

广州电网复杂故障阻隔策略研究

王珂¹, 崔晓丹², 叶萌¹, 李威², 刘婷¹, 李兆伟², 蔡莹¹, 李碧君²

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 广州电网作为特大型中心城市电网对供电可靠性要求很高。梳理了可能导致广州电网大面积停电的三类风险并提出了应对策略。针对多回直流同时闭锁失步解列装置拒动导致系统失步的风险, 提出了主动解列片区电网的措施; 针对 500 kV 变电站全停故障下孤网频率失稳风险提出了联切负荷策略。针对线路三相短路主保护拒动局部电网失稳的风险提出了解列机组的措施。基于实际电网的算例验证了所提策略的有效性。

关键词: 严重故障; 安全稳定; 控制策略; 广州电网

Block strategies of the sever faults of Guangzhou power grid

WANG Ke¹, CUI Xiaodan², YE Meng¹, LI Wei², LIU Ting¹, LI Zhaowei², CAI Ying¹, LI Bijun²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China; 2. NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: As a large central city power grid, Guangzhou power grid requires high reliability of power supply. Three kinds of security and stability risks of Guangzhou power grid which may cause large-area blackout, as well as their corresponding strategies, are presented. A controlled islanding strategy for transient angle instability risk is proposed in case that the multi-circuit HVDC blocks at the same time and the out-of-step islanding devices fail to operate. The load-shedding strategy for the frequency instability risks of isolated local power grid is proposed in case that the entire 500 kV substation lays off. The generator splitting strategy for transient angle instability risk of local power grid is proposed in case of the main protection operation-failure under three-phase short-circuit fault. Simulation of real power grid confirms the validity of proposed strategies.

Key words: sever faults; security and stability; control strategies; Guangzhou power grid

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)12-0123-06

0 引言

特大型中心城市是国家的经济、文化或政治中心, 其对电网安全稳定的要求很高。若发生大规模停电, 将使国民经济遭受巨大损失, 给社会带来灾难。因此, 研究特大型城市电网严重故障下的潜在风险及应对措施, 保障其安全稳定运行十分必要^[1-2]。

广东电网是南方电网中最大的受端电网, 而广州电网位于广东 500 kV 主环网的中心, 是南方电网交直流混联运行、西电东送的受端负荷中心。随着“西电东送”计划的进一步实施, 到目前为止, 南方电网已形成“八直八交”的西电东送格局。交流系统故障与直流系统故障相互影响, 复杂故障如开关拒动、多回直流双极闭锁等可能会带来连锁反应,

严重威胁广州电网的安全稳定运行^[3-4]。本文针对这一情况, 结合电网实际运行经验, 重点分析了可能对广州电网安全稳定造成较大影响的三类严重故障, 提出了阻隔严重故障演化的应对措施, 并进行了仿真验证。

1 严重故障类型及安全稳定风险分析

《电力系统安全稳定导则》中规定的严重故障主要包括第二级和第三级标准涉及的故障类型。由于广州电网作为特大型中心城市电网, 对供电可靠性要求很高, 因此有必要对发生概率相对较低但安全稳定风险较高的故障形式进行探讨^[5], 保障特大型中心城市电网安全稳定运行和可靠供电。本文结合广州电网的实际运行经验, 重点研究对安全稳定影响较大的严重故障, 包括外部电网对广州电网

可能造成严重影响的故障以及广州电网内部的严重故障。主要包括如下三类。

1.1 多回直流同时闭锁，失步解列装置拒动

南方电网多直流馈入广州受端电网，当交流系统发生故障容易导致多回直流换相失败同时闭锁，两广断面失步。目前主要依靠失步解列装置动作防止系统失步崩溃，若失步解列装置拒动，将会导致系统失步，系统的频率电压将发生剧烈变化。在系统的动态响应过程中，伴随着安全自动装置的动作，系统将会失去稳定，最严重情况下将导致系统崩溃，进而导致南方电网大面积停电^[3-4]。

