

DOI: 10.7667/PSPC160620

渝鄂异步互联对华中电网运行特性的影响

潘晓杰¹, 张顺², 文汀², 奚江惠¹, 党杰¹, 唐卫华³

(1. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 针对规划的渝鄂异交流同步互联通道改造为背靠背柔性直流异步互联通道后对华中电网的运行特性的影响进行计算分析。比较了异步联网前后三峡近区短路电流变化情况, 分析了四川电网内部发生大扰动后对华中电网安全稳定性的影响, 以及华中系统小干扰稳定特性的变化情况。计算结果表明, 渝鄂背靠背投运后, 三峡近区短路电流减小, 华中电网振荡模式有所变化, 三峡近区的暂稳特性严重恶化, 同时龙泉、恩施电网存在孤网运行的风险。针对上述问题提出新建龙斗四回、宜渔双回、恩渔四回的网架补强方案, 验证了该方案的有效性。研究结果对华中电网规划、运行及国内同类直流工程设计都具有一定参考价值。

关键词: 异步互联; 背靠背柔性直流; 华中电网; 短路电流; 小干扰稳定

Operation characteristic analysis of Central China Power Grid in unsynchronized interconnection of Chongqing and Hubei Power Grid

PAN Xiaojie¹, ZHANG Shun², WEN Ting², XI Jianghui¹, DANG Jie¹, TANG Weihua³

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. China Energy Engineering Group Hunan Electric Power Design Institute Corporation Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: The synchronous interconnection between Chongqing and Hubei power grid in China is planned to be unsynchronized by back to back VSC-HVDC. The operation characteristic of central China power grid should be realized with such un-synchronization. Short circuit computation and small signal analysis with Central China Power Grid as well as simulation of large disturbance within Sichuan power grid are undertaken to find the difference before and after unsynchronized interconnection is done. Results show that with the unsynchronized interconnection short circuit current decreased in adjacent three gorge area and low frequency oscillation modes have small variation while transient stability suffers serious deterioration. On the other hand unexpected islanding might happen near longquan substation or Enshi power grid. It is proposed to add one more line to the existing Longdou lines, Yiyu line and Enyu lines which are proved to be effective against such stability deterioration and risk of islanding. This study could be referred to the Central China Power Grid planning, power grid operation and other similar HVDC transmission projects.

Key words: unsynchronous interconnection; back-to-back HVDC; Central China Power Grid; short-circuit current; small disturbance stability

0 引言

四川水电云集, 距华中主网电气距离远, 川渝电网与华中主网同步联网时, 形成规模庞大的交流同步电网, 发生在四川电网内部的大扰动, 不仅会对华中电网的稳定性产生冲击, 而且将通过区域联络线对其他区域电网的稳定性产生冲击, 严重时甚至可能导致联络线功率振荡解列。为解决川渝电网

内部扰动对华中主网冲击, 节约输电通道资源, 提高输电技术水平, 实现电网的可持续发展, 国家电网公司规划建设渝鄂背靠背直流输电工程^[1-6]。直流输电作为成熟、可靠的大容量、低损耗、远距离输电技术, 在我国跨省、区联网工程中发挥了重要作用^[7-11]。

渝鄂背靠背直流工程分为南北两个通道, 南通道为恩施直流, 北通道为龙泉直流。渝鄂背靠背直流工程投产后, 将使得川渝电网和华中主网异步联

网, 研究该工程对华中电网运行特性的影响, 保证大容量、远距离、交直流并联华中电网的安全稳定运行具有重要现实意义。本文重点研究了渝鄂背靠背直流输电工程投产对华中电网运行特性的影响, 比较了背靠背直流工程投产前后小干扰稳定特性, 三峡近区短路电流变化。考虑到渝鄂背靠背柔性直流规划输送功率为 5000 MW, 届时三峡近区汇聚电力将大幅增加, 本文重点分析了渝鄂背靠背投产初期三峡近区的适应性, 并针对三峡近区汇聚电力增加所带来的问题提出了相应的建议和措施。研究结

