

基于 VSC-HVDC 有功支援和自适应低频减载的 区域电网频率控制

鲍正杰, 李生虎

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 相比采用交流线路连接, 当区域电网采用柔性直流输电 (VSC-HVDC) 连接时, 主网不主动响应区域电网频率变化, 降低了区域电网调频能力。提出基于 VSC-HVDC 有功支援和自适应低频减载的区域电网控制算法。当区域电网频率跌落时, 利用增量法估计有功功率缺额。在保证主网频率安全的前提下, 通过 VSC-HVDC 向区域电网提供有功支援。然后根据区域电网频率跌落幅度, 确定是否进行低频减载, 设计了自适应低频减载算法。仿真结果表明, 所提出的频率控制算法能有效维持区域电网频率稳定, 减少低频减载量。

关键词: 柔性直流输电; 区域电网; 有功支援; 自适应低频减载; 频率控制

Frequency control for regional system based on active power support from VSC-HVDC and adaptive under-frequency load shedding

BAO Zheng-jie, LI Sheng-hu

(School of Electrical Engineering and Its Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: When the regional power system is connected to main grid with the Voltage Source Converter based HVDC (VSC-HVDC), the main grid does not actively respond to frequency drop of the regional system; thus the regional system has less frequency control capability compared with that connected with AC line. Frequency control algorithm based on active power support from VSC-HVDC and adaptive under-frequency load shedding is proposed. With frequency drop in the regional system, the active power deficiency is estimated with the incremental method. With precondition of frequency security of the main grid, active power support is provided to the regional system by the VSC-HVDC. The adaptive under-frequency load shedding strategy is designed according to subsequent frequency drop. The numerical results show that the proposed algorithm effectively maintains frequency stability of the regional system and decreases load shedding.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277049).

Key words: VSC-HVDC; regional system; active power support; adaptive under-frequency load shedding; frequency control

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0032-06

0 引言

柔性直流输电(VSC-HVDC)采用电压源换流器, 实现有功和无功的解耦控制, 不需要交流侧提供无功, 没有换相失败问题, 降低了谐波水平^[1], 在电网互联、风电并网、海岛供电及城网改造等领域得到广泛应用^[2-3]。VSC-HVDC 线路传输有功一般为设定值。当其用于区域电网连接主网时, 后者不能主动响应前者频率变化, 因此较通过交流线路连接时, 区域电网调频能力有所下降。但是若能利

用 VSC-HVDC 快速有功调节能力, 有可能改善区域电网调频能力。

基于脉宽调制技术, VSC-HVDC 可以快速改变输送有功功率以控制频率。文献[4]提出增加辅助频率控制外环, 抑制故障时频率波动。文献[5]设计频率控制器, 维持换流站出口母线频率。文献[6]利用 VSC-HVDC 功率传输特性, 与交流输电控制频率振荡。这些研究表明, 可通过改变 VSC-HVDC 输送有功参与区域电网频率控制。但是上述文献没有估计主网增发有功能力, 也没有分析当 VSC-HVDC 增输有功有限时, 区域电网如何进行减载。

低频减载(UFLS)是一种常用的频率紧急控制措施^[7-9]。在现有带时延多轮预定减载量的传统减载方案^[10]基础上, 基于频率变化率(Rate of Change of Frequency, ROCOF), 可以柔性设计减载方案^[11], 其中半自适应减载方案只在第一轮基于 ROCOF 减载, 后续轮仍基于传统方案, 而自适应减载方案所有减载轮次都基于 ROCOF^[12], 针对不同频率跌落情况更有选择性。文献[13]提出基于系统频率、ROCOF 以及惯性时间常数的减载算法。文献[14]在系统频率跌落时, 放弃经济调度, 利用发电机组增发有功, 并通过自适应减载措施提升频率。文献[15]提出计及负荷电压、频率特性的自适应低频减载算法。文献[16]研究了利用频率变化率和电压灵敏度确定切负荷量和切除地点。这些自适应低频减载算法, 依赖于离线计算惯性时间常数, 而电网运行方式改变将引起惯性时间常数变化, 导致系统有功缺额计算不准, 影响低频减载效果。

