

交直流并联电网中直流功率紧急控制影响及优化研究

李兆伟, 任先成, 刘福锁, 李威, 方勇杰

(国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 直流功率紧急控制可以提高故障后系统的暂态稳定水平, 广域测量系统(WAMS)的快速发展为实现大电网交直流协调控制提供了技术前提。基于扩展等面积准则(EEAC)介绍了直流功率紧急控制提高系统暂态稳定性的机理, 针对交直流并联电网中直流功率紧急控制造成的送受端电网不平衡功率通过交流通道形成的反馈可能导致某些关键断面潮流加重、恶化系统失稳模式的问题, 认为交流控制措施(切机、切负荷)和直流功率紧急控制措施存在协调的空间。为评价交直流协调控制效果, 建立了交直流协调优化控制的数学模型, 将该协调问题转换为以控制代价最小为目标的优化问题。通过实际系统的仿真算例验证了交直流协调优化的必要性。

关键词: 交直流并联电网; 直流功率紧急控制; 交直流协调优化; 扩展等面积准则(EEAC)

Research on effects and optimization of emergency DC power control in AC/DC hybrid power grid

LI Zhao-wei, REN Xian-cheng, LIU Fu-suo, LI Wei, FANG Yong-jie

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: With the development of interconnected scale of power grid, the foundation to realize large scale resource optimization configuration is established, and power system stability problems become complicated. More comprehensive control measures for large scale power grid security and stability control will be supported by wide area measurement system (WAMS). The mechanism of power system transient stability improved by emergency DC power control (EDCPC) is introduced based on extended equal area criterion (EEAC) theory. In AC/DC parallel connection grid, the imbalanced power induced by EDCPC will cause an extra feedback which might make adverse effects on some unstable mode through AC transmission lines. As a result there exit coordinated space between EDCPC measures and AC control measures, such as generators tripping, load tripping and so on. To evaluate the effects of AC/DC coordination control, a coordinated and optimal mathematical model is built. It is necessary for AC/DC coordination control which is verified by simulation.

Key words: AC/DC parallel connection grid; EDCPC; AC/DC coordination control; EEAC

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0104-06

0 引言

电网互联规模的不断扩大, 增强了系统间的资源优化配置能力, 也导致电网稳定问题趋于复杂。广域测量系统(Wide Area Measurement system, WAMS)的快速发展为解决大电网安全稳定问题提供了丰富的控制手段, 基于广域测量信息构建的全局协调紧急控制系统, 可以协调利用交直流控制措施保证系统安全稳定运行^[1-7]。

直流功率紧急控制可以提高故障后系统的暂态稳定水平^[8-14], 文献[8]基于直流功率紧急控制的功

能及现行的安全稳定导则把直流功率紧急控制归类为电网稳定控制第二道防线, 指出直流功率紧急控制快速提升或降低直流功率可以达到切机或切负荷的稳定控制效果。文献[9]基于锦苏特高压直流投运后的安全稳定特性, 研究了利用直流功率紧急控制保障系统安全稳定的控制措施, 可有效减少切机、切负荷措施量。文献[10]基于特高压互联电网, 指出利用直流功率紧急控制措施可以减少华中电网的切机切负荷量, 增强特高压互联系统的暂态稳定性。由于直流的控制成本要远小于切机(切负荷)的成本, 目前的交直流协调一般优先使用直流功率紧急控制, 然后再考虑切机切负荷措施^[9-10, 15-17]。这种协调方法没有看到直流功率紧急控制可能带来的问

基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG003-2012); 国家电网公司科技项目资助课题

题, 且缺少系统的协调优化模型。

本文首先基于 EEAC 理论^[18]简要解释了直流功率紧急控制提高系统暂态稳定性的机理, 分析了直流功率紧急控制可能带来的问题, 尤其是在交直流并联系统中, 可能会恶化 (或改善) 系统的暂态稳定性。考虑交直流控制措施的控制代价建立了交直流协调优化控制的数学模型, 以控制代价最小作为优化目标。在实际大型互联电网中的仿真计算验证了交直流控制措施协调优化的必要性。

