

地区电网孤网运行事件的实例分析

黄淼¹, 文旭², 刘育明³, 文一字³

(1. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065; 2. 国家电网公司西南分部, 四川 成都 610041;
3. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 为积累故障分析经验并给运行方式的制定提供参考, 介绍并分析了一起实际的地区电网孤网运行事件。此事件源于一条 220 kV 输电线路的跳闸。该线路跳闸导致某地区电网形成孤网, 进而发生机组甩负荷、低频减载、变电站母线过电压等行为。运用故障录波、仿真模拟和理论分析相结合的手段, 明确了机组甩负荷等行为发生的原因, 并探讨了维持孤网稳定运行的措施。理论探讨和仿真结果表明, 对该起孤网运行事件的分析是正确有效的。
关键词: 故障分析; 孤网; 甩负荷; 低频减载; 过电压

Case analysis for isolated operation of a regional power network

HUANG Miao¹, WEN Xu², LIU Yuming³, WEN Yiyu³

(1. College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. Southwest Subsection of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China; 3. State Grid
Chongqing Electric Power Co. Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: In order to accumulate experience in fault analysis and provide a reference for the establishment of operating mode, this paper describes and analyzes an actual incident of isolated operation of a regional power network. This incident originated from a 220 kV transmission line trip, which led to the isolated operation of the regional power grid, followed by load rejection, under-frequency load shedding, substation overvoltage, etc. This paper uses fault wave recording, simulation and theoretical analysis to explore the causes of the above acts such as load rejection, and discusses the measures to maintain the stable running of grid. Theoretical discussion and simulation results show that the proposed analysis is effective and correct.

This work is supported by the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (No. KJ1704101).

Key words: fault analysis; isolated grid; load rejection; under-frequency load shedding; overvoltage

0 引言

当电力系统发生故障, 导致地区电网孤网运行时, 若地区电网没有合理的控制措施和运行方式, 地区电网将难以维持稳定运行, 更难以保证重要负荷的供电^[1-5]。近年来, 孤网的运行研究已引起学术界和工程界的广泛关注^[6-7]。本文以某地区电网发生的一起孤网运行事件为例, 对孤网运行过程中的行为和原因进行探讨, 以期能为今后此类故障的分析以及孤网运行方式的制定提供帮助。

1 概况

为便于描述, 将该地区电网简称为 A 网。A 网

以 1 座 220 kV 变电站(以下简称甲站)为枢纽, 下辖若干 110 kV 和 35 kV 变电站, 并通过 1 条 220 kV 线路(以下简称甲乙线)与主网相连。电源方面以水电为主, 除通过 1 条 220 kV 线路(以下简称甲丙线)与 1 座装机容量为 150 MW 的水电厂(以下简称丙厂)相连外, 网内还有部分小水电机组。A 网 220 kV 接线图如图 1 所示。



图 1 220 kV 系统接线图

Fig. 1 Connection diagram of 220 kV system

1.1 故障前运行方式

A 网形成孤岛, 源于甲乙线故障跳闸。甲乙线

跳闸前, A 网总负荷约 99 MW; 甲站主变下网负荷约 59 MW; 丙厂 2 台机组并网发电超过 130 MW, A 网内小水电机组上网约 40 MW; 甲乙线从甲站向主网送电超过 70 MW。

1.2 甲乙线故障情况

甲乙线故障演变过程如下: ① 0.051 s 时, 甲乙线 B 相单相接地短路; ② 约 0.117 s 时, 甲乙线两侧 B 相开关跳闸; ③ 约 1.27 s 时, 甲乙线两侧 B 相开关合闸; ④ 约 1.85 s 时, 因 B 相接地短路故障未消失, 甲乙线重合闸不成功, 两侧三相开关均跳闸。图 2 所示的甲乙线甲侧电流故障录波, 展示了该故障的变化过程。