果对华中电网规划、运行及国内同类直流工程的设计都具有一定的参考价值。

1 华中电网结构

现有川渝电网和华中主网通过张家坝-恩施 2 回 500 kV 和九盘-龙泉 2 回 500 kV 南北两个交流通道同步互联, 异步联网的一种方案是将这南北两个交流通道改建为 2 回背靠背柔性直流互联通道。异步联网后华中及川渝电网省间断面网架示意图如图 1 所示。

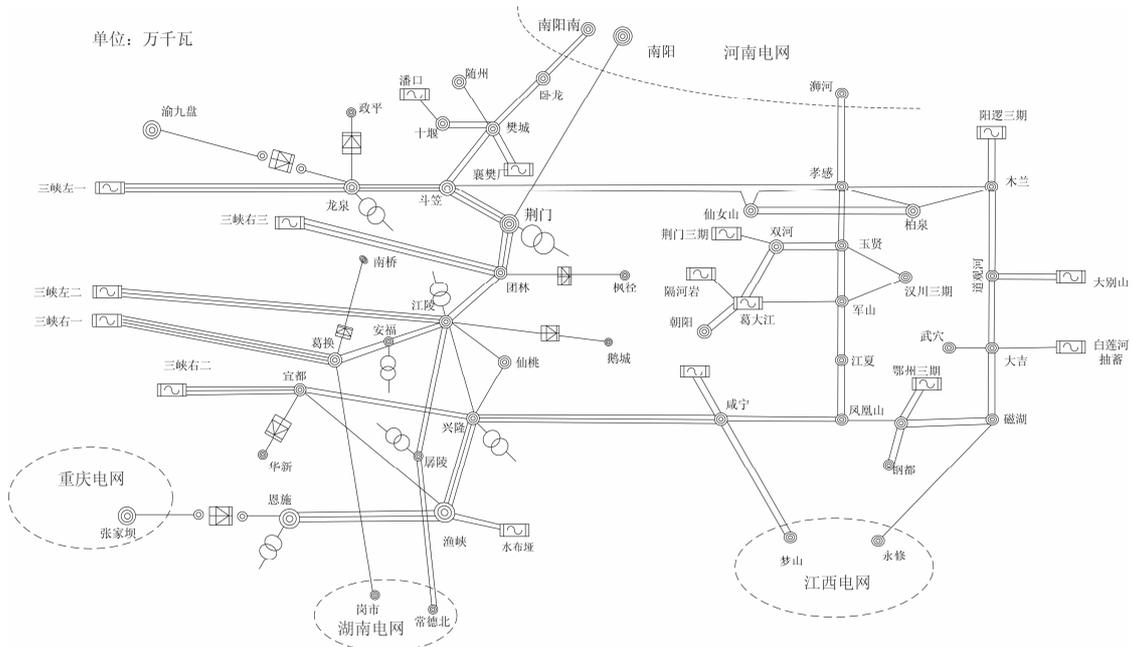


图 1 华中川渝异步互联电网省间断面网架示意图
Fig. 1 Sketch of Central China power grid

除此之外, 四川电网通过 4 回直流与西北电网、华东电网联网, 分别为: 德阳-宝鸡±500 kV 直流, 向家坝-上海±800 kV 直流, 溪洛渡左-浙西±800 kV 直流, 锦屏-苏南±800 kV 直流; 湖北电网通过 5 回直流与华东电网、南方电网联网, 分别为: 龙泉-政平±500 kV 直流, 团林-枫泾±500 kV 直流, 江陵-惠州±500 kV 直流, 葛换-南桥±500 kV 直流。

2 安全稳定研究的条件及原则

2.1 发电机模型

以 2018 年为水平年, 主要采用 Windows7 平台下中国电力科学研究院开发的电力系统综合分析程序(power system analysis software package, PSASP)。华中电网 100 MW 及以上机组采用 E'_q 变化的 5 阶模型, 并考虑调速器作用, 100 MW 以下机组采用 E'_q 恒定的 2 阶模型^[10-11]。