若南方电网从直流、普侨直流或楚穗直流双极闭锁，南方电网失去暂态稳定。失步振荡中心位于广东—广西交流联络线断面。系统功角及母线电压响应如图 1 所示。

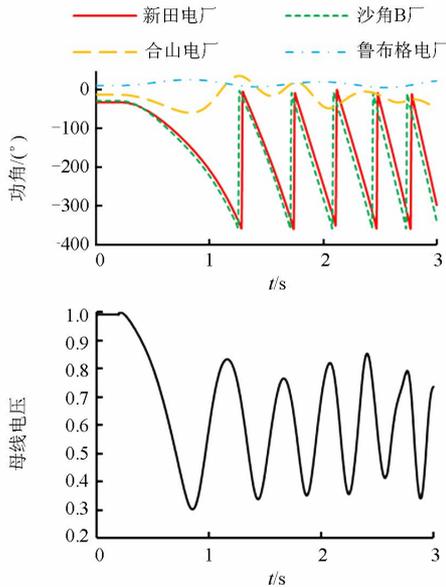


图 1 广东广西机组功角和桂林 500 kV 母线电压
Fig. 1 Generator power angle of Guangdong, Guangxi power grid and voltage of Guilin 500 kV bus

1.2 500 kV 变电站全停

广州电网部分 500 kV 变电站全停故障下，分区电网将孤岛运行，第三道防线在部分运行工况场景下，可能不能满足系统安全稳定运行要求，解列后孤立电网的安全稳定运行成为亟需解决的问题^[4]。

以增城 500 kV 变电站全停故障为例，增城片区电网将孤岛运行。增城片区电网结构如图 2 所示。

在该故障下，增城孤岛系统两个发电厂之间不存在失步问题，但孤网频率失去稳定，计及广州电网低频低压减载配置动作，系统频率仍不满足稳定要求。孤立电网的频率响应如图 3 所示。

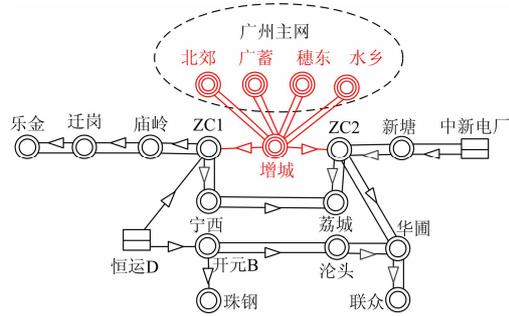


图 2 增城片区电网结构图

Fig. 2 Structure diagram of Zengcheng local power grid

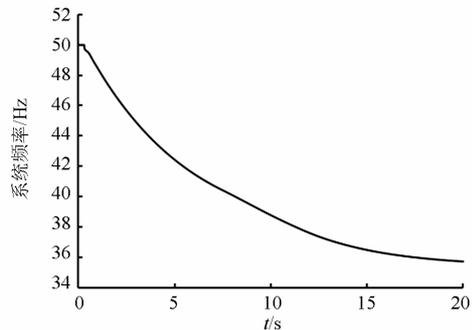


图 3 增城孤网运行后系统的频率响应

Fig. 3 Frequency response of Zengcheng power grid while being islanded from the main grid

1.3 线路三相短路，主保护拒动

500 kV 变电站 220 kV 出线发生三相短路主保护拒动，片区内多个电厂发电机相对主网失稳。若发电机失步保护定值整定不当，也容易导致失稳。另外，发电机与主网解开过晚，将影响系统正常运行。严重时有可能导致第三道防线动作。

保护、开关快速正确动作是系统安全稳定运行的基础，一旦保护或开关拒动，单一故障可能演变为多重故障，严重威胁电网的安全稳定运行。

以广州电网增城 500 kV 变电站 220 kV 出线发生三相短路主保护拒动为例，在故障后 1.5 s，后备保护动作切除故障线路。增城区不同线路发生上述故障，电网失步情况如表 1 所示。

表 1 增城区 220 kV 线路三相短路主保护拒动下系统稳定性
Table 1 System stability with main protection operation-failure under three-phase short-circuit fault of 220 kV lines

| 故障线路 | 失稳模式 |
|------------------|---------------|
| 新塘站 220 kV 出线 | 恒运 D 厂、中新电厂失稳 |
| 荔城站 220 kV 出线 | 恒运 D 厂、中新电厂失稳 |
| 华圃站 220 kV 出线 | 恒运 D 厂、中新电厂失稳 |
| 庙岭站 220 kV 出线 | 恒运 D 厂、中新电厂失稳 |
| 宁西站 220 kV 出线 | 恒运 D 厂、中新电厂失稳 |
| 恒运 D 厂 220 kV 出线 | 恒运 D 厂、中新电厂失稳 |

