

基于区间联络线能量预测的暂态稳定紧急切机控制

(二)工程案例

赵晋泉¹, 邓 晖¹, 徐光虎², 张 勇², 吴小辰²

(1. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098;

2. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510623)

摘要: 随着 PMU/WAMS 技术的广泛应用, 基于广域响应的暂态稳定紧急控制技术已成为可能。在基于区间联络线能量预测紧急切机方法的基础上, 结合基于电压轨迹的暂态失稳判别方法, 提出一种适用于互联电网区间暂态失稳的暂态稳定控制技术。该技术采用主站-子站控制方式进行区间暂态失稳判别与紧急切机控制。针对复杂故障下南方电网两广断面暂态失稳, 建立详细的工程化控制方案。探讨所提紧急控制技术与现有安全稳定防线的协调配合问题。仿真结果表明, 采用所提方法能够制定合理、有效的紧急切机策略, 维持电网的安全稳定运行。

关键词: 区间暂态稳定; 广域量测系统; 紧急切机控制; 中国南方电网; 电力系统防线

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.016

0 引言

高效、可靠的电力系统紧急控制是电网安全稳定运行的重要保障^[1]。近年来世界范围内发生多起大停电事故^[2-3], 折射出传统电力系统稳定控制技术尚存在缺陷与不足^[4]。随着广域测量技术的发展, 全网的异地响应数据可实现同步精确采集。基于电网的广域受扰量测, 电力工作者可挖掘系统暂态失稳特征, 继而开展基于响应驱动的暂态稳定紧急控制^[5-11]。该紧急控制技术可作为对现有事件驱动型安全稳定防线的有益补充, 进一步保障电网的安全稳定运行。

本文在基于区间联络线能量的紧急切机方法^[12]基础上, 进一步研究了该方法应用于互联电网的工程化方案。通过南方电网两广断面区间暂态失稳仿真测试, 验证了本文所述方法的有效性。此外, 本文还探讨了该紧急控制方法与现有安全稳定防线的协调配合问题。

1 基于广域响应的区间暂态稳定控制技术

1.1 互联电网区间暂态失稳实时判别

暂态失稳判别直接决定了紧急控制的实施时刻, 并影响着紧急控制量大小。若做出错误的系统失稳判别, 可能触发不必要的紧急控制措施, 造成严

重的经济损失。因此, 快速、准确的暂态失稳判别是紧急控制的先决条件。文献[13]针对互联电网区间暂态失稳特征, 提出了一种基于受扰电压轨迹的暂态失稳实时判别方法。该方法通过系统振荡中心电压映射区域机群间的相对运动, 根据扰动后电压轨迹进行复合积分运算, 实时量化评估系统暂态失稳程度。所述方法基于区间联络线母线电压量测, 方法简单, 计算效率高, 具备工程可实施性^[14]。

本文将基于受扰电压轨迹的暂态失稳实时判别方法^[7]与基于区间联络线能量的暂态稳定紧急切机控制方法^[6]相结合, 提出一种基于广域响应的互联电网区间暂态稳定控制技术。根据扰动后联络线量测进行区间暂态稳定性实时判别, 再根据扩展等面积法则建立振荡中心所在联络线的功率-相角差相平面, 映射系统暂态能量变化, 并以此计算联络线的紧急调节功率。同时根据特征发电机量测刷新切机序位表, 并通过联络线预测能量制定紧急切机策略。流程如图 1 所示。

1.2 互联电网区间暂态稳定控制方案

依据现有安稳控制系统的技术手段及硬件条件, 基于广域响应的互联电网区间暂态稳定控制技术可采用主站-子站控制方式, 结构如图 2 所示。

由设置于互联电网区间联络线两侧变电站的观测子站采集量测信息。根据受扰电压轨迹实时判别系统的区间暂态失稳, 并建立不平衡功率-相角差相平面, 预测所在联络线的暂态能量并计算紧急调节功率, 上送给主站。主站计算和确定紧急控制策略, 并将切机策略指令下发给执行子站, 由设置于送端电网电厂的执行子站执行切机控制。此外, 执行子站根据主站需求上传 PMU 所采集的发电机转速信息。

收稿日期: 2015-07-06; 修回日期: 2016-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077042); 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室开放课题资助项目(LAPS14005)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077042) and Open Foundation of State Key Lab of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources of North China Electric Power University(LAPS14005)