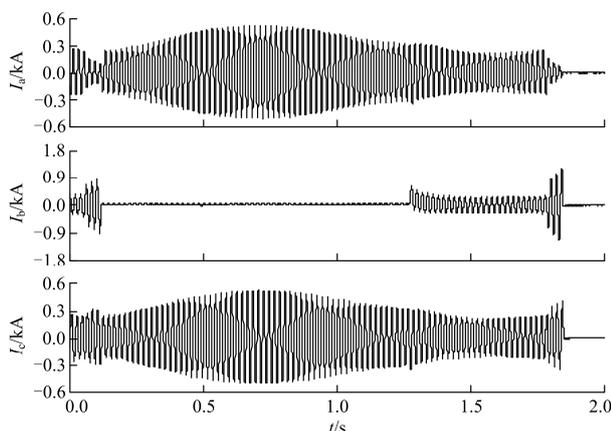


图 2 甲乙线甲侧电流故障录波

Fig. 2 Current flowing through Jia side of line Jiayi obtained from recorded data

1.3 孤网运行情况

甲乙线故障跳闸后, A 网形成孤网, 但未能维持稳定运行。

在电源侧, 甲乙线跳闸后, 丙厂机组维持出力 73 MW 约 7.55 s (在此期间内机组频率曾上升至 57 Hz), 之后机组出力突降至约 25 MW, 甲丙线甲侧电流故障录波以及根据录波计算得到的有功功率如图 3 和图 4 所示; 丙厂持续开展调频调压, 但因孤网电压波动大、机组瓦温高, 甲乙线跳闸 16 min 后, 丙厂 2 号机组停运; 甲乙线跳闸 30 min 后, 丙厂 1 号机组因瓦温高而跳闸。

在电网侧, 甲乙线跳闸后约 1 min 内, A 网 110 kV、35 kV 变电站低频减载基本轮全部动作, 共切除负荷 85 MW; 随着下辖 110 kV、35 kV 变电站切负荷装置的动作, 以及丙厂 2 号、1 号机组的相继停机, 孤网负荷由地方小水电供电, 负荷降至约 5 MW; 甲站、丙厂 220 kV 母线电压在丙厂机组全部停运后超过 250 kV, 因电压过高, 甲丙线甲侧

开关、甲站主变开关相继被拉开; 甲乙线跳闸后约 2 h, 通过停电换电方式, A 网负荷倒至邻近电网供电。

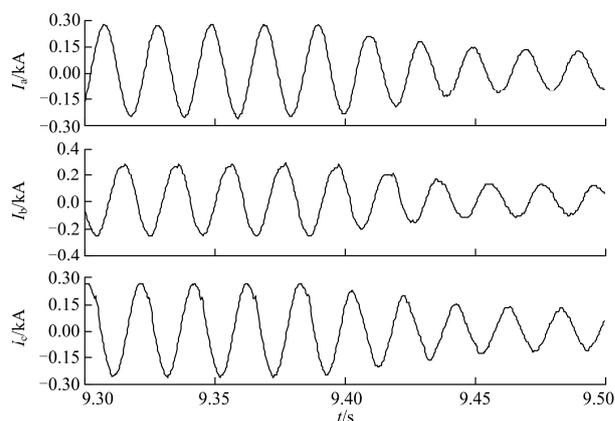


图 3 甲丙线甲侧电流故障录波

Fig. 3 Current flowing through Jia side of line Jiabing obtained from recorded data

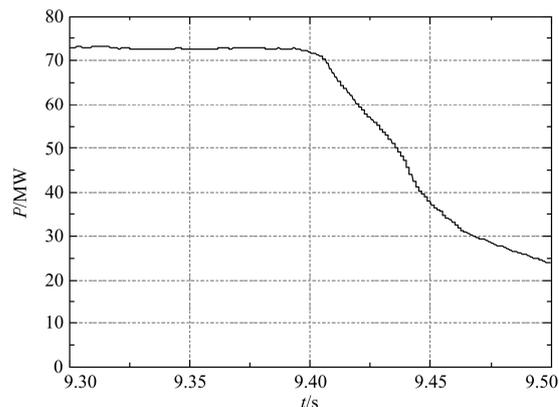


图 4 按录波数据计算得到的甲丙线甲侧有功

Fig. 4 Active power flowing through Jia side of line Jiabing calculated from recorded data