1 直流功率紧急控制提高系统暂态稳定性的机理及可能带来的问题

1.1 直流功率紧急控制提高系统暂态稳定性机理的简单描述

EEAC 建立了非线性稳定性的故障失稳模式 (Unstable Mode, UM) 概念^[19], 把多机系统的同步稳定性分析和控制归结为对其主导互补机群的研究。基于系统主导模式将发电机分为领前群 (S 群) 和余下群 (A 群), 利用互补群惯量中心相对运动变换 (CCCOI-RM), 主导模式分群方式下等值单机系统的映象可表示为^[18]

$$\ddot{\delta} = \ddot{\delta}_s - \ddot{\delta}_a = \frac{P_{ms} - P_{es}}{M_s} - \frac{P_{ma} - P_{ea}}{M_a} = \left(\frac{P_{ms}}{M_s} - \frac{P_{ma}}{M_a} \right) - \left(\frac{P_{es}}{M_s} - \frac{P_{ea}}{M_a} \right) = P_m - P_e \quad (1)$$

其中:

$$P_m = \frac{P_{ms}}{M_s} - \frac{P_{ma}}{M_a} \quad (2)$$

$$P_e = \frac{P_{es}}{M_s} - \frac{P_{ea}}{M_a} \quad (3)$$

式(1)中: P_{ms} 、 P_{es} 分别为领前群惯量中心的等值机械功率和等值电磁功率; P_{ma} 、 P_{ea} 分别为余下群惯量中心的等值机械功率和等值电磁功率; P_m 、 P_e 分别为等值单机无穷大系统的机械功率和电磁功率, 对单机系统可用等面积法则定量分析其暂态稳定性。

直流功率紧急控制措施类似于切机或切负荷。假设系统领前群存在一条受入功率的直流, 则回降该直流功率, 相当于在领前群中切除了没有惯量的机组, 即减小了式(1)中的 P_{ms} , 等效于减小了单机系统的机械功率, 从而减小了单机系统的加速面积, 有利于系统的首摆的暂态稳定性; 假设系统余下群

存在一条外送功率的直流, 则回降该直流功率, 相当于在余下群中切除了负荷, 即减小了式(1)中的 P_{ea} , 等效于增加了单机系统的电磁功率, 从而减小了单机系统的加速面积, 有利于系统首摆暂态稳定性。同理, 提升领前群外送直流功率、提升余下群受入直流功率也均是有利于系统首摆稳定性的控制措施。由此可以看出, 直流功率紧急调制可以提高系统的暂态稳定性, 与交流控制措施相似的是, 也存在会产生控制负效应^[20-21]的直流功率紧急控制措施, 在此不一一列举。

需要指出的是, 提升直流功率会导致系统潮流加重, 系统电压降低, 仿真发现一些情况下提升领前群直流功率提高系统暂态稳定性效果较差 (与切机和回降直流功率相比), 具体影响机理还需进一步研究。

1.2 直流功率紧急控制可能带来的问题

由于直流的控制成本要远小于切机 (切负荷) 的成本, 目前理论分析中一般优先使用直流功率紧急控制, 然后再考虑切机切负荷措施辅助, 协调的空间很小。究其原因, 现有的研究多是在直流异步联网的系统中完成的, EDCPC 造成的不平衡功率将在送端电网和受端电网中各自平衡, 不会在送受端电网间再形成反馈造成附加影响。而对于交直流并联电网, 直流功率调制造成的送受端功率缺额会通过送受端交流联络通道形成反馈, 加重或减轻一些重要交流联络断面的潮流, 严重情况下会恶化区域间失稳模式, 造成系统失稳。而交流控制措施不会在送受端电网同时造成不平衡功率, 在某些重要交流联络断面上造成的功率转移比 EDCPC 要小, 即恶化 (或改善) 区域间失稳模式的程度轻, 从这个角度看交流措施和直流措施存在协调控制的空间。图 1 所示为互联电网详细说明。

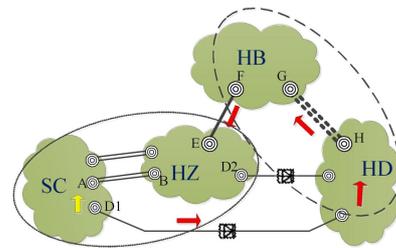


图 1 某互联电网示意图

Fig. 1 An interconnected power grid diagram

如图 1 中, 当交流线路 G-H 开断时, 电网 SC-HZ-HB 与电网 HD 通过直流 D1、D2 异步联接。假设对直流 D1 提升功率 ΔP , 其在电网 SC 中会造