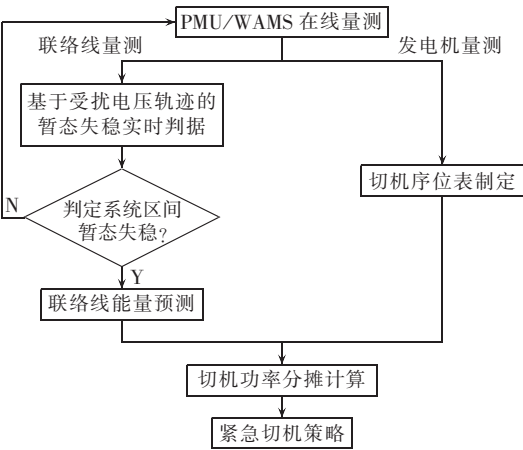


图 1 基于广域响应的区间暂态稳定控制技术流程图
Fig.1 Flowchart of transient stability control based on PMU/WAMS

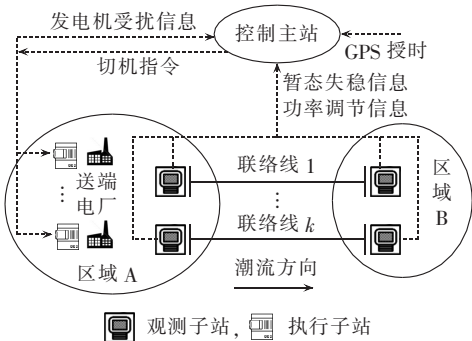


图 2 基于广域响应的暂态稳定控制技术结构图
Fig.2 Structure of transient stability control based on PMU/WAMS

控制主站为信息汇总、分析、处理及指令发送单元,主要完成如下工作:(1)根据广域机组转速信息进行机组受扰程度排序,刷新切机序位表;(2)调用数据库中的功率转移分布因子,计算紧急切机策略;(3)向执行子站下发切机指令。

1.3 功率转移分布因子在线更新

由于电网的运行方式改变或支路开断等原因,系统的暂态参数将发生变化。仅通过离线仿真获得发电机-联络线的功率转移分布因子,计算任意时刻切机控制策略,往往会产生较大偏差。由于功率转移分布因子采用的是基于直流潮流的计算方法,所需信息相对较少,可利用广域量测进行参数的更新计算。

发电机-联络线功率转移因子更新办法如下:

- (1) 在系统运行中,利用 PMU/WAMS 获取发电机出力、线路潮流、支路开断等信息;
- (2) 根据上述广域量测更新电网参数,并进行直流潮流计算;
- (3) 由潮流结果计算发电机-目标联络线的功率转移因子,并更新数据库中相应参数;
- (4) 按照实际需求重复执行上述步骤,从而根

据系统最新工况制定紧急切机策略。
上述更新办法可在一定程度上提高紧急切机策略的准确度,增强暂态稳定控制技术在不同工况下的适用性。

2 南方电网工程案例

2.1 中国南方电网

中国南方电网是世界上最复杂的交直流混合运行电网之一。由于我国东、西部地区能源资源和经济发展不平衡,南方电网具有长距离链式结构、东西跨度长、传输功率大的特点。随着近年溪洛渡和糯扎渡两渡直流投入运行,南方电网已形成“八交八直”共 16 条高压线路并行的西电东送大通道,最大输送电力超过 30000 MW^[15]。南方电网安全稳定问题面临严峻的考验。

南方电网单机容量 300 MW 及以上的电厂、总装机容量 500 MW 及以上的电厂都配备 PMU 装置,电网内所有直流换流站、500 kV 变电站也基本配备 PMU 装置^[16]。因此,南方电网现有的广域系统配置能够满足稳定性判别与紧急控制的基本要求。

2.2 针对两广断面暂态失稳的紧急控制方案

研究表明,若南方电网发生多极直流闭锁或重要交流输电线路三永等极端严重故障时,系统的振荡中心一般位于广东—广西传输断面,发电机群在扰动的冲击下,由两广联络断面“撕裂”开来^[17]。

针对上述区间暂态失稳特征,在两广传输断面两侧重要变电站设置观测子站,如表 1 所示。利用两广联络线的受扰响应可量化估计系统区间暂态能量,实现暂态失稳判别与联络线调节功率计算。

表 1 南方电网观测子站列表
Table 1 Observation stations of CSG

编号	变电站名称	所属地区	电压等级/kV
1	贤令山	广东	500
2	桂林	广西	500
3	梧州	广西	500
4	贺州	广西	500
5	罗洞	广东	500
6	螺岭	广西	500
7	茂名	广东	500