丙厂机组甩负荷和电网低频减载^[8-9]是造成 A 网未能稳定运行的关键因素, 因此, 本文第 2 节将深入讨论机组甩负荷和低频减载的原因。另外, 丙厂机组全部跳闸后, 甲站 220 kV 母线电压异常升高, 故在第 3 节将针对这种过电压现象开展分析。

2 机组甩负荷和低频减载的原因分析

2.1 定性分析

结合发电机、水轮机及其调节系统的特性, 可对甲乙线跳闸后机组甩负荷和孤网低频减载的原因作如下探讨^[10-11]。

1) 故障前, 丙厂的送出功率超过 130 MW, 当甲乙线跳闸后, 其送出功率降为 73 MW, 它立即反

映到发电机输出的电磁转矩的变化,引起发电机机械转矩和电磁转矩的不匹配,这反过来导致发电机转速按一定速率升高,这个速率与转子惯性直接相关。

2) 发电机转速升高,导致水轮机调节系统控制导叶减小,从而降低水轮机的机械功率,这反过来会引起发电机转速的下降。

3) 如果水轮机调节系统的控制策略导致导叶关闭过快、导叶开度过小,使得水轮机的机械功率低于负荷功率时,发电机转速将进一步下降。

4) 因孤网中丙厂机组出力最大,其机组转速的下降将导致孤网中变电站母线频率的降低,当变电站母线频率满足低频切负荷条件时,切负荷装置动作。

通过回溯丙厂集控中心历史曲线,可知丙厂的确存在导叶关闭过快、导叶开度过小的现象。1号机组导叶开度测量值第一次跃变时,其值由稳态前的77左右(对应的机组有功出力约65 MW)跃变至27以下;而2号机组导叶开度第一次跃变时,其值由稳态前的77左右跃变至接近于零。按照导叶开度跃变前后的测量值,对导叶开度跃变后机组能带的稳态负荷进行估算: $(27+0)/(77+77) \times (65+65) \approx 23$ MW,即:若按两台机组导叶开度第一次跃变后的值计算,机组能带的稳态负荷仅约23 MW。由于城口站故障前下网负荷为59 MW,负荷和机组出力不匹配,将导致系统频率降低,进而低频减载。

2.2 仿真验证

下面用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行验证。建模时,通过一个自定义的低频减载模块来自动检测孤网内各站的母线频率,若频率满足低频减载条件,则通过跳开线路开关以切掉负荷。下面基于两种不同的调速器模型开展仿真分析。

首先,按照电站集控中心提供的导叶开度测量数据,直接模拟水轮机导叶开度的时间响应行为(如2.1节中所述)。以故障录波时间起点作为仿真零时刻,孤网母线频率仿真波形如图5所示。可见:机组导叶关闭过快,导致孤网频率达到低频减载条件从而切负荷。因此,仿真结果验证了定性分析结论的合理性。另外,与实际的频率数据比较,孤网频率的仿真响应值,包括频率上升到达的最大值以及低频减载的动作值等,均与实际基本吻合。

其次,根据丙厂提供的调速系统参数进行仿真建模,其中永态转差系数为0.01, PID控制器的比例、积分、微分系数分别为2.19、0.72、0.45。得到的仿真结果也与前述定性分析的结论一致。

