

节能调度对大受端电网频率和线损影响的分析

李红梅¹, 严正¹, 林一², 牛凯²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海电力公司技术与发展中心, 上海 200025)

摘要: 以上海电力系统特有的火电、大受端电网情况为例, 分析了实施日前节能调度、按照节能减排优先顺序进行机组组合优化对系统网架结构、潮流分布, 及系统安全运行是否会带来负面影响。通过对电网实行节能调度存在的实际问题入手, 运用 BPA 等工具进行仿真分析可知: 以火力发电为主地区, 如果按照《节能发电调度办法(试行)》对机组按照减排优先顺序进行排序, 虽然能够减少煤炭能源消耗和污染物排放, 但也会造成系统线损增加及频率波动, 对系统的经济性和稳定性都有一定的影响。

关键词: 节能调度; 线损; 频率; 大受端电网; 机组组合

Impact analysis of energy-saving dispatching on the frequency and line losses of large receiving-end grid

LI Hong-mei¹, YAN Zheng¹, LIN Yi², NIU Kai²

(1. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Technology Development Center, Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200025, China)

Abstract: Taking special case of thermal-power and large receiving-end of Shanghai power utility as examples, the negative impact on system configuration, load flow and safety operation is analyzed from current energy-saving dispatching and generation units optimal combination implemented by the priority level of energy-saving and emission reduction. Based on the analysis of some questions existing in energy-saving dispatching of power system, BPA software is applied to do simulation, and results show that in the region where power is supplied by mostly thermal power, if all generation units are sequenced according to the priority level complying with the code of Energy Conservation, Power Generation and Distribution, although coal consumption and pollutant emission can be reduced, the increasing of line loss and frequency fluctuation cannot be avoided, so that, economical efficiency and stability of power system will be disturbed to some degree.

Key words: energy-saving dispatching; line loss; frequency; large receiving-end grid; unit commitment

中图分类号: TM74; TM76 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)20-0211-06

0 引言

自 2007 年 8 月国务院印发转发《节能发电调度办法(试行)》^[1]推行以来, 各级政府和电网企业及科研院所都积极投入其中, 展开了对节能新调度模式各方面研究。

文献[2]建立了兼顾安全与经济的电力系统优化调度协调理论的整体框架, 提出了优化调度在空间尺度、时间尺度、电力生产环节等方面的协调调度机制及协调调度模型。文献[3]分析了节能发电调度办法与现行发电调度方法的异同以及节能发电调度带来的新问题。从节能调度政策下火电机组排序、

供热机组建设、风电的影响和控制、小机组发电以及相关配套政策等方面提出切实可行的建议, 以保证节能调度的顺利实施。文献[4]提出了节能调度下多目标负荷最优分配算法, 通过 Pareto 解集对各个目标函数的侧重点不同为决策者根据不同目标做出相应决策提供参考。上述文献均是从大框架出发, 考虑了节能调度所带来的一些问题及节能调度的分析方法。

《电力系统安全稳定导则》中明确指出受端系统的定义是: “以负荷集中地区为中心, 包括区内和邻近电厂在内, 用较密集的电力网络将负荷和这些电源联接在一起的电力系统。受端电力系统通过接受外部及远方电源输入的有功电力和电能, 以实现供需平衡”。受端电力系统因其在电力系统结构中所

基金项目: 上海市电力公司科技项目支持

处的特殊位置引起极大关注^[5-6]。在实行节能调度情况下，大受端系统必将面临一系列新问题的出现。

本文以上海特有的大受端电网为例，从具体实际出发，分析实施节能调度，机组按照节能减排优先顺序排序后对上海电网线损及频率所带来的影响。基于这些分析提出了一些合理化建议。

1 上海电网实行节能调度存在实际问题

节能调度的核心思想是优化水能、风能等清洁能源发电，对火电机组按照煤耗水平从小到大排序，让排在前的机组尽量多发电。这样既能节省一次能源，又能减少对环境的污染。日前节能调度的基本思路是：在电网中按照节能调度政策的排序方法，确定当天应开机运行的机组，然后用经济负荷分配的方法对机组出力进行优化^[7]。