2 严重故障的阻隔策略

2.1 多回直流同时闭锁, 失步解列装置拒动

多回直流同时闭锁故障下, 若失步解列装置拒动, 系统将面临崩溃导致大面积停电的风险。为了保障广州电网在此严重故障下部分分区电网的生存能力, 有必要建立相应的主动防御措施。本文提出了一种基于主网解列信息触发的局部电网主动解列策略, 用于防御该严重故障下系统暂态失稳问题。

2.1.1 总体架构

基于主网解列信息触发的主动解列的防御思路是: 设计基于广域信息的主动解列方案, 建设局部电网主动解列协调控制系统, 在识别到南方电网主网失步解列装置拒动时, 紧急解列出广州电网的局部电网, 保障部分局部电网的持续安全稳定运行。局部电网主动解列协调控制系统由协调控制主站、主网失步断面信息子站、若干主动解列执行站构成。其逻辑结构如图 4 所示。

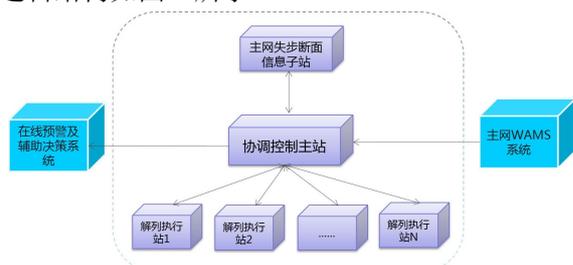


图 4 主动解列协调控制系统结构图

Fig. 4 Structure of the controlled islanding system

各主子站的功能分别如下:

1) 协调控制主站。运行于广州中调。接受主网失步断面信息子站的信息以及主网调控中心 WAMS 系统的信息, 用于主动解列实施条件的判断; 接受局部电网解列执行站上送的其关联输电断面的有功功率信息, 用于局部电网主动解列对象的决策。下发命令至局部电网解列执行站供局部电网解列执行站执行。

2) 主网失步断面信息子站。位于两广失步解列装置附近。同步两广失步解列装置的策略信息(当两广失步解列装置的策略有变化时, 同步更新相关信息), 包括所有判据、动作时刻、动作对象的信息; 接受主网失步解列装置前置端接受到的用于失步解列判据计算的所有电网电气量测信息; 独立测量主网失步解列装置解列断面的有功功率, 并判断失步解列装置是否发生拒动行为。如果拒动, 则发送信息通知协调控制主站。

3) 主动解列执行站。采集其关联输电断面的有

功率信息, 并上送协调控制主站; 接受协调控制主站的解列命令, 并解列其关联输电断面。每一个局部电网解列执行站只关联一个输电断面。

另外, 在线预警及辅助决策系统提供广州电网在线的运行方式信息, 包括网络的实时拓扑信息、发电机出力及负荷信息、联络线潮流信息, 用于主动解列协调控制系统对于主动解列断面的选择以及与解列信息同时发送的紧急控制在线决策信息。当广州电网不具备在线预警及辅助决策系统或其不可用时, 根据主动解列执行站实时采集上送的其关联输电断面的有功功率信息及离线制定的策略表确定要解列的断面。

主网调控中心 WAMS 系统提供南方电网各发电机的功角信息, 当主动解列协调控制系统判断出两广断面失步解列装置拒动时, 选择在合适的时机实施主动解列控制。

2.1.2 动作逻辑及时序

从故障发生到主动解列执行站动作, 中间经历一系列的测量、分析、决策和动作的过程。各过程逻辑及时序如图 5 所示。

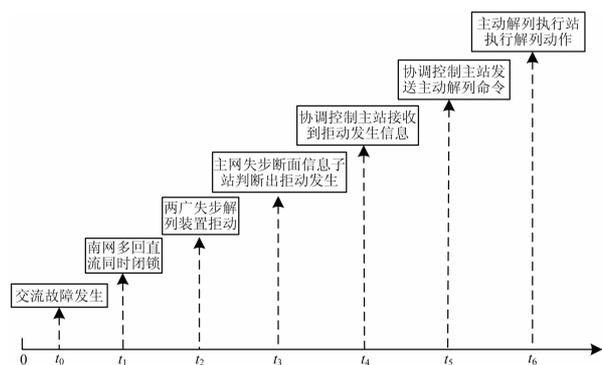


图 5 动作逻辑及时序图

Fig. 5 Sketch map of action logic and sequence

t_0 时刻, 系统中交流设备故障导致 t_1 时刻南网多回直流同时闭锁或部分闭锁, 经过一段时间后至 t_2 时刻, 满足两广断面事先配置的失步解列装置的动作判据。假设此时失步解列装置拒动, 则一般情况下会导致南网失步, 失步振荡中心位于广西—广东断面。

