

计及弧道电阻效应的电网频率稳定性分析

赵强¹, 徐征雄¹, 赵晔², 张丽³, 王琦¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;

2. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031;

3. 北京国电华北电力工程有限公司, 北京市 西城区 100120)

Power Grid Frequency Stability Analysis Considering Effects of Arc Resistance

ZHAO Qiang¹, XU Zhengxiong¹, ZHAO Ye², ZHANG Li³, WANG Qi¹

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;

3. Beijing North China Power Engineering Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100120, China)

ABSTRACT: In general, the influence of arc resistance caused by short-circuit fault on power system frequency stability is slight, so arc resistance effect is usually neglected in simulation. However, when the duration of protection failure far exceeds the duration of usual short-circuit fault, the affect of arc resistance effect on power system frequency stability cannot be ignored. The influence of arc resistance effect on power system frequency stability is researched, and based on the recorded data of the fault occurred in Hainan power grid in 2005, the influences of frequency bias coefficient, died-zone and outage of governing system on power system frequency stability are analyzed, and taking arc resistance effect taken into account the fault process is well fitted. Simulation results show that in the analysis on power system frequency stability the arc resistance effect should be taken into account while the duration of fault is long.

KEY WORDS: frequency stability; arc resistance; frequency bias coefficient; dead-zone of governor; power system simulation

摘要: 电力系统短路故障时形成的弧道电阻一般对电网频率稳定性影响不大, 在仿真计算中通常予以忽略, 但当保护拒动故障持续时间远大于通常短路故障时, 弧道电阻效应对电网频率稳定性的影响将变得不容忽视。研究了弧道电阻效应对电网频率稳定性的影响, 以 2005 年海南电网事故录波为依据, 分析了调速系统调差系数、死区和调速器停运对电网频率稳定性的影响, 在计及弧道电阻效应后较好地拟合了事故过程。仿真表明当故障持续时间较长时电网频率稳定性分析应计及弧道电阻效应。

关键词: 频率稳定; 弧道电阻; 调差系数; 调速器死区; 电力系统仿真

0 引言

按照国家电网公司特高压电网发展规划, 未来

我国将形成华北—华中—华东跨区同步互联电网, 将覆盖 13 个省(自治区)和 4 个直辖市, 是世界上跨度最大的同步互联电网。历时三华电网将呈现以 1 000 kV 交流电网为主干网、500 kV 电网分层分区、特高压交直流混联的复杂运行格局, 这一前所未有的运行模式, 对电力系统频率稳定性提出了新的要求^[1-6]。

电力系统发生短路故障时, 在短路点往往产生电弧, 形成弧道电阻^[7-8]。对一般短路故障来说, 由于故障很快被切除, 故障时间短, 弧道电阻对暂态稳定仿真计算影响一般不大。但线路保护一旦出现拒动, 故障持续时间远大于通常短路故障时, 弧道电阻效应对电网稳定计算的影响将变得不容忽视, 如 1982 年 10 月 6 日, 华北电网官厅、下花园地区对主系统发生的振荡事故, 由于弧道电阻的存在且故障切除时间较长, 短路功率损耗剧增地区功率缺额加大, 系统频率严重下降最终导致低频减载过切负荷^[9]。弧道电阻对距离保护的影响早已有定论, 但弧道电阻可能成为影响电网频率仿真计算正确性却很少得到重视。鉴此, 本文将对弧道电阻效应对系统频率稳定性的影响进行研究, 并提出相应建议。

1 弧道电阻效应

电弧放电是气体中的一种自持放电, 其特性是放电通道中电流密度很大, 温度很高。在电气设备中, 高压开关、避雷器及其他装置的触头之间, 当切断电路时就常常发生电弧放电。电弧通道按其电

压降可以分成3部分^[10]:

1) 空气阴极区。正常条件下不超过 10^{-4} cm, 阴极压降在10~20 V范围之间(决定于电极材料、气体种类和状态), 阴极区的场强为 $10^2\sim 10^3$ kV/cm。由于正离子的强烈碰撞, 阴极温度可达2 500~2 800 K。所有这些情况综合起来引起气体的碰撞电离和从阴极表面强烈地发射电子(电流密度可达 $10^3\sim 10^4$ A/cm²)。