成 ΔP 的功率缺额,在电网 HD 中造成 ΔP 功率盈余,由于二者间没有交流通道,因此不平衡功率在电网 SC-HZ-HB 与电网 HD 中各自消纳,没有相互作用。此时提升 D1 功率与在 SC 电网切机的效果基本相同(切机会切除惯量,存在微小差别)。由于切机的代价大于提升直流功率的代价,一般而言选用调制直流功率要优于切机,交直流协调优化空间较小。

当线路 G-H 闭合时,电网 SC-HZ-HB-HD 为交直流并联电网。假设对直流 D1 提升功率 ΔP ,将在 SC 电网造成 ΔP 功率缺额,在电网 HD 中造成 ΔP 功率盈余,由于存在交流通道 G-H、E-F,相比异步联网方式,送受端的不平衡功率还将对 E-F 线路的潮流产生附加影响。假设存在以线路 E-F 为关键断面的失稳模式,就可能降低(或提高)该模式的稳定裕度,此时提升 D1 功率的稳定控制效果可能要差于(优于)在 SC 电网内切机。相对于异步联网方式,交直流协调优化空间较大。

2 交直流协调优化的数学模型

交直流协调优化的目标是针对具体工况和故障,在所有措施组合中寻找出使系统稳定且代价最小的措施组合^[22-24]。假设考虑提升直流、回降直流、切机、切负荷四种控制措施,则交直流协调优化可描述为以下非线性整数规划问题。

$$\min\{c_{\text{gen}} \cdot \Delta P_G + c_{\text{dup}} \cdot \Delta P_{\text{dup}} + c_{\text{dcdown}} \cdot \Delta P_{\text{dcdown}} + c_{\text{load}} \cdot \Delta P_{\text{load}}\} \cdot T + C_{\text{restart}} \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \eta(\Delta P_G, \Delta P_{\text{dup}}, \Delta P_{\text{dcdown}}, \Delta P_{\text{load}}) > 0 \quad (5)$$

$$h(\Delta P_G, \Delta P_{\text{dup}}, \Delta P_{\text{dcdown}}, \Delta P_{\text{load}}) > 0 \quad (6)$$

其中: ΔP_G 为故障导致的切机总量; c_{gen} 为平均单位电量切机损失; ΔP_{dup} 为故障后直流功率提升总量; c_{dup} 为平均单位电量直流功率提升的代价(可理解为直流功率提升对设备影响的代价折算); ΔP_{dcdown} 为故障后直流功率回降总量; c_{dcdown} 为平均单位电量直流功率回降的损失(对本例中 HZ 电网,直流功率回降近似于损失负荷); ΔP_{load} 为故障导致的切负荷总量; c_{load} 为平均单位电量的切负荷损失; T 为故障后策略的持续时间; C_{restart} 为单台被切机组重新启动费用。据此数学模型可对不同的控制策略进行协调优化。式(5)表示采取控制措施后系统应保持稳定, η 为由 EEAC 提供的系统稳定裕度^[18]。式(6)表示各控制措施要满足容量限制。

3 算例分析

某实际系统示意图如图 1 所示, SC-HZ 断面功率为 SC 电网送 HZ 电网 400 万 kW, HB-HZ 断面

功率为 HB 电网送 HZ 电网 580 万 kW,分别对电网 SC-HZ-HB 与电网 HD 异步联网和同步联网进行仿真研究。计算中假设切机损失为 0.08 元/kWh,直流提升代价为 0.004 元/kWh,直流回降代价为 0.07 元/kWh,单台机组重新启动费用为 20 万元/次,系统恢复时间为 10 h。

1) 电网 SC-HZ-HB 与电网 HD 异步互联

假设线路 A-B 发生 N-2 故障,故障后不采取控制措施, SC 电网机组相对 HZ-HB 电网机组失稳。系统功角响应曲线如图 2 所示;故障后切 SC 网内机组 165 万 kW, HB 电网机组相对 SC-HZ 电网机组失稳,系统功角响应曲线如图 3 所示。