2.2 负荷模型

稳定计算采用感应电动机和恒阻抗的综合负荷模型, 比例见表 1 所示。

表 1 感应电动机和恒阻抗负荷的比例

负荷类型	河南	湖北	四川	重庆	湖南	江西
感应电动机	50%	65%	40%	40%	65%	50%
恒阻抗	50%	35%	60%	60%	35%	50%

2.3 运行方式

考虑 2018 年丰水期大方式和枯水期大方式。丰水期大方式下, 背靠背直流输电功率为渝送鄂 5 000 MW, 其中换流站龙泉、恩施的输送功率均为 2 500 MW。

2.4 稳定判据及准则

本文考虑系统的功角、电压、频率均稳定则系统稳定。

(1) 功角稳定判据: 故障清除后同步系统中任意 2 台机组相对功角摇摆不失步且呈减幅振荡。

(2) 电压稳定判据: 故障清除后系统中枢点母线电压能够恢复到可运行范围内, 母线电压持续低于 0.75 p.u. 时间不超过 1 s。

(3) 频率稳定判据: 系统切机、切负荷措施后系统频率不发生崩溃, 并能恢复到正常范围(50±0.5) Hz^[12-16]。

3 安全稳定计算分析

3.1 潮流计算结果分析

丰大方式下, 特高压北送 5 500 MW, 渝鄂背靠背投产前, 渝送鄂断面功率为 2 800 MW, 南北通道分电比为 2.35:1; 渝鄂背靠背投产后, 背靠背直流南北通道共向湖北输送 5 000 MW 电力, 三峡、水布垭、江坪河机组均满发, 显然渝鄂柔直投产后, 三峡汇聚电力将大幅增加, 尤其是南通道输送功率增加 1 670 MW, 三峡近区水电疏散压力进一步加重, 省内断面联络线功率重载。

表 2 列出了丰大方式下华中电网省间断面潮流分布情况。

表 2 典型潮流方式下重要断面输电功率

Table 2 Transmission power of important section under the typical load flow

潮流方式	特高压北送/MW	渝送鄂/MW	鄂送豫/MW	鄂送湘/MW	鄂送赣/MW	川送渝/MW
丰大	5500	5000	5600	2800	3000	4300

3.2 短路电流计算分析

渝鄂异步联网后, 三峡近区的短路电流会有所下降, 本节针对三峡近区重要站点进行短路计算, 比较背靠背投产前后这些站点的短路电流变化情况。

表 3 列出了渝鄂背靠背工程投产前后三峡近区重要站点短路电流变化情况, 从表 3 可以看出, 开关遮断电流值为 63 kA, 渝鄂同步联网时, 荆门、斗笠、江陵等 500 kV 站点的短路电流均超过开关遮断电流; 渝鄂异步联网后, 川渝电网向华中主网提供的短路电流消失, 三峡近区各站点的短路电流均

表 3 三峡近区短路电流水平

Table 3 Level of short circuit in Three Gorges area

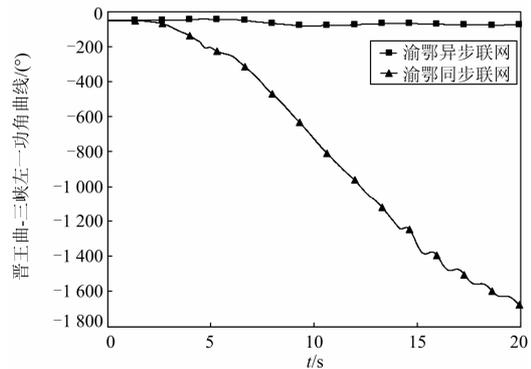
站点	同步联网/kA	异步联网/kA
龙泉	50.25	38.29
荆门	65.94	58.74
斗笠	66.66	58.74
江陵	66.41	60.75