针对通过 VSC-HVDC 连接主网的区域电网, 本文研究了其频率控制和低频减载策略。计及主网有功支援能力, 以主网可接受的频率跌落为代价, 通过 VSC-HVDC 向区域电网提供有功支援, 尽可能维持区域电网频率。通过增量法估计区域电网惯性时间常数, 估计有功缺额, 设计区域自适应减载策略。通过 VSC-HVDC 有功支援和区域电网低频减载共同维持区域电网频率安全。

1 VSC-HVDC 对区域电网调频能力影响

如图1所示, 当仅通过 VSC-HVDC 连接主网 A, 区域电网 B 成为频率孤岛。当有功缺额导致频率跌落时, 只有区域电网内的发电机参与频率调节, 而无法发挥主网机组的调频作用。

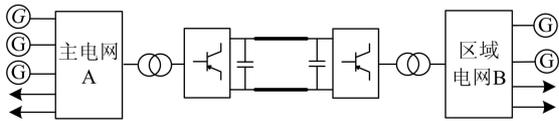


图1 通过 VSC-HVDC 连接的区域电网

Fig. 1 Regional system linked with VSC-HVDC

基于暂态频率控制时间框架, 忽略调速系统二次调频和优化经济调度, 利用一次调频特性估计主电网可支援有功能力。对单台发电机有

$$K_G = -\frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (1)$$

其中: K_G 为发电机单位调节功率; Δf 为频率跌落值; ΔP 为发电机增发的有功功率。则 N 机系统有功缺额为

$$\Delta P_\Sigma = -\Delta f \sum_{i=1}^N K_{G,i} \quad (2)$$

设区域电网有功缺额为 ΔP_B , 从主网传输到区域电网的有功为 ΔP_{AB} 。当采用交流线路连接时, 主网和区域电网频率跌落为 Δf , 有

$$\begin{cases} \Delta P_{AB} = -\sum_{i=1}^{N_A} K_{G,i} \Delta f \\ \Delta P_B - \Delta P_{AB} = -\sum_{i=1}^{N_B} K_{G,i} \Delta f \end{cases} \quad (3)$$

解得

$$\begin{cases} \Delta f = -\frac{\Delta P_B}{\sum_{i=1}^{N_A} K_{G,i} + \sum_{i=1}^{N_B} K_{G,i}} \\ \Delta P_{AB} = \frac{\Delta P_B \sum_{i=1}^{N_A} K_{G,i}}{\sum_{i=1}^{N_A} K_{G,i} + \sum_{i=1}^{N_B} K_{G,i}} \end{cases} \quad (4)$$

当采用 VSC-HVDC 线路相连时, 主网频率不受影响, 区域电网频率跌落为

$$\Delta f' = -\frac{\Delta P_B}{\sum_{i=1}^{N_B} K_{G,i}} \quad (5)$$

两种连接方式下区域电网的跌落频率比值为

$$\frac{\Delta f'}{\Delta f} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} K_{G,i} + \sum_{i=1}^{N_B} K_{G,i}}{\sum_{i=1}^{N_B} K_{G,i}} \quad (6)$$

主网装机容量一般远大于区域电网。相同有功缺额下, 通过 VSC-HVDC 线路连接时区域电网频率跌幅将远大于通过交流线路连接时, 可能导致区域电网大量失负荷, 甚至全部停电。