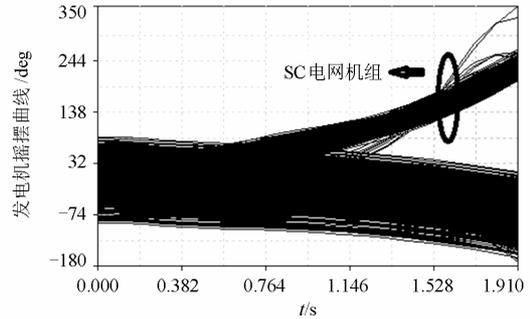


图 2 A-B 线路 N-2 后系统功角响应曲线

Fig. 2 System angle curves after N-2 of line A-B

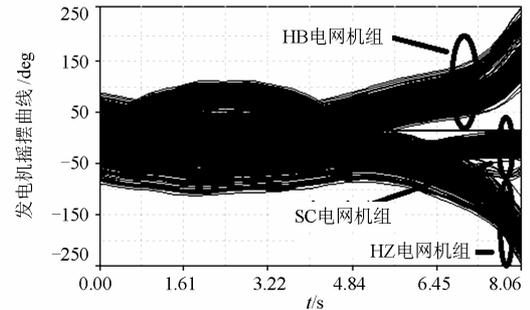


图 3 A-B 线路 N-2 切 SC 电网 165 万 kW 机组后系统功角响应曲线

Fig. 3 System angle curves after N-2 of line A-B tripping 1 650 MW generation in grid SC

从上述两个仿真结果可以看出, A-B 线路 N-2 后不采取措施,系统主导模式为 SC-HZ;采取措施切 SC 网内机组 165 万 kW,系统主导模式转变为 HB-(SC-HZ)模式。其因为切除 SC 电网机组后,虽然 SC-HZ 失稳模式受到抑制(从图 3 中 SC 电网机组和 HZ 电网机组的功角响应曲线可以看出)但切除机组后 SC-HZ 电网存在功率缺额,从而导致 E-F 线路功率增加(E-F 断面是 HB-(SC-HZ)模式

的关键断面), 超过其稳定限制, 激发了 HB—(SC-HZ)模式。该故障场景下存在两个模式的交互影响, 为抑制该稳定问题, 需综合 A-B 断面和 E-F 断面的功率信息给出协调控制策略, 切除 SC 电网内的机组(或提升 D1 直流)同时回降 D2 直流功率(或切 HZ 电网负荷)^[25]。表 1 给出了异步联网方式下 A-B 线路 N-2 后不同的控制策略比较。

表 1 异步联网方式下 A-B 线路 N-2 不同控制策略的控制代价

Table 1 Different control strategies cost after N-2 of line A-B in asynchronous grid

策略 序号	切机 台数	切机量/ MW	提升 D1 功率/MW	回降 D2 功率/MW	控制 代价/元
1	3	1 650	0	1 900	3 250 000
2	2	1 100	550	2 000	2 902 000
3	1	550	1 100	1 950	2 449 000
4	0	0	1 650	2 000	2 066 000

给出的控制策略通过切机或提升 D1 直流功率抑制 SC-HZ 失稳模式, 通过回降 D2 直流功率抑制 HB—(SC-HZ)失稳模式。由于异步联网下, 调制直流功率造成的功率缺额不会通过交流功率形成反馈, 切 SC 网内机组后回降 D2 直流的功率与提升 D1 功率后回降 D2 直流的功率基本相同, 与上一节的分析结论一致。通过代价计算, 由于调制直流的代价远小于切机的代价, 策略 4, 即通过提升 D1 直流配合回降 D2 直流的措施明显优于其他措施。

2) 电网 SC-HZ-HB-HD 同步互联

电网 SC-HZ-HB-HD 同步互联发生 A-B 线路 N-2 故障后的失稳模式与异步联网下基本相同, 同样存在不同失稳模式的交互影响。

表 2 给出电网 SC-HZ-HB-HD 同步互联条件下, A-B 线路 N-2 后不同的控制策略仿真结果。

表 2 同步联网方式下 A-B 线路 N-2 不同控制策略的控制代价

Table 2 Different control strategies cost after N-2 of line A-B in synchronous grid