上海电网作为一个典型的大受端电网，通过 6 回交流线路与华东主网联系；通过直流回路从华中电网受电，其与外网的联系方式可参考图 1 所示。以 2008 年为例，上海外受电量占到全年用电量的 30%以上^[8-9]，特别是直流受电比例过高加重了本地区机组的调峰、调频压力。上海电网外受容量大且一般多以大段阶梯式调峰，所以很难跟踪负荷变化。且由于目前的跨区直流运行方式一般不参与系统调峰，这部分调峰任务都将转嫁到本地发电厂。而上海电网主要供电机组均为火电机组，仅有的几个燃气机组还受能源供应限制一般很少参与发电调峰任务。上海 300 MW 及以上大容量火电机组占到总装机容量的 70%以上，如果按照“上大压小”的政策和煤耗水平从小到大排序，排在序列后端的均是一些 300 MW 机组来担任调峰能力。则按照节能调度要求，大机组在负荷高峰时均要满负荷出力，失去了调峰调频的能力，而小容量机组（300 MW 及以下）却是“二班制”运行，仅担任调峰及一部

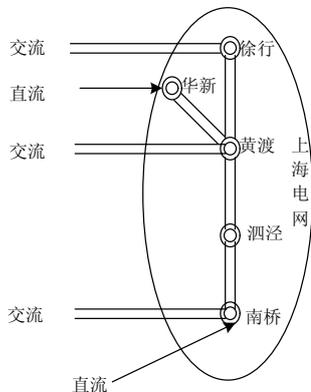


图 1 上海大受端电网网架结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of Shanghai large receiving-end grid

分的调频任务。从整体上限制了机组的 AGC、一次调频调节范围和能力，使得调峰、调频压力进一步加大。在宜华（华中-宜都）直流大功率方式下，一旦发生宜华直流双极闭锁事故，或者宜华与葛南（葛洲坝-南桥）直流同时双极闭锁，除了可能导致 500 kV 交流通道严重过载外，还将伴随系统电压的大幅下降，对上海电网稳定运行带来巨大冲击，甚至会波及到长三角主网，危及华东全网运行安全。因此，应加强大受端电网的特性分析研究，完善上海电网应急机制。

2 节能调度实施对线损影响分析

2.1 节能调度实施对线损的潜在影响

节能调度实施对线损的影响主要体现在按照《试行》办法的机组发电优先顺序进行机组组合时，只是按照能耗关系进行考虑，而没有考虑机组的地理位置，这对局部电网的供电能力、电网结构和网损会产生一定影响。特别是电源结构不合理时，再关停负荷中心的一些小机组可能会进一步增加网损，造成线路超载或者节点电压越限情况的发生。本质上，网损也是对能源的一种损耗。如何在实施节能调度时充分考虑网损变化也是发电侧节能调度与电网节能调度有机结合的一个契机。

2.2 对线损影响仿真分析

为了分析节能调度对系统网损影响，本文对上海 2009 年夏高某一日实施节能调度前后系统潮流变化进行了分析。利用上海实际数据基于 BPA 进行计算，提取了潮流计算结果中上海各个分区一天的网损值。计算结果以柱状图形式给出，如图 2 所示。其中，“节能前”柱状图代表的是不考虑节能调度影响，只根据一天 96 点负荷预测值按照调度常规做法安排一天的机组出力后，得出的系统各个分区网损

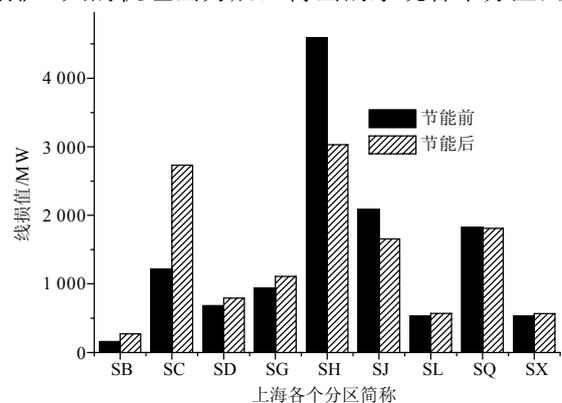


图 2 日前节能调度前后网损比较

Fig.2 Line losses comparison between before-and-after energy-saving dispatching was used

值;“节能后”柱状图代表的是在日前节能调度情况下,考虑机组出力约束和系统网络约束,按照节能减排优先顺序确定一天 96 点机组出力后计算出的全天网损值。图中横坐标分别代表上海主要分区及一些主要负荷简称,分别是:SB,石化、宝钢等负荷;SC,崇明地区;SD,黄渡分区;SG,杨高分区;SH,杨行分区;SJ,泗泾分区;SL,顾路分区;SQ,南桥分区;SX,徐行分区。