当系统发生两广断面区间暂态失稳,由于地区发电机联系紧密,南方电网各省内机组具有相似受扰特征。在送端云南、贵州、广西的 50 处重要 500 kV 电厂设置执行子站,进行地区特征发电机的转速采样及切机命令执行工作。为实现统一基准下的机组能量评估,各省内发电机的总惯量相近。

在位于广州的南方电网调度中心建立控制主站,利用现有的数据库、调度数据网及相关软硬件设施,实现数据交互、分析处理和控制决策等功能。综

上所述,两广断面区间暂态稳定控制系统示意图如图 3 所示。



图 3 两广断面区间暂态稳定控制系统图

Fig.3 Transient stability control system for Guangdong-Guangxi section of CSG

2.3 仿真分析

以两渡直流投运后,南方电网 2014 年丰大运行方式为仿真对象。利用 BPA 软件进行系统时域仿真,测试本文方法的有效性。设定仿真步长为 0.02 s。假设失稳判别与紧急控制之间的时延为 0.1 s,切机序位表的刷新时间间隔为 0.2 s。

算例 1:0 s 时溪洛渡直流双极闭锁,0.1 s 滤波器动作。

由于直流闭锁造成地区功率盈余,溪洛渡电厂机组将首先加速运行,继而引起云南、贵州、广西地区机组失步,最终造成两广联络断面间机群发生区间暂态失稳,如图 4 所示。

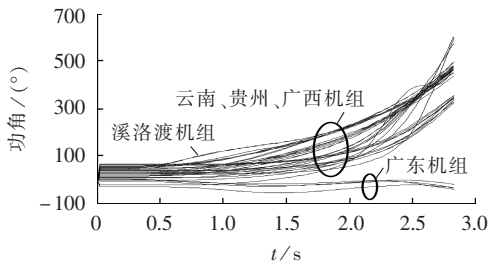


图 4 发电机受扰功角轨迹(算例 1)

Fig.4 Disturbed angle trajectory of generators(Case 1)

当断面观测子站的受扰电压低于 0.85 p.u. 时开始积分运算,实时评估两广断面区间暂态失稳程度。其中贤令山站电压轨迹如图 5 所示(图中电压为标幺值,后同),采用文献[13]方法于扰动后 1.24 s 判别系统暂态失稳。

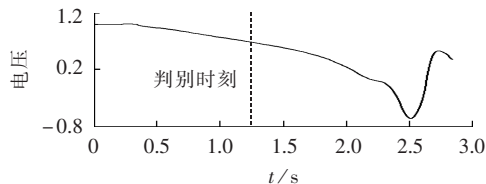


图 5 观测子站受扰电压轨迹(算例 1)

Fig.5 Disturbed voltage trajectory of slave observation station(Case 1)

根据观测子站的量测数据,进行联络线相角差-

功率轨迹拟合外推,计算各联络线紧急调节功率。其中受扰最严重支路为桂林—贤令山联络线,相平面轨迹如图 6 所示(图中不平衡功率为标幺值,后同)。计算得到桂贤线调节功率为 1191 MW。

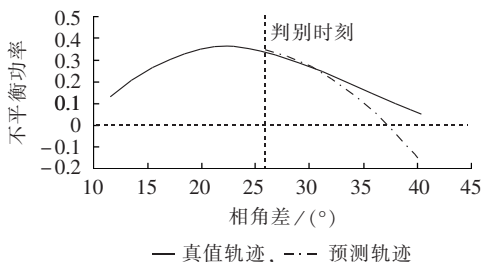


图 6 桂林—贤令山相角差-不平衡功率相平面(算例 1)

Fig.6 Phase plane of phase angle difference and unbalanced power between Guilin and Xianlingshan(Case 1)

主站根据执行子站上传的发电机转速量测,刷新切机序位表。1.2 s 的切机序位表如表 2 所示,由于执行子站数目较大,本文仅列举排序 1—5 位的电厂。其中受扰最严重为溪洛渡电厂机组。

表 2 判定失稳时最新切机序位表(算例 1)

Table 2 Updated generator tripping sequence table(Case 1)

切机序位	电厂名称	所属地区
1	溪洛渡	云南
2	威信	云南
3	镇雄	云南
4	宣威	云南
5	曲靖	云南

根据溪洛渡电厂—桂贤线发电转移分布因子 0.31,计算得到紧急切机量为 3 843 MW。溪洛渡电厂下属 9 台机组,每台实际出力均为 700 MW。因此,制定紧急切机策略为切除其中 6 台机组,合计 4 200 MW。于 1.34 s 执行上述紧急切机策略,控制效果如图 7 所示,系统恢复暂态稳定。