策略 序号	切机 台数	切机量/ MW	提升 D1 功率/MW	回降 D2 功率/MW	控制 代价/元
1	3	1 650	0	1 400	2 900 000
2	2	1 100	550	1 800	2 762 000
3	1	550	1 100	2 300	2 694 000
4	0	0	1 650	3 000	2 766 000

比较表 1 和表 2 中策略 1 的仿真计算结果, 同步联网下由于回降 D2 直流造成的不平衡功率通过

交流通道反馈可以减轻 E-F 的潮流, 有助于提高 HB-HD—HZ-SC 模式的稳定性, 因此表 2 中策略 1 回降 D2 直流量比表 1 中策略 1 回降 D2 直流量小。

比较表 2 中策略 1 和策略 4, A-B 线 N-2 后切 SC 电网机组或提升 D1 直流均可解决暂态失稳的问题。提升 D1 直流相当于增加 SC 电网负荷, 与切 SC 电网机组相比, 均可以抑制 SC-HZ 失稳模式, 但均造成了功率缺额, 将导致 E-F 线功率增加, 会恶化 HB-HD—HZ-SC 失稳模式; 与切 SC 电网机组相比不同的是, 提升 D1 直流功率还在 HD 电网中产生功率盈余, 由于直流与交流形成并联通道, HD 电网的盈余功率通过 E-F 线向 HZ 电网转移, 进一步增加 E-F 线的潮流, 从而进一步恶化 HB-HD—HZ-SC 失稳模式的稳定性。为保持系统稳定, 从控制角度造成的后果是回降 D2 直流的控制量更大。因此以控制代价为目标的控制策略在优化过程中需综合协调切机量与提升 D1 直流功率量, 以达到控制代价最小。从表 2 的仿真计算结果可以看出, 控制策略 3 的控制代价最小, 为最优控制策略。

4 结论

直流控制措施与交流控制措施类似, 同一控制措施对不同的失稳模式可能产生不同的效果, 在改善某一 UM 稳定性的同时, 可能会损害其他 UM 的稳定性。直流控制措施没有造成系统功率损失(出力或负荷), 只是改变了直流送受端电网的功率分配, 从而在送受端电网内分别造成不平衡功率。异步联网时 EDCPC 分别在直流送受端产生不平衡功率, 但送受端之间不会相互影响, 控制效果与交流措施基本相同, 控制代价小; 同步联网时, 直流功率控制在直流送受端产生的不平衡功率会通过交流通道重新分配, 加重(或减轻)某些关键联络断面的潮流, 可能会造成系统失稳模式的恶化, 与交流控制策略相比需付出额外的代价。因此从控制代价的角度, 交直流控制措施存在协调优化的空间, 实际系统的仿真结果也验证了协调优化的必要性。

参考文献

- [1] 常乃强, 兰州, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.
- CHANG Nai-qiang, LAN Zhou, GAN De-qiang, et al. A survey on application of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System