2 改进自适应低频减载方法

自适应低频减载算法依赖于离线方式下得到的机组惯性时间常数, 后者随电网运行方式变化而变化, 导致功率缺额估计误差较大, 因此最好通过在线参数估计。令发电机摇摆方程为

$$2H \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (7)$$

其中: H 为惯性时间常数; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; ω 为转速, 标幺制下与电网频率 f 相等。当转速变化较小时, 有功缺额为

$$\Delta P = P_m - P_e = 2H \frac{df}{dt} \quad (8)$$

区域电网有功缺额为

$$\Delta P_B = \sum_{i=1}^{N_B} \Delta P_i = 2 \sum_{i=1}^{N_B} H_i \frac{\sum_{i=1}^{N_B} (H_i \frac{df_i}{dt})}{\sum_{i=1}^{N_B} H_i} = \quad (9)$$

$$2 \sum_{i=1}^{N_B} H_i \frac{df_c}{dt} = 2\xi \frac{df_c}{dt}$$

其中： f_c 为等效惯性中心频率； ξ 为等效惯性时间常数，分别定义如式（10）。

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} H_i f_i}{\sum_{i=1}^{N_B} H_i}, \quad \xi = \sum_{i=1}^{N_B} H_i \quad (10)$$

在区域电网存在有功缺额时，利用增量法在线估计等效惯性时间常数。区域电网故障时，测量频率变化率 df/dt ，令其为 a 。然后增加主网输往区域电网的有功，即 VSC-HVDC 增加输送有功 ΔP_{HVDC} ，测量区域电网此时频率变化率 df/dt ，令其为 b 。估计区域电网等效惯性时间常数 ξ 为

$$\xi = \frac{\Delta P_{HVDC}}{2(a-b)} \quad (11)$$

求得等效惯性时间常数后，即可利用式(9)和 df/dt 计算区域电网有功缺额。但是该缺额能否完全由 VSC-HVDC 线路提供，取决于主网有功支援能力以及 VSC-HVDC 线路输电裕度。

3 VSC-HVDC 连接区域电网的频率控制

在区域电网发生有功缺额时，利用发电机调频特性估计主电网在可承受频率跌落下的最大支援能力；以此为依据增加 VSC-HVDC 输送有功，让主网机组也参与调频，与区域电网低频减载配合，尽可能少切区域电网负荷。

考虑到主网规模，设定 0.1 Hz 作为其可接受频率跌落幅度，同时留出 20%的裕度，确定最大可支援有功 $P_{support}$ 。

$$P_{support} = 80\% \Delta f \sum_{i=1}^N K_{G,i} \quad (12)$$

当区域电网频率降至 49.8 Hz 且继续跌落时，启动频率控制措施，算法流程见图 2。

首先测量区域电网等效惯性中心频率及 ROCOF，利用增量法算得惯性时间常数，确定有功缺额 P_{short} 。考虑区域电网机组调频能力，并避免频率超调，按其有功缺额的 80%，结合主网有功调节能力，增加 VSC-HVDC 输送有功。为减小增输有功导致两个系统频率大幅波动，分三步调节换流器的有功参考值，功率支援过慢导致区域电网频率进一步跌落，故每步之间间隔时间定为 0.02 s。

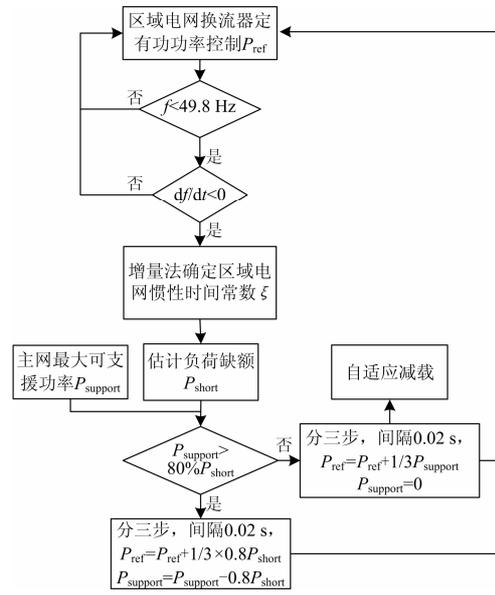


图 2 区域电网频率控制策略

Fig. 2 Frequency control strategy for regional system

实现主网有功功率支援后，再根据区域电网频率跌幅确定是否启动低频减载措施。若频率仍然较低，延时启动区域电网自适应低频减载措施。

上述频率控制方法具有以下优点：充分利用主网调频能力和区域电网低频减载策略以维持频率稳定；只需用到主网机组单位调节功率和有功裕度，易于实现。

4 仿真分析

采用改造后 IEEE New England 测试系统（图 3），节点 21-24、35、36 作为区域电网，通过交流线路或 VSC-HVDC 线路 16-24 与主电网连接，以下简记为方式 1 和方式 2。