有所下降, 且低于开关遮断电流。可见异步联网可以有效解决华中电网三峡近区短路电流超过断路器遮断能力的问题。

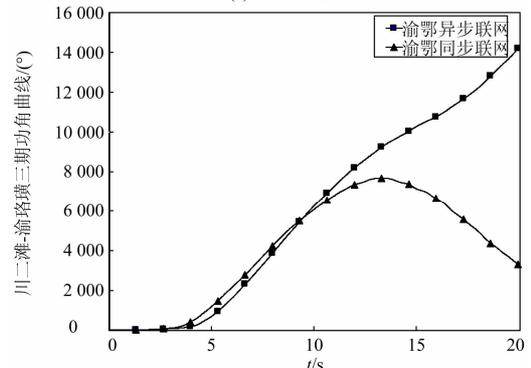
3.3 四川内部故障稳定分析

渝鄂同步联网时, 四川内部大扰动不仅会对华中电网的稳定性产生冲击, 而且将通过区域联络线对其他区域电网的稳定性产生冲击, 严重时甚至可能导致联络线功率振荡解列。渝鄂异步联网后, 川渝电网与华中电网分离, 四川内部大扰动对华中电网的冲击基本消除。以丰大方式下, 尖山主变 N-1 故障为例, 故障发生后, 区域间发电机组和特高压联络线功率曲线如图 2 所示。图 2(a)中功角曲线为华中电网鄂三峡左 01 机组对华北电网晋王曲 01 机组的相对功角曲线, 图 2(b)中功角曲线为四川电网二滩机组对重庆电网洛璜三期机组的相对功角曲线。

图 2 结果可以看到, 渝鄂同步联网方式下, 尖山近区故障引起华中华北机组失步, 特高压联络线功率振荡, 最终会导致华中华北系统解列; 异步联网后, 尖山近区发生故障, 华中华北机组和特高压联络线功率几乎不受影响, 但这些故障依旧存在引起川渝失步的可能, 可见异步联网后川渝电网内部故障对华中电网安全稳定的影响很小。



(a) 华中华北功角曲线



(b) 川渝功角曲线

图 2 尖山主变 N-1 故障暂稳曲线

Fig. 2 Transient stability curve under N-1 fault of Jianshan main transformer

3.4 小干扰稳定特性分析

在丰大方式下，分别计算得到 4 个区域振荡模式，振荡模式的频率和阻尼比如表 4 所示。

表 4 丰大方式下系统的低频振荡模式

Table 4 Power system inertial modes before or after the project put into production

振荡模式	背靠背直流工程投产前			背靠背直流工程投产后		
	频率/Hz	阻尼比/%	说明	频率/Hz	阻尼比/%	说明
华中-华北	0.1147	15.9269	强阻尼	0.1192	15.8033	强阻尼
华中-川渝	0.2499	5.3238	强阻尼	/	/	/
川西-川南	0.7013	4.6780	中等阻尼	0.7072	5.2648	强阻尼
河南-湖南	0.4100	6.7441	强阻尼	0.4107	8.0542	强阻尼
恩施-其他	0.6087	6.6573	强阻尼	0.5501	3.6935	中等阻尼

计算结果表明，在川渝-华中断面采用新的直流联网方式下，川渝电网与华中电网区域间振荡模式消失，川渝电网相关区域低频振荡模式主要体现为四川电网西部机组群相对于四川电网南部机组群的区域间振荡模式。华中-华北振荡模式频率增大，丰大方式下阻尼比增加。

由于机电振荡模式的振荡频率近似地由同步力矩系数 K_s 和惯性常数 H 的平方根所决定，式(1)给出了振荡频率的近似计算公式

$$f \approx \sqrt{\frac{K_s}{H}} \quad (1)$$

将华中-华北互联系统等效为两机系统，渝鄂异步联网后，川渝电网与华中电网隔离，华中电网的惯性常数减小，川渝-华中的振荡模式将消失，华中-华北振荡模式的振荡频率将增大。