主网失步断面信息子站由于存放了与离线配置的两广失步解列装置同样的策略, 在接收到两广失步解列装置前置端的所有电气量量测信息后, 判断出两广失步解列装置应该动作。此时经过一定的延时, 若发现所独立测量的解列的断面功率并没有失去, 则在 t_3 时刻将已经发生拒动的信息上送至协调控制主站。

经过传输时延,主动解列控制主站在 t_4 时刻接收到主网失步断面信息,主网上送的主网已经发生拒动的信息。

协调控制主站一方面根据在线预警系统提供可供解列的局部电网断面信息(或离线策略表),决策需要解开的广州电网的分区;另一方面根据南网 WAMS 主站提供的全网发电机的功角信息,判别广州电网候选解列片区发电机功角与主网惯量中心的功角差,当功角差达到一定的门槛值时于 t_5 时刻发送解列片区电网的命令。主动解列执行站在接收到命令后立即启动执行,于 t_6 时刻启动解列相关断面。

2.1.3 关键技术讨论

1) 候选的局部电网主动解列断面

局部电网不一定具备实施主动解列的条件,只有将具备实施主动解列条件的局部电网解列,才能保障局部电网在严重故障下能够生存且安全稳定运行^[6]。

候选主动解列断面选择原则如下:1)局部电网具备电厂,且与外部电网净功率额在一定的范围内;2)优先考虑含重要负荷的局部电网的断面;3)断面解列后保障局部电网安全稳定运行具有较高的可靠性和风险可控。

主动解列断面通过在线预警及辅助决策确定的思路是:通过在线系统,在广州电网内寻找 220 kV 以上电压等级的割集断面,割集断面后孤岛系统具备电源,并且通过在线校核,孤岛系统在计及安全稳定自动装置动作下能够保障系统安全稳定运行。

2) 局部电网的主动解列判据

基于广域信息检测所有发电机的功角,并通过判断主网失步解列装置检测断面两侧的发电机功角差来确定主动解列的时机,必要时可辅以其他辅助判据。如果功角差和转速差判据超过预定值,则快速在预定点与主网解列,以确保核心地区供电。

2.1.4 策略验证

多回直流同时闭锁故障下,广西—广东断面系统失步,失步解列装置拒动,主动解列协调控制系统按照上述逻辑进行信息的量测、传输、判断和执行。增城片区满足主动解列条件,在失步解列装置拒动后,考虑量测、传输、动作等时延,再延时 15 个周波解列与增城相连的北郊、广蓄、穗东、水乡四条双回线。

主动解列下,计及广州电网当前的低频低压减载装置正确动作,增城片区的频率、电压响应如图 6 所示。

此时,低频低压减载动作共切除负荷 987 MW,切除量过多,导致频率持续上升;另外,在负荷切除过程中,频率跌落也比较严重,最小值跌至 46 Hz

左右。

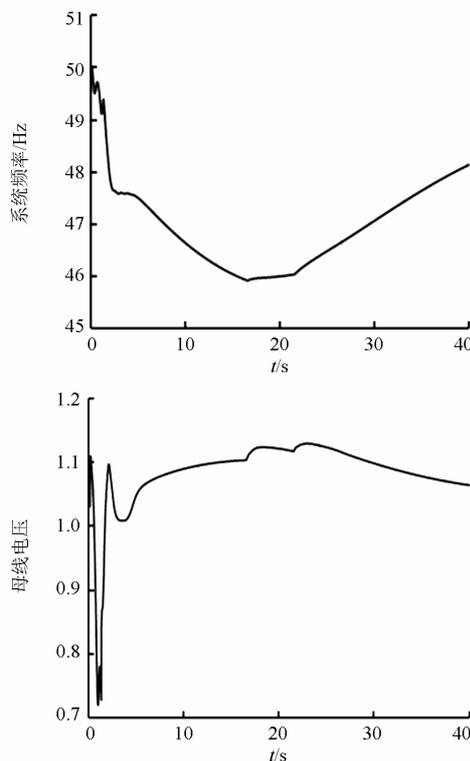


图 6 计及低频低压减载的系统频率、电压响应

Fig. 6 Frequency and voltage response with the UFLS and UVLS

上述分析结果表明,增城孤岛主动解列后仅仅依靠第三道防线动作还不能保障系统稳定运行。必须配以解列联切部分负荷方能保持系统频率稳定。

研究方式下增城片区从外部受电约 900 MW,考虑在主动解列的同时主动切除部分负荷,期待在先切除部分负荷后系统再依靠第三道防线动作保障系统稳定运行。解列联切华圃母线 411 MW 的负荷,并计及第三道防线的低频低压减载动作,得到的系统频率、电压响应如图 7 所示。