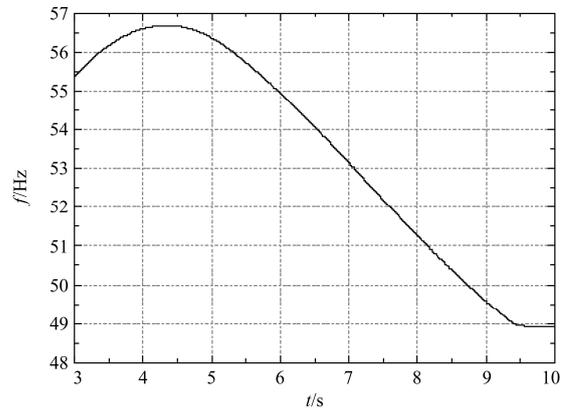


图5 孤网频率仿真波形

Fig. 5 Simulation curve of frequency of isolated network

3 变电站母线过电压的原因分析

在丙厂机组全部跳闸后(距甲乙线跳闸约30 min),甲站和丙厂220 kV母线出现过电压的现象。丙厂升压站220 kV母线电压录波如图6所示,甲站220 kV母线电压变化情况与图6基本相同。根据图6所示波形计算线电压有效值,可知:随着丙厂1号机组的跳闸,丙厂升压站220 kV母线线电压有效值从跳闸前的231 kV升至253 kV左右。

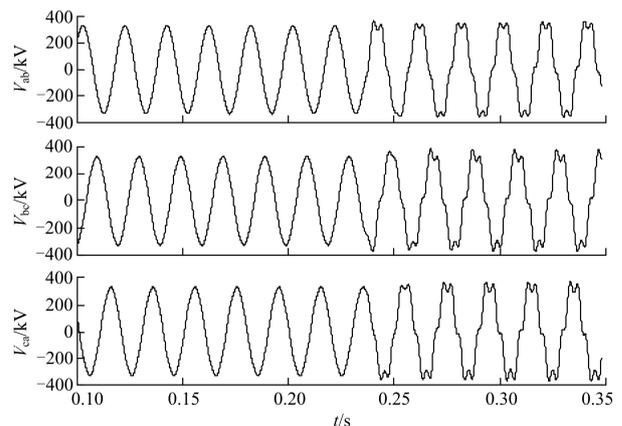


图6 丙厂升压站220 kV母线电压故障录波

Fig. 6 Voltage at 220 kV bus in booster station of plant

Bing obtained from recorded data

3.1 定性分析

按录波计算得到的丙厂1号机组功率如图7所示。可见:丙厂1号机组(比2号机组后跳)跳闸前,机组处于进相运行的状态,吸收无功约9 Mvar。

从上述录波并结合A网当时的工况,易知出现过电压现象的原因为^[12-13]:由于孤网负荷很轻,线路轻载,有功潮流接近于零,同时孤网中交流线路对地电容产生了一定的充电功率;若这些充电功率

无法得到合理的平衡, 系统电压就会被抬高, 导致孤网过电压; 在丙厂 1 号机组跳闸前, 其处于进相运行的工况, 对孤网中线路产生的充电功率予以了平衡, 所以不会出现过电压, 而在 1 号机组跳闸后, 孤网中存在过剩的无功, 所以导致过电压出现。

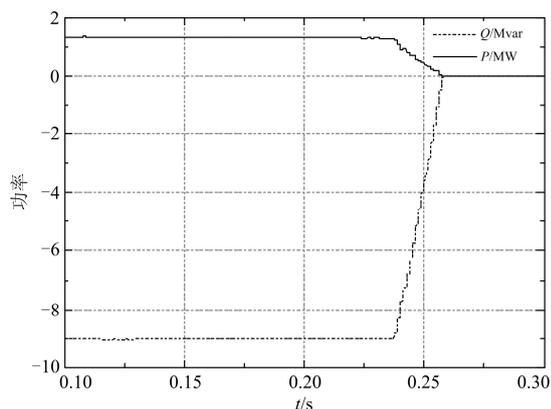


图 7 按故障录波计算得到的丙厂 1 号机组功率
Fig. 7 Output power produced by No.1 unit in plant
Bing calculated from recorded data

3.2 仿真验证

下面采取仿真的方式对上述分析加以验证。图 8 给出了丙厂升压站 220 kV 母线电压的仿真波形, 可见该母线电压由跳闸前的 231 kV 升至 254 kV 左右, 与实际故障录波基本吻合。