从图 2 可见,由于按照节能调度原则进行机组排序时只考虑机组能耗及污染物排放程度,不考虑机组在区域内的地理位置,因此有可能造成部分区域线损不减反增现象的出现,且增幅较大,对这些区域完成线损指标造成进一步困难。从潮流计算结果也可以证实这一点:日前节能调度前系统网损率为 1.149%;实行节能调度后的系统网损率为 1.178%。造成网损率增高的最主要原因就是节能调度改变了原有的潮流模式,机组在区域内的分布不均匀造成了网损增加。

3 对频率影响仿真分析

仅靠火力发电,负荷峰谷差大,冲击负荷多,这些都是上海电网调度时所面临的困难。因此,频率调节一直是其一个软肋。从机组性能及管理方面考虑主要有以下三点制约系统的一次及二次调频工作:

(1) 上海机组自身特性。均为火电机组,频率调整受爬坡率和最大机组出力限制较大。

(2) 有待进一步加强一次调频机组投入考核力度。

(3) 二次调频的调节品质(AGC 响应速率和调节速率)有待提高。

3.1 节能调度实施对频率的潜在影响

在节能调度模式下,因为一些负荷中心的小机组被关停,从而引起了潮流的改变,有可能会造成一些断面潮流过载。实施节能调度后,能耗低的大机组被优先调度发电,虽然新的大机组调节性能好,但它们的热惯性较大,出力调整时间长。如果由老的火电机组承担系统的调频任务,这些中小机组调节性能通常又较差。这是上海市网调频的不利因素。归纳起来有三个原因将制约节能调度实施后系统总体的调节能力:

(1) “上大压小”带来的影响。上海将逐步淘汰小于 300 MW 的火电小机组。目前 300 MW 机组一般也是“二班制”运行,主要用于调峰。因此,系统内机组数目减少,也相应地减少了调频机组的数目,对整体调频能力带来一定影响。

(2) 按照能耗优先顺序调整机组出力,负荷高峰时可能造成大机组满载运行,失去调频能力的情况出现,从而减少了调频机组数目。

(3) 上述两种情况都将造成区域内调频机组地理分布的进一步不合理^[10-11],从而也将进一步影响系统整体的调频能力。

系统的调节能力的下降,将给系统的安全运行带来不利的影响,本文只针对实行节能调度后系统失去部分外来电这种情况分析上海地区频率的变化情况。

3.2 大受电情况下频率仿真分析

由于实际系统的各个机组 AGC 信息不易获得,参数也都存在差异,因此本文采用 SIMULINK 进行定性分析。仿真过程中采用几个典型机组来代替实际中的几十个 AGC 机组,因此在仿真初期存在很大超调量的出现是可能的,但频率变化的趋势是相似的。仿真中采取假设条件如下:将上海的 AGC 机组等值成 3 台,每台调整比例分别为 0.4, 0.4 和 0.2,同样将上海以外区域也等值成 3 台 AGC 机组,比例相同,根据上海整体机组容量与华东网的比较,设置区域间的比例系数为 1:8.4。仿真时间设置较长是为了更好地显示不同案例的最终发展趋势。实际系统中,由于小的负荷扰动时时发生,因此频率将一直处在波动之中。上海网与外网调速器、原动机及电力系统参数均取典型值进行计算。其中,死区设置为 0.033 Hz,上海只有火电机组,因此机组爬坡率取为 1.5%。由于考虑到外网有水电供应,因此放宽机组爬坡率约束,死区设置与上海相同。二次调频积分增益系数的整定对频率调整有很大影响^[12-13],因此本文中积分增益系数分别设置为 0.01 和 0.1 进行二次调频比较分析。

3.2.1 失去直流外来电情况分析

案例 1:假设故障情况为上海突然失去全部宜华直流,且外来交流线路已满载运行,只能靠上海内部 AGC 机组调频,形同孤岛情况。这种情况相当于上海地区负荷突然增加 0.18 p.u.(文中采用标么值代表实际系统出力),则频率变化情况如图 3 中曲线 1 所示。其中,频率偏移量最大时,频率值降至 48.373 Hz。

案例 2:假设故障情况为上海突然失去全部宜华直流,上海 AGC 机组均可参与调频,外网机组也参与 AGC 辅助服务。这种情况相当于上海地区负荷突然增加 0.18 p.u.,且外网旋转备用充足,联络线无阻塞,积分增益分取 0.01。案例 2 时频率波动最小值为 48.847 Hz。要好于孤岛案例 1 时的频率值。具体数据参看表 1。