- Technology, 2005, 29(10): 46-52.
- [2] 王彤, 马静, 杨奇逊. 交直流互联系统区间震荡广域阻尼控制系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 30-37.
WANG Tong, MA Jing, YANG Qi-xun. Design of wide-area damping control system for inter-area oscillation in AC/DC hybrid power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 30-37.
- [3] 薛禹胜, 徐伟, 万秋兰, 等. 关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 1-4.
XUE Yu-sheng, XU Wei, WAN Qiu-lan, et al. A review of wide area measurement system and wide area control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 1-4.
- [4] 姜宪国, 王增平, 李琛, 等. 区域自治式后备保护分区方案[J]. 电工技术学报, 2013, 23(1): 234-241.
JIANG Xian-guo, WANG Zeng-ping, LI Chen, et al. Zoning scheme of regional autonomy backup protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 23(1): 234-241.
- [5] 谢欢, 张保会, 沈宇, 等. 基于 WAMS 的电力系统暂态紧急控制启动方案[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 59-64.
XIE Huan, ZHANG Bao-hui, SHEN Yu, et al. Designing a start-up scheme for power system transient emergency control based on WAMS[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 59-64.
- [6] 程丽敏, 李兴源. 多区域交直流互联系统的频率稳定控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 56-62.
CHENG Li-min, LI Xing-yuan. Load frequency control in multi-area AC/DC interconnected power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 56-62.
- [7] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [8] 郭小江, 马世英, 卜广全, 等. 直流系统参与电网稳定控制应用现状及在安全防御体系中的功能定位探讨[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 116-123.
GUO Xiao-jiang, MA Shi-ying, BU Guang-quan, et al. Present application situation of DC system participating in power system stability control and discussion on position of its functions in security defense system[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 116-123.
- [9] 王建明, 孙华东, 张健, 等. 锦屏-苏南特高压直流投运后电网稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 66-70.
WANG Jian-ming, SUN Hua-dong, ZHANG Jian, et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHDC transmission line from Jinping to Sunan[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 66-70.
- [10] 张步涵, 陈龙, 李皇. 利用直流功率调制增强特高压交流互联系统稳定性[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 116-121.
ZHANG Bu-han, CHEN Long, LI Huang. Improving the stability of UHV AC interconnected system by the DC power modulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 116-121.
- [11] 王鹏飞, 张英敏, 李兴源, 等. 基于无功短路比的交直流交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 74-85.
WANG Peng-fei, ZHANG Ying-min, LI Xing-yuan, et al. Interaction analysis of AC/DC systems based on multi-infeed effective short circuit ratio[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 74-85.
- [12] 杨卫东, 薛禹胜, 荆勇. 南方电网中直流输电系统对交流系统的紧急功率支援[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 68-72.
YANG Wei-dong, XUE Yu-sheng, JING Yong. Emergency DC power support to AC power system in the South China Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 68-72.
- [13] 屠竞哲, 甘德强, 杨莉, 等. 基于稳定约束最有潮流方法的“三华”特高压互联电网交直流交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 54-60.
TU Jing-zhe, GAN De-qiang, YANG Li, et al. Research on improving transient stability of AC/DC hybrid system by HVDC modulation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 54-60.
- [14] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.

- LI Xing-yuan, ZHAO Rui, LIU Tian-qi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.
- [15] LI X Y, XIAN Y X. A nonlinear coordinated control strategy of AC/DC interconnected power system[C] // PowerCon, 2006: 1-6.
- [16] HUANG Zhen, WU Guang-ning, JIANG Wei, et al. Study of AC/DC power coordinated control for multi-circuit UHVDC transmission of Sichuan[C] // APPEEC, 2010: 1-4.
- [17] 周子超. 交直流协调控制提高电网输电能力的策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [18] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [19] XUE Y, YU Y, LI J, et al. A new tool for dynamic security assessment of power system[J]. Control Engineering Practice, 1998, 12(6): 1511-1516.
- [20] 鲍颜红, 徐泰山, 孟昭军, 等. 暂态稳定控制切机负效应问题的两个实例[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 12-15.
- BAO Yan-hong, XU Tai-shan, MENG Zhao-jun, et al. Two field cases for the negative effect problems caused by generator tripping in the transient stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 12-15.
- [21] 潘学萍, 薛禹胜, 王红印, 等. 远离故障点的机组失稳现象及其控制负效应[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 18-21.
- PAN Xue-ping, XUE Yu-sheng, WANG Hong-yin, et al. Critical generators far from fault location and the negative control effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 18-21.
- [22] 陈永红, 薛禹胜. 区域紧急控制的优化算法[J]. 中国电力, 2000, 33(1): 44-48.
- CHEN Yong-hong, XUE Yu-sheng. Optimal algorithm for regional emergency control[J]. Electric Power, 2000, 33(1): 44-48.
- [23] 李威, 薛禹胜, HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化: (二) 不同失稳模式的故障集[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 7-10.
- LI Wei, XUE Yu-sheng, HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability-part two: for cases with different unstable modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 7-10.
- [24] 王克球, 张保会, 王立永. 安全稳定控制系统的经济效益评价[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 31-37.
- WANG Ke-qiu, ZHANG Bao-hui, WANG Li-yong. Assessment on economic benefit of security and stability control system[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 31-37.
- [25] 任先成, 常海军, 李威. 电网互联后安控适应性及策略重构研究-2012 年中国电机工程学会年会论文集[C] // 北京, 2012.

收稿日期: 2013-12-31

作者简介:

李兆伟 (1985-), 男, 助理工程师, 从事电力系统安全稳定分析与控制方面的工作。E-mail: lizhaoweil@sgepri.sgcc.com.cn