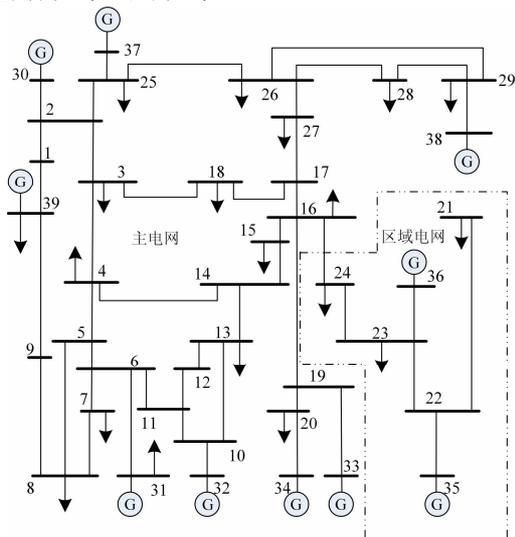


图 3 改造后 New England 测试系统

Fig. 3 Modified New England test system

4.1 VSC-HVDC 对区域电网调频特性影响

区域电网节点 23 负荷增加 30%，图 4 和图 5 给出两种方式下主电网和区域电网频率动态响应。

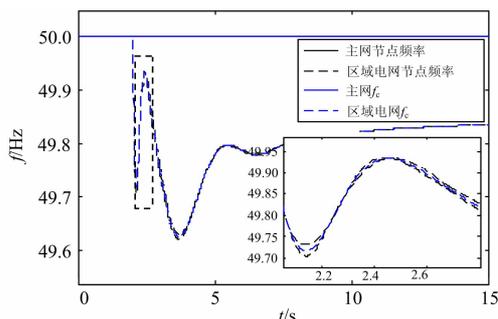


图 4 方式 1 的电网频率

Fig. 4 Grid frequency with case

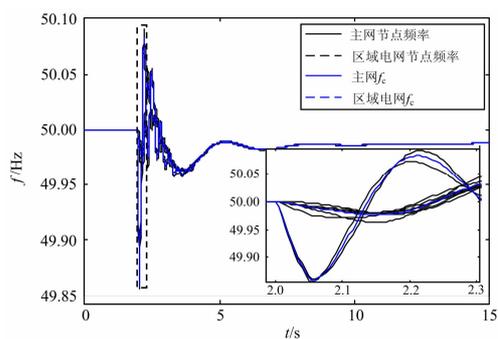


图 5 方式 2 的电网频率

Fig. 5 Grid frequency with case 2

通过交流线路连接时，主网和区域电网机组共同参与频率调节，区域电网频率跌至 49.86 Hz 左右。通过 VSC-HVDC 连接时，主网机组没有参与频率调节，区域电网频率跌落到 49.65 Hz。显然，主网机组参与区域电网频率调节，能有效提升后者频率，而 VSC-HVDC 隔离了两个系统的频率联系。

动态仿真结果还表明，主网和区域电网中各节点频率都在各区域的等效惯性中心频率的附近，表明等效惯性中心频率能较好地描述区域中各节点频率特性。

4.2 区域电网频率控制效果

取 0.5 s 时节点 23 负载增大 50%。由仿真结果得到区域电网的 ROCOF 为 0.24，向区域电网增加输电量 0.1 pu，ROCOF 变为 0.232 4，可得区域电网 ξ 为 6.58，从而估计系统有功缺额为 3.158 4。

区域电网和主电网的等效惯性中心频率如图 6 所示。区域电网最低频率在 49.72 Hz 以上，稳定频率在 49.95 Hz 左右；主电网的最低频率在 49.92 Hz 以上。因此，主网通过 VSC-HVDC 增加有功支援，