案例 3: 假设故障情况为上海突然失去全部宜华直流, 上海 AGC 机组均失去调频能力, 只能靠外网机组参与 AGC 辅助服务。

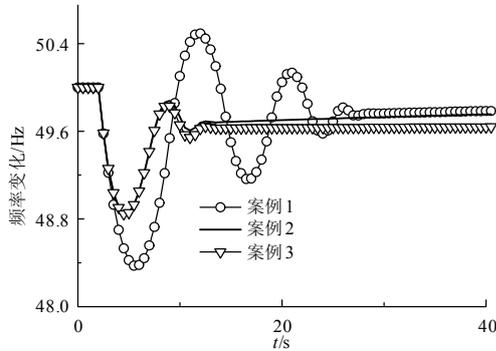


图 3 失去部分直流外送电后频率变化曲线
Fig.3 Frequency change when losing partial DC supplying

表 1 失去直流外受电情况下频率比较
Tab.1 Frequency value comparison when losing partial DC supplying

| | 案例 1 Gain=0.01 | 案例 2 Gain=0.01 | 案例 3 Gain=0.01 |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 频率波动最低值 | 48.373 | 48.847 | 48.847 |
| 频率波动最高值 | 50.492 | 50.000 | 50.00 |
| 频率波动范围 | 2.119 | 1.153 | 1.153 |
| 频率波动最终值 | 49.784 | 49.755 | 49.638 |

图 3 及表 1 所示即上述 3 个案例的仿真结果。从仿真结果不难看出, 本区有调频能力且外区域能提供 AGC 辅助服务时频率波动最小, 且频率恢复也快。有外援情况下, 由于调频机组相对分布均匀, 瞬时提供功率也多, 因此频率波动相对要小很多。从数值上看, 虽然频率恢复最终值情况 1 最好, 但频率波动过大, 不利于系统稳定。相比较而言, 案例 2 的频率波动范围和最终值是最理想的。

3. 2. 2 失去交流外来电情况分析

案例 4: 假设上海某一个 500 kV 变电站站内发生故障, 失去其全部交流外受电, 其他交流联络线满载运行。则, 因为直流外受电也不可调, 也相当于失去全部联络线, 也具有孤岛效应。设上海将损失 0.129 p.u 的交流外受电, 只依靠上海机组调频情况可参看图 4。其中频率波动最低值为 49.124 Hz。

案例 5: 与案例 4 相同的故障发生, 500 kV 变电站失去其全部交流外受电。其他交流联络线均可进一步提供外来电, 且外网 AGC 旋转备用充足。具体数据可参考表 2。

案例 6: 与案例 4 相同, 但上海 AGC 机组均失

去调频能力, 只能靠外网机组参与 AGC 辅助服务。

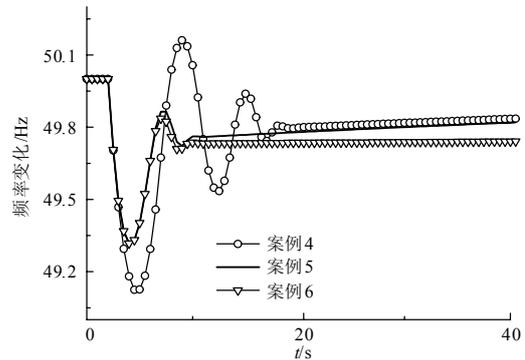


图 4 失去部分交流外送电后频率变化曲线
Fig.4 Frequency change when losing partial AC supplying

表 2 失去交流外受电情况下频率比较
Tab.2 Frequency value comparison when losing partial AC supplying

| | 案例 4 Gain=0.01 | 案例 5 Gain=0.01 | 案例 6 Gain=0.01 |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 频率波动最低值 | 49.124 | 49.317 | 49.317 |
| 频率波动最大值 | 50.161 | 50 | 50.000 |
| 频率波动范围 | 1.036 | 0.683 | 0.683 |
| 频率波动最终值 | 49.834 | 49.819 | 49.740 |

图 4 及表 2 所示即案例 4、5、6 的仿真结果。这个仿真结果进一步验证了案例 1、2、3 的结论。

3. 2. 3 积分增益不同时频率调节比较

本文对情况 2 取不同积分增益系数时频率变化进行了比较, 如图 5, 表 3 所示。不难看出增益越大, 频率波动越大, 但调节速度也越快; 增益越小, 波动越小, 达到频率允许波动范围内需要的时间也越长。因此, 合理设置积分增益系数即可以及时恢复频率到允许变化范围内又可以减少不必要的波动。