4 三峡近区适应性研究

4.1 北通道稳定特性

丰大方式下，若北通道龙斗三回维持现有输电能力 4 000 MW，则渝鄂背靠背直流北通道输送功率为 1 300 MW，此时北通道龙斗线均能通过 N-1、N-2 暂稳校验，说明背靠背投运后，北通道能维持现有的输电能力。

若北通道直流满送 2 500 MW，则龙斗三回潮流达 5 160 MW，此时龙斗线斗侧三永 N-1 故障，三峡左一对华中主网失步，湖北内部发电机功角图如图 3 所示。

4.2 南通道稳定特性

丰大方式下，三峡、水布垭、江坪河机组满发，恩施上网 1 000 MW，若控制恩渔三回不超过其 2 200 MW 控制限额，渝鄂背靠背柔直输送功率为 1 200 MW。对南通道近区交流线路进行 N-1 暂稳校验，

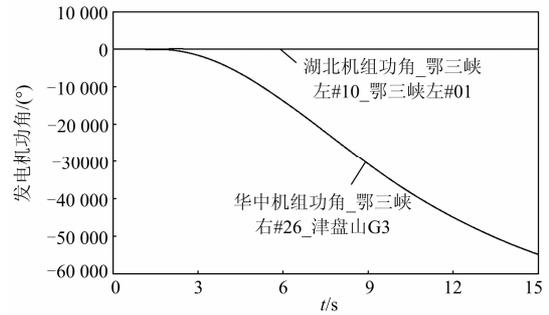
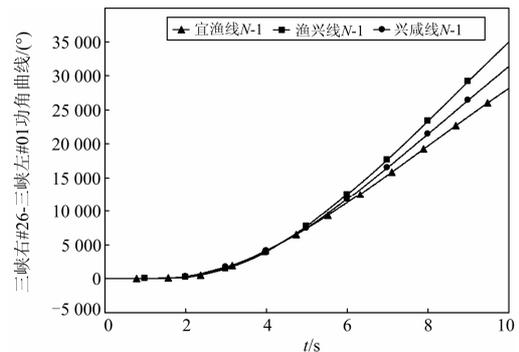


图 3 龙斗 N-1 功角曲线

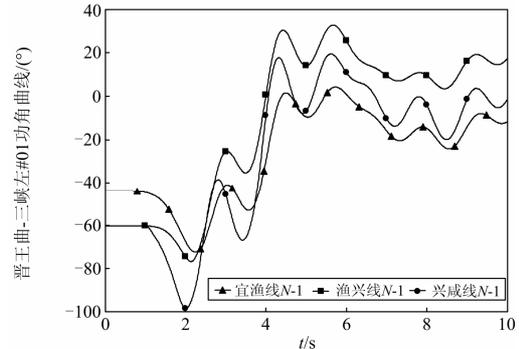
Fig. 3 Transient stability curve under N-1 fault of Long-quan to Dou-li line

此时宜渔线 N-1 故障会引起三峡右二、水布垭、江坪河对华中主网失步，说明背靠背柔直投运后，若不采取其他措施，南通道无法维持现有的输电能力。

若南通道柔直满送 2 500 MW，则恩渔三回潮流达 3 500 MW，在水布垭、江坪河满发的情况下，渔兴三回潮流达 4 800 MW，南通道暂稳特性进一步恶化；宜渔线、渔兴线、兴咸线 N-1 故障均会引起三峡右二、水布垭、江坪河机组失稳，湖北内部发电机功角如图 4 所示，图 4(a)中功角曲线为三峡右#26 对三峡左#01 机组的相对功角曲线，图 4(b)中功角曲线为华中电网鄂三峡左 01 机组对华北电网晋王曲 01 机组的相对功角曲线。