此时,低频低压减载与主动切负荷配合,共切除负荷 912 MW,在此情况下,系统供电与负载基本维持平衡。通过频率响应图可以发现,系统的频率最低值大约在 48.5 Hz 左右,且能够较快地回升,最终恢复稳定,系统响应较好,满足稳态频率的要求。系统的电压也能较快地恢复稳定。

因此,验证了主动解列措施辅以联切部分负荷措施,有利于失步解列装置拒动严重故障下片区电网的安全稳定运行。

2.2 增城 500 kV 变电站全停

增城 500 kV 变电站全停故障下,增城片区将变

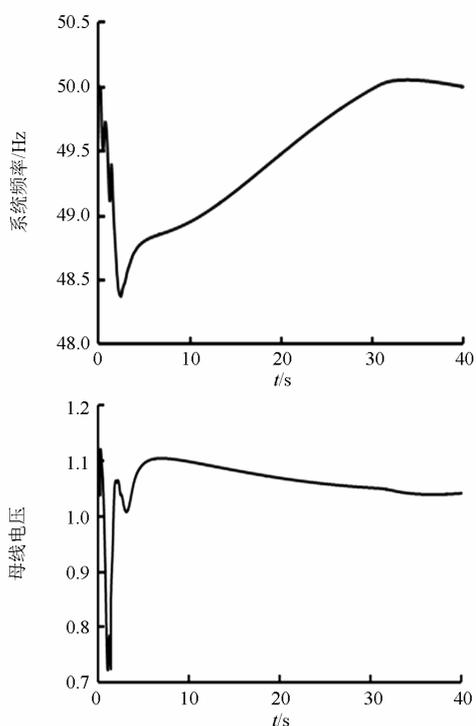


图7 计及低频低压减载的联切负荷紧急控制下系统的频率电压响应

Fig. 7 Frequency and voltage response under load-shedding with the UFLS and UVLS

为孤岛运行。该故障下增城片区的频率失去稳定,在计及低频低压减载正确动作的情况下,仍不能恢复稳定。

为保证孤网安全稳定运行,提出了基于多台变压器跳闸信号实现联切负荷的应对措施。该联切负荷措施与以往的一台变压器跳闸防止另一台变压器过载不同,其目的是防止孤网频率失稳。因此策略整定的方法也不同。联切负荷的量需要根据孤网的功率缺额和孤立电网中发电机和负荷的频率特性共同决定。一般情况下缺额多少则切除多少负荷能保证孤网频率稳定。但是负荷的频率调节特性使得故障发生低频现象后实际消耗功率减少,有利于系统频率最低值的提高。应该优先切除频率调节效应弱的负荷,这样在频率下降过程中,留网的频率调节效应较强的负荷则更利于抵消功率的不平衡,从而对抑制频率跌落有利^[7-8]。

考虑在增城主变全停后,根据上述原则切除增城片区负荷 890 MW 后系统频率响应如图 8 所示,频率最低值高于 49.65 Hz,能够满足要求。

因此,在制定离线策略表时,需要根据功率缺额的大小、孤网中负荷的频率特性差异分档制定不

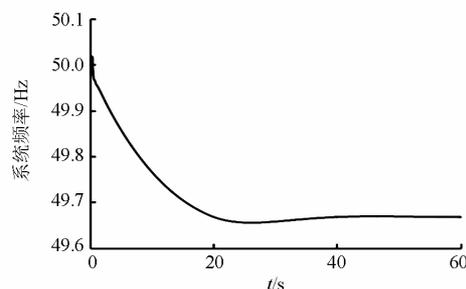


图8 联切负荷紧急控制下系统频率响应

Fig. 8 Frequency response with the load-shedding control

同的联切负荷策略。

如果考虑实际电网中配置了低频减载装置,不一次性通过联切负荷解决孤网低频问题,而是先切除少量负荷,不足的部分由低频减载解决,则可能导致系统频率稳定过程过慢的情况。例如,首先切除宁西 200 MW 的负荷,得到的系统频率响应如图 9 所示。

