
- [19] 余涛, 沈善德, 任震. 华中—华东多回 HVDC 紧急功率转移控制的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 1-4, 19.
- Yu Tao, Shen Shande, Ren Zhen. Research on emergency power shifting control of multi-circuit HVDC systems from central China power grid to East China power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 1-4, 19(in Chinese).
- [20] Paulo F D T, Bernt B, Gunnar A. Multiple infeed short circuit ratio: aspects related to multiple HVDC into one AC network[C]// Transmission and Distribution Conference & Exhibition. Asia and Pacific, Dalian, China: IEEE, 2005: 1-6.



陈虎

收稿日期: 2010-08-30。

作者简介:

陈虎(1986), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为交直流电力系统的交互影响及其稳定与控制, E-mail: ch_scu@163.com;

张英敏(1974), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

贺洋(1984), 男, 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制;

定与控制;

李兴源(1945), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 长期从事高压直流输电、电力系统稳定与控制、分布式发电等研究工作。

(责任编辑 王晔)