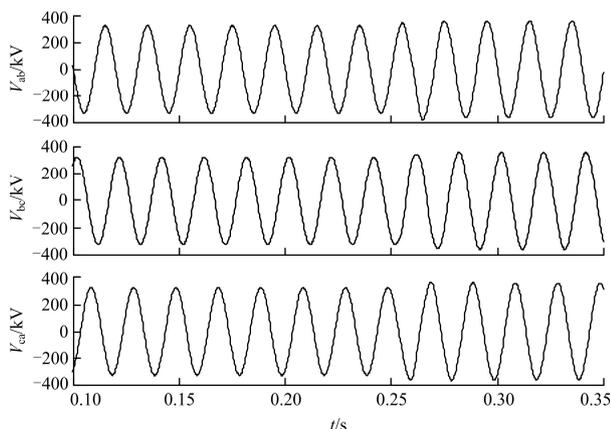


图 8 丙厂升压站 220 kV 母线电压仿真波形
Fig. 8 Simulation curve of voltage at 220 kV bus in
booster station of plant Bing

4 维持孤网稳定运行的措施

在今后的运行中, 当发生类似甲乙线跳闸的故障时, 为维持 A 网稳定运行, 有必要用仿真的手段对稳定措施进行探讨^[14-15]。如前所述, 丙厂机组在故障过程中导叶关闭过快, 并且故障前机组出力占

孤网总容量的比例过高, 是导致 A 网不能稳定运行的主要原因。通过调整调速器的控制策略、改变电网运行方式, 可以达到维持孤网稳定运行的目的。下面通过仿真的方式对上述措施开展研究。

4.1 调整调速器控制策略的仿真结果

保持调速器永态转差系数不变, 调整 PID 控制器的参数, 将比例、积分、微分系数分别设置为 3、0.7、0。在上述参数下进行仿真, 甲丙线甲侧有功如图 9 所示。可见: A 网不会发生低频减载, 系统能稳定运行。

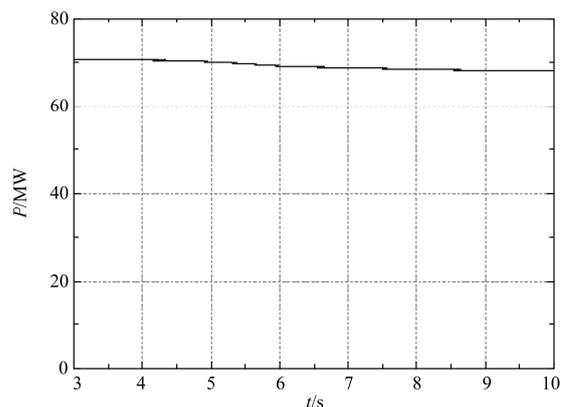


图 9 甲丙线甲侧有功仿真波形
Fig. 9 Simulation curve of active power flowing
through Jia side of line Jiabing

4.2 调整运行方式的仿真结果

仿真的方法是: 在保持 A 网负荷一定的情况下, 考虑网内小水电出力的不确定性, 通过调整丙厂及网内小水电的出力, 从而得到多个算例; 基于这些算例, 在甲乙线上施加类似的故障, 利用大量的仿真, 得到丙厂的容许出力水平, 即能够维持孤网稳定运行的最大出力。相应的仿真结果如表 1 所示。

表 1 丙厂容许出力仿真结果

Table 1 Simulation results of allowed output of plant Bing	
甲站下网有功/MW	丙厂容许出力/MW
52.8	96
60	110
70	115.7
80	124.8
87.8	132.3

5 结论

本文针对实际地区电网中发生的一起孤网运行事件, 着重分析了机组甩负荷、低频减载以及变电站母线过电压的现象, 具有工程现场借鉴意义。同时, 从加强机、网两侧安全可靠运行的角度出发, 运用仿真模拟的手段, 对维持孤网稳定运行的措施