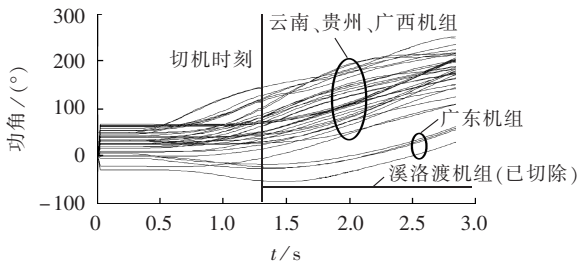


图 7 切除 4200 MW 后发电机受扰功角轨迹(算例 1)

Fig.7 Disturbed angle trajectory of generators after 4200 MW are tripped(Case 1)

算例 2:0 s 时两广联络断面的来宾—梧州线路发生三永故障,0.1 s 跳故障双回线路,同时发生玉林—茂名无故障跳闸。

由于两广联络断面重要输电线路跳闸,其送电功率将转移至其余区间联络线,引起两广断面功率报

荡,造成区间暂态失稳。全网功角受扰轨迹如图 8 所示。

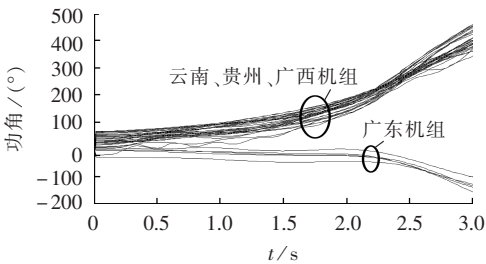


图 8 发电机受扰功角轨迹(算例 2)
Fig.8 Disturbed angle trajectory of generators(Case 2)

根据文献[13]方法,观测子站贤令山站于扰动后 1.08 s 判定系统暂态失稳,如图 9 所示。

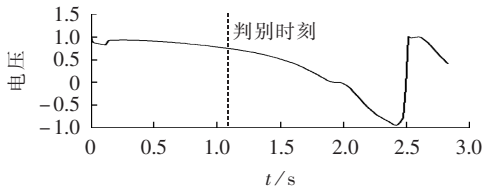


图 9 观测子站受扰电压轨迹(算例 2)
Fig.9 Disturbed voltage trajectory of slave observation station(Case 2)

建立受扰最严重联络线桂林—贤令山相平面轨迹,如图 10 所示。根据预测轨迹计算得到该联络线调节功率为 1224 MW。

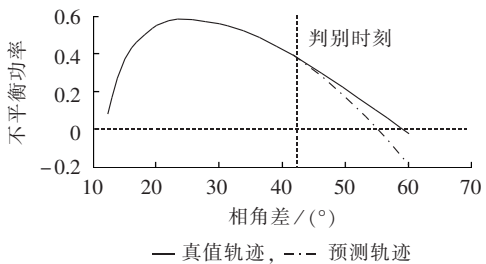


图 10 桂林—贤令山相角差—不平衡功率相平面(算例 2)
Fig.10 Phase plane of phase angle difference and unbalanced power between Guilin and Xianlingshan(Case 2)

主站于 1 s 制定的切机序位表,如表 3 所示。根据切机序位表先后顺序制定紧急切机策略,直至满足两广联络断面的功率调节要求。得到紧急切机策

表 3 判定失稳时最新切机序位表(算例 2)
Table 3 Updated generator tripping sequence table(Case 2)

切机序位	电厂名称	所属地区	转移分布因子
1	贵港	广西	0.29
2	合山	广西	0.31
3	龙滩	广西	0.28
4	岩滩	广西	0.28
5	钦州	广西	0.27

略为切除贵港电厂 1×400 MW 机组、合山电厂 1×230 MW 机组、龙滩电厂 5×700 MW 机组,合计有功功率为 4130 MW。

各执行子站于 1.18 s 同步切除贵港电厂、合山电厂、龙滩电厂相应机组,控制后受扰功角轨迹如图 11 所示。通过上述紧急控制措施,能够使全网发电机恢复同步运行。