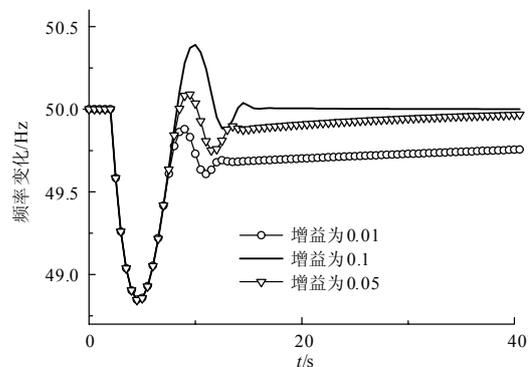


图 5 不同积分增益系数对频率影响比较
Fig.5 Frequency variation with different gain value

表3 增益系数不同时频率值

Tab.3. Frequency values comparing while gain value different

| | 案例 2 Gain=0.01 | 案例 2 Gain=0.1 | 案例 2 Gain=0.05 |
|---------|-------------------|------------------|-------------------|
| 频率波动最低值 | 48.847 | 48.845 | 48.846 |
| 频率波动最大值 | 50.000 | 50.390 | 50.089 |
| 频率波动范围 | 1.153 | 1.544 | 1.243 |
| 频率波动最终值 | 49.755 | 50.000 | 49.966 |

4 结论

节能发电调度势在必行,是能源可持续发展之路。但在实施过程中还需要注意一些环节的细化。本文通过分析节能调度实施对系统网损变化及频率变化可能带来的影响,旨在能够为节能调度的实施提供一些有益的分析及建议:

(1) 机组按照节能减排的优先顺序进行排序时还应考虑机组所处的地理位置,以减少不必要的线路损耗,也有利于机组参与系统频率调节。

(2) 火电机组只有在额定运行时才最经济,能耗最小、污染物排放也最小。但由于历史的原因这些机组一般又处于负荷中心,因此,对于目前处于运行边缘的一些小容量机组,如何利用它们进行调峰、调频、甚至作为一些储能装置的充电电源都是值得探讨的一个课题^[14]。对这些机组的充分利用也是一个值得考虑的经济问题。

(3) 大区域系统中,做好区域之间的互备用是节能调度真正实施时必须执行的辅助服务^[15]。

(4) 在研究节能调度时,发电节能与输电节能不能脱节,只有相辅相成才能做到最优化。

此外,从频率分析中可以看出,积分增益系数的调整对系统频率有很大影响,如何在智能电网环境中实现对 AGC 机组积分增益系数的实时或智能化调整也是很有益的一项实际工作。

参考文献

- [1] 发展改革委,环保总局电监会,能源办. 节能发电调度办法(试行)[EB/OL]. http://www.gov.cn/zw/gk/2007-08/07/content_708486.htm
NDRC, SEPA, SERC and State Energy Office Jointly Promulgated. Energy-saving power dispatching methods (Trial Version) [EB/OL]. http://www.gov.cn/zw/gk/2007-08/07/content_708486.htm.
- [2] 尚金成,周劼英,程满. 兼顾安全与经济的电力系统优化调度协调理论[J]. 电力系统自动化,2007,31(6): 28-33.