在保证自身频率安全同时提高了区域电网频率。

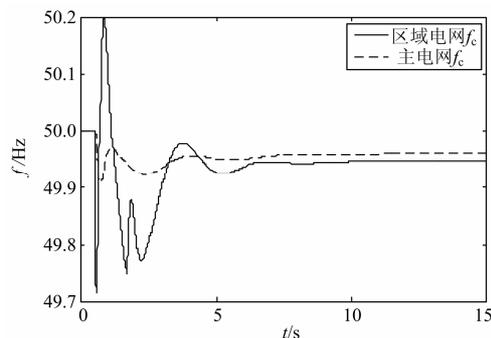


图 6 区域电网和主网频率

Fig. 6 Frequency of regional and main systems

在此过程中，VSC-HVDC 换流站有功如图 7 所示。在改变有功参考值后，换流站快速调整有功出力，体现了 VSC-HVDC 参与调频的可行性。

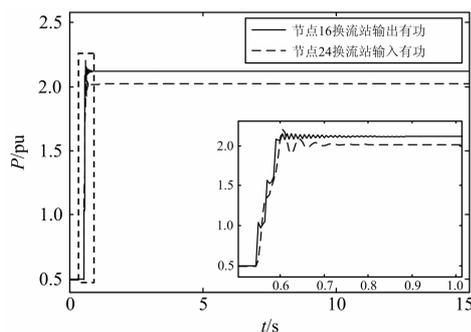


图 7 换流站有功曲线

Fig. 7 Active power curve of converter stations

为了表明 VSC-HVDC 有功支援对区域电网频率的影响，制定减载策略：方案一不依赖主网有功支援，当区域电网频率跌落到 49.8 Hz 时启动区域电网自适应减载措施；方案二在频率跌落到 49.8 Hz 时启动主网有功支援，延时 0.1 s 后，频率跌落到 49.75 Hz 时自适应低频减载动作。具体如表 1 所示 (ΔP_1 为没有功率支援下的有功缺额， ΔP_2 为得到主网有功支援后的缺额)。

区域电网频率响应见图 8，减载结果见表 2，显然方案一最低频率和稳定频率都高于方案二。方案一切除六轮负荷，共 2.210 7 pu；方案二在得到主网 1.627 5 pu 的有功支援后，仅进行一轮减载，且切负荷量远少于前者。

由上述仿真可知，区域电网频率跌落时，主网在保证自身频率安全的前提下，通过 VSC-HVDC 线路给区域电网一定有功支援，有助于区域电网维持频率稳定，减少低频减载量。

表 1 自适应低频减载多轮策略

Table 1 Adaptive UFLS strategy

轮次	方案一	方案二
	无	49.80 Hz 时主网有功支援, 延时 0.1 s
第一轮	49.80 Hz (35% ΔP_1)	49.75 Hz (35% ΔP_2)
第二轮	49.75 Hz (10% ΔP_1)	49.70 Hz (10% ΔP_2)
第三轮	49.70 Hz (10% ΔP_1)	49.65 Hz (10% ΔP_2)
第四轮	49.65 Hz (5% ΔP_1)	49.60 Hz (5% ΔP_2)
⋮	⋮	⋮
第十轮	49.35 Hz (5% ΔP_1)	49.30 Hz (5% ΔP_2)

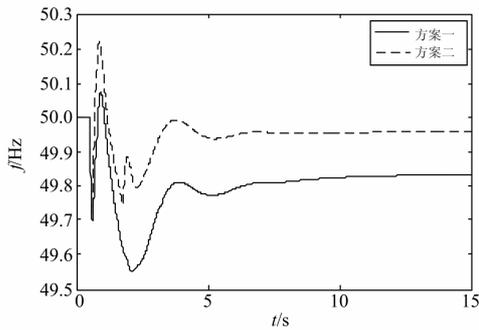


图 8 频率控制效果对比

Fig. 8 Comparison of frequency control results

表 2 低频减载结果比较

Table 2 Comparison of under-frequency load sheddings

轮次	方案一	方案二
第一轮	1.105 4 pu	0.535 8 pu
第二轮	0.315 8 pu	无
第三轮	0.315 8 pu	无
第四轮	0.157 9 pu	无
第五轮	0.157 9 pu	无
第六轮	0.157 9 pu	无