(a) 湖北内部发电机功角



(b) 华中华北发电机功角

图 4 南通道近区暂稳曲线

Fig. 4 Transient stability curve of the near southern route

4.3 孤岛风险

通过研究背靠背南北近区网架结构并结合实际运行经验, 在龙斗一回检修方式下, 当发生龙斗剩余两回线路双回同跳时, 渝鄂直流、龙政直流、三峡左一及龙泉馈供区形成孤岛; 同样在恩渔一回检修方式下, 当发生剩余两回线路双回同跳时, 渝鄂直流将与恩施电网形成孤网。

检修方式下, 龙斗双回同跳后龙泉孤网频率大幅上升, 频率升至 60 Hz; 恩渔双回同跳后恩施电网频率大幅上升。仿真结果如图 5、图 6 所示, 结果表明, 检修方式下, 背靠背南北通道近区存在孤网运行风险, 且孤网形成后在不采取相关管控措施的情况下, 孤网无法维持稳定运行。

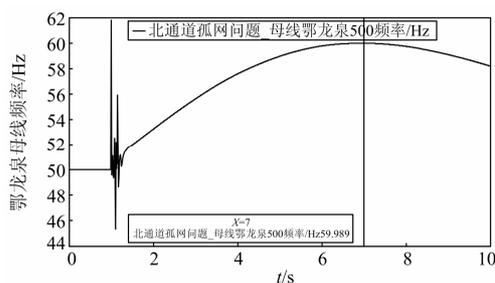


图 5 龙泉孤网运行频率曲线

Fig. 5 Frequency curve of Long-quan islanding operation

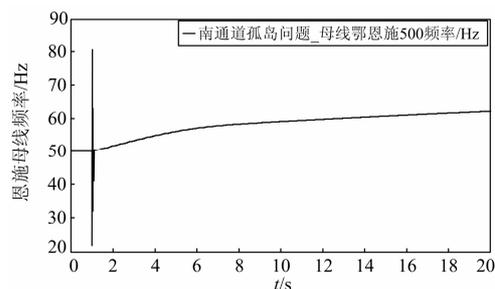


图 6 恩施孤网运行频率曲线

Fig. 6 Frequency curve of En-shi islanding operation

4.4 建议及措施

若渝鄂背靠背柔直满送 5 000 MW, 龙斗线、宜渔线、渔兴线、兴隆线均无法通过 $N-1$ 暂稳校验, 且南北通道存在孤岛运行风险, 需要采取相关网架补强措施, 提出新建龙斗四回、恩渔四回以及宜渔双回网架补强方案。

网架补强后, 渝鄂背靠背南北送出通道均为 4 回交流线路, 解除了南北通道孤岛运行的风险; 同时对龙斗线、渔兴线、兴咸线、宜渔线分别进行 $N-1$ 暂稳校验, 仿真结果如图 7 所示, 结果表明网架补强后, 南北通道均能通过 $N-1$ 暂稳校验。

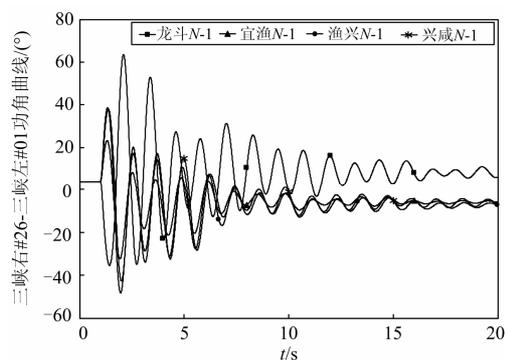


图 7 网架补强后三峡近区暂稳曲线

Fig. 7 Transient stability curve of the near Three Gorges after grid reinforcement

5 结论

本文对渝鄂背靠背直流投产后华中电网的安全稳定特性进行了计算和分析, 得出以下结论:

(1) 渝鄂背靠背规划输送功率 5 000 MW, 投产后, 输送功率大幅增加, 三峡近区潮流疏散压力进一步加重。

(2) 渝鄂异步联网后, 川渝电网向华中主网提供的短路电流消失, 三峡近区各站点的短路电流均有所下降, 且低于开关遮断电流, 无须采取短路电流的限制措施。

(3) 渝鄂异步联网后, 尖山近区故障对华中电网安全稳定的影响很小, 缓解了同步联网时尖山近区故障对华中电网安全稳定的冲击。

(4) 渝鄂异步联网后, 华中对华北振荡模式频率增大, 丰大方式下衰减阻尼比有所增大; 川渝-华中振荡模式消失; 南通道恩施近区对华中主网振荡模式阻尼比减小, 由强阻尼模式变为中等阻尼模式。

(5) 背靠背柔直南北通道均满送时, 三峡近区潮流疏散压力大, 龙斗线、宜渔线、渔兴线及兴隆线均不满足 $N-1$ 暂稳校验, 且检修方式运行时, 龙泉、恩施电网存在孤网运行的风险。提出新建龙斗四回、恩渔四回、宜渔双回网架补强方案可有效解决上述问题。

参考文献

- [1] 刘振亚. 落实科学发展观加快建设坚强的国家电网[N]. 中国电力报, 2005-02-24(1).
- [2] 舒印彪. 我国特高压输电的发展与实施[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 1-8.
SHU Yinbiao. Development and execution of UHV power transmission in China[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 1-8.

- [3] 张文亮, 周孝信, 郭建波, 等. ± 1000 kV 特高压直流在我国电网应用的可行性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 1-5.
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, et al. Feasibility of ± 1000 kV ultra HVDC in the power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 1-5.
- [4] 赵晋泉, 邓晖, 吴小辰, 等. 基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 1-9.
ZHAO Jinquan, DENG Hui, WU Xiaochen, et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 1-9.
- [5] 叶圣永, 王云玲, 唐权, 等. ± 100 kV“疆电入川”特高压直流输电对四川电网安全稳定影响[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2726-2731.
YE Shengyong, WANG Yunling, TANG Quan, et al. Impacts of ± 100 kV UHVDC power transmission project from Xinjiang to Sichuan on security and stability of Sichuan Power Grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2726-2731.
- [6] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [7] 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.
- [8] 董晨, 张海波, 李亚男, 等. 高岭背靠背直流工程安全稳定控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1240-1245.
DONG Chen, ZHANG Haibo, LI Yanan, et al. Security and stability control strategy of Gaoling back-to-back HVDC project[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1240-1245.
- [9] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江 ± 800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ± 800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [10] 吴宝英, 陈允鹏, 陈旭, 等. ± 800 kV 云广直流输电工程对南方电网安全稳定的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 5-12.
WU Baoying, CHEN Yunpeng, CHEN Xu, et al. Study on impacts of ± 800 kV Yunnan-Guangdong HVDC transmission project on security and stability of China Southern Power Grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 5-12.
- [11] 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, 35.
LI Feng, GUAN Lin, ZHONG Jiefeng, et al. Study on stability of Guangdong AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 1-4, 35.
- [12] DL 755—2001 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [13] DL/T 723-2000 电力系统安全稳定控制技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [14] 仲悟之, 宋新立, 汤涌, 等. 特高压交直流电网的小干扰稳定性分析[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 1-4.
ZHONG Wuzhi, SONG Xinli, TANG Yong. Small signal stability analysis for UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 1-4.
- [15] 樊爱军, 雷宪章, 刘红超, 等. 研究大规模互联电网区域间振荡的特征值分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 35-39.
FAN Aijun, LEI Xianzhang, LIU Gongchao, et al. Eigenvalue analysis methods for inter-area oscillations in large-scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 35-39.
- [16] 张培高, 李兴源, 李政. 孤网频率稳定与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 143-149.
ZHANG Peigao, LI Xingyuan, LI Zheng. Research on frequency stability and control strategy in isolated power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 143-149.

收稿日期: 2016-04-29; 修回日期: 2016-08-03

作者简介:

潘晓杰(1976-), 男, 博士(后), 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: pxj76@163.com

张 顺(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, 本文通讯作者; E-mail: 750834671@qq.com

文 汀(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: 359702060@qq.com

(编辑 张爱琴)