- SHANG Jin-cheng, ZHOU Jie-ying, CHENG Man. Coordination theory of electric power system optimal dispatch considering security and economics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 28-33.
- [3] 李春山,李志国,李淑慧. 节能发电调度模型下东北电网运行存在的问题及建议[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊1): 14-16.
LI Chun-shan, LI Zhi-guo, LI Shu-hui. Problems of northeast China power grid under energy-saving generation dispatching mode and the relative suggestions[J]. Power System Technology, 2008, 32(S1): 14-16.
- [4] 苏鹏,刘天琪,赵国波,等. 基于改进粒子群算法的节能调度下多目标负荷最优分配[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 48-53.
SU Peng, LIU Tian-qi, ZHAO Guo-bo, et al. An improved particle swarm optimization based multi-objective load dispatch under energy conservation dispatching[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 48-53.
- [5] 夏向阳,张一斌,蔡灏. 电力受端系统的稳定问题及其对策分析[J]. 继电器, 2005, 33(17): 74-78.
XIA Xiang-yang, ZHENG Yi-bin, CAI Hao. Problems and counter measures of power receiver system stability[J]. Relay, 2005, 33(17): 74-78.
- [6] 国建宝,牛新生,刘玉田. 受端山东电网稳定性分析[C]. //2008年中国电力系统保护与控制学术研讨会论文集. 2008: 588-592.
GUO Jian-bao, NIU Xin-sheng, LIU Yu-tian. Stability analysis of Shangdong power grid as receiving end[C]. //2008 China Power System Protection and Control Symposium. 2008: 588-592.
- [7] 何小磊,严正,谢毓广. 节能减排背景下的机组组合模型和算法研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(3): 154-157, 167.
HE Xiao-lei, YAN Zheng, XIE Yu-guang. Study on modeling and algorithm of unit commitment on background of energy saving and emission reduction[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(3): 154-157, 167.
- [8] 上海电网2008年年度运行方式[S].上海市电力公司. Shanghai power grid operation case of 2008[S]. Shanghai Power Grid, 2008.
- [9] 上海电网2009年年度运行方式[S].上海市电力公司. Shanghai power grid operation case of 2009[S]. Shanghai Power Grid, 2009.
- [10] 赵婷,戴义平,高林. 多区域电网一次调频能力分布对电网安全稳定运行的影响[J]. 中国电力, 2006, 39(5): 18-22.

ZHAO Ting, DAI Yi-ping, GAO Lin. Influence of primary frequency control ability distribution on power system security and stability[J]. Electric Power, 2006, 39 (5) : 18-22.

[11] 段南, 李国胜, 王玉山. 大型火电机组一次调频功能投入的研究[J]. 华北电力技术, 2003(10): 1-4.
DUAN Nan, LI Guo-sheng, WANG Yu-shan. Research on primary frequency modulation function operating on large fossil-fuel power plans[J]. North China Electric Power Technology, 2003(10): 1-4.

[12] 李红梅, 严正. 具有先验知识的Q学习算法在AGC中的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (23) : 36-40, 99.
LI Hong-mei, YAN Zheng. Application of Q-learning approach with prior knowledge to non-linear AGC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (23) : 36-40, 99.

[13] 洪兰秀, 杨莉, 邱家驹, 等. 含自动发电控制信号时滞的区域互联电网AGC控制模式研究[J]. 华东电力, 2006, 34 (3) : 23-27
HONG Lan-xiu, YANG Li, QIU Jia-ju, et al. AGC structures for regional interconnected grids with AGC signal delays[J]. East China Electric Power, 2006, 34 (3) : 23-27.

[14] 李红梅, 严正. 用可再生能源充电的SMES装置在系统调频中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (15) : 94-97, 102.
LI Hong-mei, YAN Zheng. Application of renewable energy charged SMES devices in power system frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (15) : 94-97, 102.

[15] 贾燕冰, 严正, 孙勇, 等. 互联电网共享运行备用可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (16) : 13-18.
JIA Yan-bing, YAN Zheng, SUN Yong, et al. Shareable operational reserve reliability evaluation for multi-area power networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (16) : 13-18.

收稿日期: 2009-10-15; 修回日期: 2009-12-10

作者简介:

李红梅 (1974-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统自动控制, 电力系统优化运行; E-mail: micelle0126@sjtu.edu.cn

严正 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化运行, 电力系统稳定分析, 电力市场;

林一 (1973-), 女, 高级工程师, 硕士, 从事电力科技工作。

(上接第 210 页 continued from page 210)

[2] 中华人民共和国电力行业标准. DL/T 559-2007 220 kV-750 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2007.
People's Republic of China Electric Power Industry Standard. DL/T 559-2007 setting guide for 220 kV-750 kV power system protection equipment[S]. Beijing: People's Republic of China National Development and Reform Commission, 2007.

[3] 杨新民, 杨隽琳. 电力系统微机保护培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
YANG Xin-min, YANG Jun-lin. Power system training material of microcomputer-based relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

[4] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
CHEN Heng. Power system steady-state analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[5] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
LI Guang-qi. Power system transient analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[6] 叶东. 电机学[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994.
YE Dong. Electromechanics[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1994.

收稿日期: 2009-11-02; 修回日期: 2010-03-01

作者简介:

郭碧媛 (1979-), 女, 硕士, 工程师, 从事电网调度工作; E-mail: biyuan_guo@126.com

张丰 (1971-), 男, 高级技师, 从事变电运行管理和培训工作;

罗松 (1977-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统继电保护、电力系统仿真等。