进行了分析和验证, 所提的措施有助于制定事故应急预案。

参考文献

- [1] 周川梅, 孙斌. 贵州主网及地区电网孤网运行安全稳定措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 29-32, 57.
ZHOU Chuanmei, SUN Bin. Study on security and stability measures of the isolated grid operation of the Guizhou power grid and area power grids[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(19): 29-32, 57.
- [2] 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, 155.
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, 155.
- [3] 董锴, 梁俊晖, 林英明, 等. 广东电网一起孤网运行事件及经验分析[J]. 广东电力, 2012, 25(10): 125-129.
DONG Kai, LIANG Junhui, LIN Yingming, et al. An isolated operation of Guangdong power grid and the experience analysis[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(10): 125-129.
- [4] 孙铭泽, 夏德明, 汤伟, 等. 与主网联系薄弱的地区小电网频率崩溃事故分析[J]. 东北电力技术, 2014, 35(12): 8-10, 19.
SUN Mingze, XIA Deming, TANG Wei, et al. Analysis on frequency collapse of local small electric network with weak connection to the main grid[J]. Northeast Electric Power Technology, 2014, 35(12): 8-10, 19.
- [5] 杨铖, 赵晓春, 汤伟, 等. 马鞍山电网北网孤网运行事件及风险控制分析[J]. 安徽电力, 2015, 32(3): 38-42.
YANG Cheng, ZHAO Xiaochun, TANG Wei, et al. Analysis of the isolated-grid operation events and risk control for Northern Ma-anshan power grid[J]. Anhui Electric Power, 2015, 32(3): 38-42.
- [6] 李飞, 肖仕武, 王琮, 等. 孤网发电机调速系统参数定量调整理论分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 103-108.
LI Fei, XIAO Shiwu, WANG Cong, et al. Analysis on quantitative parameter adjustment of speed governor in isolated power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 103-108.
- [7] 李晓琨, 张志强, 吴丽华, 等. 地区电网火电机组超速保护定值深化研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2521-2526.
LI Xiaojun, ZHANG Zhiqiang, WU Lihua, et al. Further research on setting values of over-speed protection controller for fossil power generation units in regional power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2521-2526.
- [8] 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 Xiaoru, XIE Dapeng, et al. Investigation of under frequency load shedding on an isolated system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 29-33, 52.
- [9] HUANG S J, HUANG C C. Adaptive load shedding method with time-based design for isolated power systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2000, 22(1): 51-58.
- [10] 黄宗君, 李兴源, 晁剑, 等. 贵阳南部电网“7.7”事故的仿真反演和分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 95-100.
HUANG Zongjun, LI Xingyuan, CHAO Jian, et al. Guiyang south Grid “7.7” faults simulation and analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9): 95-100.
- [11] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [12] 蒲倩, 张毅威, 陈磊, 等. 容性孤网发电机进相运行与紧急电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 24-29.
PU Qian, ZHANG Yiwei, CHEN Lei, et al. Generator's leading phase operation and emergency voltage control of capacitive isolated network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 24-29.
- [13] 陈志峰, 徐兴发, 王娴. 一种新型小水电安全自动解列装置的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 144-148.
CHEN Zhifeng, XU Xingfa, WANG Xian. Research on a new type of auto-disconnection safety for small hydroelectric power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 144-148.
- [14] 彭思敏, 窦真兰, 凌志斌, 等. 并联型储能系统孤网运行协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 128-134.
PENG Simin, DOU Zhenlan, LING Zhibin, et al. Cooperative control for parallel-connected battery energy storage system of islanded power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 128-134.
- [15] 常海军, 霍超, 李威, 等. 基于解列信息触发的孤立电网紧急控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 27-35.
CHANG Haijun, HUO Chao, LI Wei, et al. Research on emergency control scheme of isolated power grid based on splitting information triggering[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 27-35.

收稿日期: 2017-07-02; 修回日期: 2017-09-24

作者简介:

黄 淼(1978—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真及故障分析; E-mail: huangmiao@cqupt.edu.cn

文 旭(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制;

刘育明(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。

(编辑 魏小丽)