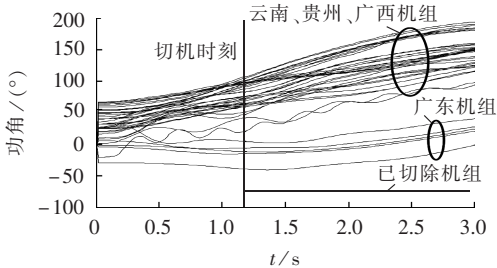


图 11 切除 4130 MW 后发电机受扰功角轨迹(算例 2)
Fig.11 Disturbed angle trajectory of generators after 4130 MW are tripped(Case 2)

3 现有防线的协调配合

基于广域响应的暂态稳定控制技术,现阶段作用定位为常规基于事件驱动稳定控制二道防线的有益补充,而非取代。其主要针对二道防线预想故障集外的严重事故或二道防线稳控装置拒动情形,作为后备保护进一步保障电网的安全稳定运行。若某时刻二道防线稳控主站接收到启动控制信号,执行控制命令的同时进行信息通道闭锁,避免基于响应的稳定控制措施动作。

本文提出的暂态稳定紧急切机控制方案,是在系统受扰初期根据响应特征,执行一轮针对性的切机控制。假如由于所计算切机控制量不足,未能使系统恢复稳定,其恢复系统稳定性的努力也能减少此后第三道防线所付出的代价。

4 结语

本文采用基于区间联络线能量预测的紧急切机方法,并结合基于受扰电压轨迹积分的暂态失稳判别方法,形成了一种基于广域响应的区域间电网暂态稳定控制技术。针对南方电网两广断面暂态失稳,采用主站—子站控制方式,给出了基于广域响应的南方电网区域失稳切机控制方案。通过系统仿真分析表明本文所提出的紧急切机方法是有效的,具备工程可实施性。

需要指出的是,单纯依靠响应无法准确获知系统未来轨迹,将造成切机控制量化评估的不精确,同时也难以快速校核控制策略的有效性。在实际电网中的应用研究仍有待深入开展。

参考文献:

- [1] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
ZHANG Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6.
- [2] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析与启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 1-8.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian Power Grid on July 30 and 31, 2012 [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 1-8.
- [3] 方勇杰. 美国“9.8”大停电对连锁故障防控技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 1-7.
FANG Yongjie. Lessons from September 8, 2011 Southwest America blackout for prevention and control of cascading outages[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 1-7.
- [4] ILIC M, ALLEN E, CHAPMAN J, et al. Preventing future blackouts by means of enhanced electric power systems control: from complexity to order[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(11): 1920-1940.
- [5] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二)广域信息、在线量分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
- [6] 吴为, 汤涌, 孙华东, 等. 基于广域量测信息的电力系统暂态稳定研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 81-87.
WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong, et al. A survey on research of power system transient stability based on wide-area measurement information[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 81-87.
- [7] 汤涌. 基于响应的电力系统广域安全稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5041-5050.
TANG Yong. Response-based wide area control for power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5041-5050.
- [8] 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.
- [9] 张保会. 广域动态信息条件下电网安全紧急控制的研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 1-8.
ZHANG Baohui. Study on network security, stability and emergency control system based on wide area dynamic information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 1-8.
- [10] 张保会, 杨松浩, 王怀远, 等. 电力系统暂态稳定性闭环控制(二)——多机电力系统暂态不稳定判别方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 1-6.
ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan, et al. Closed-loop control of power system transient stability (2): transient instability detection method of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 1-6.
- [11] 张保会, 王怀远, 杨松浩. 电力系统暂态稳定性闭环控制(七)——实现方案与控制效果[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 1-7.
ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao. Closed-loop control of power system transient stability (7): implementation scheme and control effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 1-7.
- [12] 赵晋泉, 邓晖, 徐光虎, 等. 基于区间联络线能量预测的暂态稳定紧急切机控制(一)机理与方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 114-119.
ZHAO Jinquan, DENG Hui, XU Guanghu, et al. Transient stability emergency generator tripping control based on tie-line energy prediction Part one: theory and method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 114-119.
- [13] 邓晖, 赵晋泉, 吴小辰, 等. 基于受扰电压轨迹的电力系统暂态失稳判别: (一)机理与方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 27-32.
DENG Hui, ZHAO Jinquan, WU Xiaochen, et al. Transient instability detection of power system based on perturbed voltage trajectories: part one theory and method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 27-32.
- [14] 徐光虎, 张勇, 邓晖, 等. 基于受扰电压轨迹的南方电网区域暂态失稳预警方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(4): 90-95.
XU Guanghu, ZHANG Yong, DENG Hui, et al. Strategies of regional transient instability warning based on perturbed voltage trajectories in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(4): 90-95.
- [15] 周保荣, 金小明, 吴小辰, 等. 溪洛渡、糯扎渡直流输电规模对南方电网安全稳定影响[J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 7-11.
ZHOU Baorong, JIN Xiaoming, WU Xiaochen, et al. The influence of the capacities of Xiluodu and Nuozhadu HVDC projects on security and stability of China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 7-11.
- [16] 中国南方电网电力调度通信中心. 南网总调 WAMS 系统建设应用情况[Z]. 广州: 中国南方电网电力调度控制中心, 2010.
- [17] 胡飞雄, 李建设, 曾勇刚. 南方交直流混合电网稳定若干问题及其控制措施[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊2): 103-106.
HU Feixiong, LI Jianshe, ZENG Yonggang. The stability problems in the hybrid AC-DC Southern Power Grid and the dispatching operation & control solutions[J]. Power System Technology, 2007, 31(Supplement 2): 103-106.