5 结论

(1) 通过 VSC-HVDC 连接区域电网发生有功缺额时, 主网增加 VSC-HVDC 输送有功, 向区域电网提供有功支援, 辅以区域电网自适应低频减载措施, 可维持区域电网频率安全, 并少切负荷。

(2) 根据主网机组单位调节功率, 可大致估计其一次调频能力, 确定其有功支援能力。利用增量法计算等效惯性中心频率, 可在线估计区域电网惯性时间常数和有功缺额, 无需区域电网详细机组参数, 便于在线实现。

参考文献

[1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
 [2] 陈海荣, 徐政. 基于同步坐标变换的 VSC-HVDC 暂态模型及其控制器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2):

121-126.

CHEN Hai-rong, XU Zheng. Transient model and controller design for VSC-HVDC based on synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 121-126.

[3] 冯明, 李兴源, 李宽, 等. 多端柔性直流输电系统启动控制及其仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 60-65.

FENG Ming, LI Xing-yuan, LI Kuan, et al. Control and simulation of VSC-MTDC start-up procedure[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 60-65.

[4] 范心明, 管霖, 何健明. 多电平柔性直流输电定有功功率控制与频率辅助控制[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 182-186.

FAN Xin-ming, GUAN Lin, HE Jian-ming. Constant active power and frequency auxiliary control for multilevel VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 182-186.

[5] DU C, AGNEHOLM E, OLSSON G. Comparison of different frequency controllers for a VSC-HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(4): 2224-2232.

[6] RAKHSHANI E, LUNA A, RODRIGUEZ K, et al. Effect of VSC-HVDC on load frequency control in multi-area power system[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Raleigh, NC, 2012: 4431-4436.

[7] DL 428-2010 电力系统自动低频减负荷技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[8] GB/T 15945-2008 电能质量 电力系统频率偏差[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[9] DL755-2001 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

[10] 李生虎, 贾树森, 孙莎莎. 交直流系统中低频减载与负荷恢复的静态优化算法[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 71-75.

LI Sheng-hu, JIA Shu-sen, SUN Sha-sha. A static optimization algorithm of underfrequency load shedding and load recovery for AC/DC systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 71-75.

[11] 王君, 王晓茹, 谢大鹏, 等. 孤岛系统的低频减载方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 29-33, 52.

- WANG Jun, WANG Xiao-ru, XIE Da-peng, et al. Investigation of under frequency load shedding and isolated system[J]. Power system Protection and control, 2010, 38(3): 29-33, 52.
- [12] 鲍正杰, 李生虎, 朱婷涵. 含柔性直流输电电力系统的改进低频减载算法[C] // 第十四届全国保护和控制学术研讨会, 郑州, 2013.
- BAO Zheng-jie, LI Sheng-hu, ZHU Ting-han. Improved under-frequency load shedding algorithm for power system with VSC-HVDC[C] // 14th National Protection and Control Symposium, Zhengzhou, 2013.
- [13] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 647-653.
- [14] CHUVYCHIN V N, GUROV N S, VENKATA S S, et al. An adaptive approach to load shedding and spinning reserve control during underfrequency conditions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1805-1810.
- [15] ELKATEB M M, DIAS M F. New proposed adaptive frequency load shedding scheme for cogeneration plants[C] // International Conference on Development in Power System Protection, London, UK, 1993: 236-239.
- [16] 张执朝, 王增平, 方攀宇. 考虑系统电压影响的低频减载新策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 1-6.
- ZHANG Zhi-chao, WANG Zeng-ping, FANG Pan-yu. A new UFLS strategy considering system voltage influence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 1-6.

收稿日期: 2014-01-14

作者简介:

鲍正杰(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电技术; E-mail: wpslabhfut@126.com

李生虎(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术。