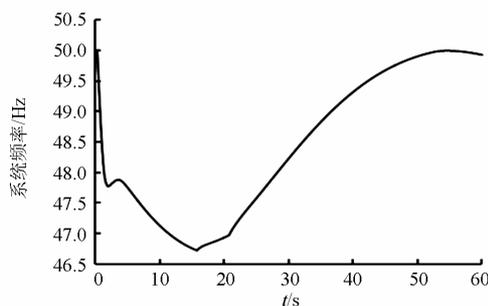


图9 计及低频低压减载的联切负荷下系统频率响应

Fig. 9 Frequency response under the load-shedding with the UFLS and UVLS

虽然频率最终恢复到 50 Hz,但系统响应过程过慢,使得维持低频运行时间过长,且在该过程中频率的跌落较严重,不满足实际运行要求。

2.3 线路三相短路,主保护拒动

广州电网部分片区若发生 200 kV 线路三相短路并且开关拒动故障,计及 1.5 s 后备保护动作切除线路故障,片区电网机组会相对于主网失步。由于拒动故障难以检测和确认,所以难以通过判断出拒动故障并实施紧急切机措施。而一般正常运行下片区电网的机组相对主网机组功角差不会太大,因此可以实时监测片区电网及主网机组的功角,当局部地区发电机与主网机组功角差超过预定值(根据经验确定,例如 300°)时,则对电厂在预定点进行解列。

例如,表 1 所示的场景下对增城片区的中新电厂和恒运 D 厂解列后系统能保持同步运行。由于失

去大电源对电压的支撑, 系统暂态电压出现严重跌落现象, 但计及低频低压减载动作后, 系统电压能够满足要求。

需要说明的是, 仅仅依靠发电机失步保护动作应对这样的故障场景有可能导致动作过晚出现局部地区暂态电压失稳的现象。而基于响应信息建立的解列电厂的策略可以从电网侧实施主动的控制, 可避免这种相继失稳的发生。另外, 解列判据可以根据实际电网特性进行灵活整定。

3 结语

本文针对广州电网严重故障下可能存在的风险, 重点分析了可能对广州电网的安全稳定造成较大威胁的三种严重故障, 并提出了阻隔故障演化的应对策略。

1) 针对多回直流同时闭锁, 失步解列装置拒动这一故障, 提出了基于解列信息触发的主动解列措施, 并辅以联切部分负荷的措施, 避免了系统的崩溃, 保障了故障下片区电网的安全稳定运行。

2) 针对 500 kV 变电站全停这一故障, 提出了孤网频率调节能力的联切负荷策略, 避免了孤网频率崩溃。

3) 针对线路三相短路、主保护拒动这一故障, 提出了对失稳电厂及时解列的措施, 避免了发电机与电网解开过晚导致相继失稳的现象。

通过实际的电网模型和参数算例, 仿真验证了所提策略的正确性, 为广州电网应对复杂故障、防止大面积停电提供了技术思路, 亦有益于探索此类电网应对极端严重故障风险的防御策略。

参考文献

[1] 赵书强, 李聪. 城市电网风险指标的获取[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 114-117.
ZHAO Shuqiang, LI Cong. How to get the risk index of city grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 114-117.

[2] 何永秀, 朱苙, 罗涛, 等. 城市电网规划自然灾害风险评估研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 205-210.
HE Yongxiu, ZHU Jiang, LUO Tao, et al. Risk assessment of natural disaster in urban electric power network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 205-210.

[3] 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.

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.

[4] 孙奇珍. 广州电网孤网运行风险分析与策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[5] 任惠, 熊吉, WATTS D, 等. 基于历史故障记录数据的电网连锁故障规模概率分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 23-30.
REN Hui, XIONG Ji, WATTS D, et al. Study on the historical outage data based probability distribution of cascading line failures in a regional power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 23-30.

[6] 宋洪磊, 吴俊勇, 吴林峰. 电力系统紧急情况下的动态分区和自主解列策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 224-229.
SONG Honglei, WU Junyong, WU Linfeng. Dynamic partitioning and active-split strategy in power system emergency control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 224-229.

[7] 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.

[8] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.

收稿日期: 2014-09-12; 修回日期: 2014-10-14

作者简介:

王珂(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行技术;

崔晓丹(1981-), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: cuixiaodan@sgepri.sgcc.com.cn

叶萌(1987-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统仿真分析、调度运行与控制工作。

(编辑 葛艳娜)