作者简介:



赵晋泉

赵晋泉(1972—),男,山西阳泉人,教授,博士,通信作者,主要从事电力系统优化运行、电压稳定分析与控制和电力市场等方面的研究工作(E-mail:jqzhao2@tom.com);

邓晖(1986—),男,浙江杭州人,博士研究生,主要从事电力系统暂态稳定分析与控制方面的研究工作;

徐光虎(1974—),男,安徽合肥人,高级工程师,博士,主要从事电力系统暂态稳定分析与控制方面的工程应用工作。

(下转第120页 continued on page 120)

LIU Yaoyuan,ZENG Chengbi,LI Tingmin,et al. Study on low-voltage ride through control strategy of photovoltaic system based on super-capacitor[J]. Power System Protection and Control,2014,42(13):77-82.

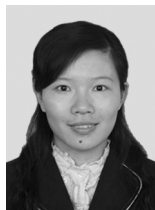
[21] ORTEGA R,SCHAFT A,MASCHKE B,et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems[J]. Automatica,2002,38(4):585-596.

[22] 陈燕东. 微电网多逆变器控制关键技术研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.

CHEN Yandong. Research on the key techniques of multi-

inverter control system in microgrid[D]. Changsha:Hunan University,2014.

作者简介:



杨帆(1981—),女,江苏连云港人,副教授,博士,主要研究方向为分布式发电系统的设计与控制(E-mail:yangfan@shiep.edu.cn)。

Coordinated power control between fuel cell and supercapacitor for isolated DC microgrid

YANG Fan,SHENG Bo,FU Yang

(School of Electric Power Engineering,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China)

Abstract: A control strategy based on the cascaded PBC(Passivity-Based Control) and PI control is proposed for the coordinated power control of isolated DC microgrid. Its PCH(Port-Controlled Hamiltonian) model is established and its passivity-based controller is designed. An outer-loop PI controller is developed to eliminate the steady-state errors of DC bus voltage caused by the parameter disturbance for improving the robustness of closed-loop system. The simulative results show that,the PBC-PI control strategy could reasonably adjust the power balance of DC microgrid,stabilize the voltage of DC bus and improve the robustness of closed-loop system against parameter disturbance.

Key words: isolated DC microgrid; fuel cell; supercapacitor; passivity-based control; PI control; port-controlled Hamiltonian; robustness

(上接第 112 页 continued from page 112)

Transient stability emergency generator tripping control based on tie-line energy prediction

Part two:project case

ZHAO Jinqun¹,DENG Hui¹,XU Guanghu²,ZHANG Yong²,WU Xiaochen²

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering,Ministry of Education,Hohai University,Nanjing 210098,China;2. China Southern Power Grid Co.,Ltd.,Guangzhou 510623,China)

Abstract: With the wide application of PMU/WAMS,the transient stability emergency control technology based on wide-area response has become possible. According to the emergency generator tripping control based on tie-line energy prediction and the transient instability detection based on voltage trajectory,a scheme of inter-area transient stability control is proposed for the interconnected systems,which adopts the master-slave control mode to carry out the inter-area transient instability detection and emergency generator tripping control. As a project,a detailed transient instability control scheme is established for the Guangdong-Guangxi section of China Southern Power Grid under a complex fault. The coordination between the proposed control method and the current safety & stability defence line is discussed. Simulative results show that,a rational and effective emergency generator tripping strategy is set by the proposed method to maintain the safe and stable operation of power grid.

Key words: inter-area transient stability; PMU/WAMS; emergency generator tripping control; China Southern Power Grid; power system defense line