2) 阳极区。长度稍许超过 10^{-4} cm, 阳极压降在2~6 V的范围之内, 其场强同样足以产生碰撞电离, 并使电子碰撞阳极, 将其加热到高温。阳极上电流密度比阴极要低一个数量级(约500 A/cm²)。

3) 弧柱。弧柱的长度由施加电压、电流大小及燃弧条件确定, 弧柱上的压降是均匀的, 其场强为15~30 V/cm, 这个场强使电子具有大的速度和能量, 并使弧柱达到约6 000~12 000 K的温度, 由此产生了强烈的热电离, 弧柱中的电荷浓度达 $1.018/\text{cm}^3$ 。

综上所述, 弧道电阻与故障点情况、气象条件、弧道长度等因素有关, 所以它的数值在一定范围内变化, 变化范围一般在几 Ω 到上百 Ω 之间。

2 调速器对系统频率特性的影响

频率是电力系统运行的一个重要质量指标, 反映了电力系统有功功率供需平衡的状态。在系统正常运行情况下, 系统各点基本上是一频率。当全系统的发电总有功出力满足了全系统负荷总需求、并能随负荷的变化而及时调整时, 系统频率将保持额定值。电网发生有功缺额时, 电网频率的下降程度超过机组调速器死区设置后, 机组调速器启动调出旋转备用, 频率下降速率逐步减小, 当机组旋转备用出力与电网负荷频率效应之和等于有功缺额时, 系统频率下降加速度为零, 伴随旋转备用的继续调出, 系统频率回升并最终恢复至某一稳态频率, 即电网频率的变化是旋转备用及电网负荷频率特性共同作用后的结果(不考虑地区电压波动)^[11-16]。

发电机原动机调速系统的模型结构与参数, 直接影响调速器的调节过程和原动机的输出功率, 对电网的频率特性有重要影响。因此在进行电力系统仿真计算时应尽量采用与实际相符合的原动机调速系统模型结构与参数^[17-20]。理论上调速器对系统频率的影响主要决定于调速器静态调差系数及调

速器死区, 其中调差系数决定发电机稳态转速与负荷的关系, 调速系统死区主要由调速器连接点的摩擦和间隙效应及液压继电器阀门重叠造成的, 死区的大小对系统一次调频也具有一定的影响。

3 仿真分析

2005年海南电网孤网运行, 全网主网220 kV环网, 西部为双回路、东部和南部为单回路, 110 kV电网已覆盖全省各市县, 但存在与220 kV间电磁环网。海南电网统调最高负荷1 239 MW。用电负荷主要集中在北部海口地区, 约占全省负荷的35%~40%, 其次是经济发展较快的儋州市、三亚市等地区。

海南电网“大机小网”问题严重。电网统调装机容量1 651.6 MW, 其中水电320 MW, 占19.38%, 火电(包括煤电、气电、油电)1 331.6 MW, 占80.62%, 最大单机约占全网统调高峰负荷的20%, 海口电厂总容量约占全网最大负荷的50%。

海南电网孤网运行, 全网分成海口、三亚、琼海、儋州等9个供电区, 总负荷230.3 MW。海南主网开机总容量578.8 MW, 总出力232.5 MW, 系统旋转备用充足。各发电厂开机及出力详见表1。

表1 海南电网故障前开机

Tab. 1 Unit output before Hainan power system failure

| 开机名称 | 额定容量/ MW | 出力 | |
|----------|-------------|-------|---------|
| | | 有功/MW | 无功/Mvar |
| 海口电厂5号机 | 125.0 | 62.0 | 1.80 |
| 海口电厂7号机 | 125.0 | 72.0 | 9.40 |
| 南山电厂1号机 | 50.0 | 21.0 | 1.80 |
| 洋浦电厂11号机 | 138.8 | 41.0 | -13.20 |
| 洋浦电厂13号机 | 80.0 | 30.0 | 0.49 |
| 大广坝电厂1号机 | 60.0 | 6.5 | -13.60 |

2005年9月25日晚20:00起, 强台风“达维”袭击海南岛, 这次台风造成海南电网大批35 kV及以下配电设备受损, 主网大量线路发生永久性故障跳闸和大量发电机保护动作跳闸, 并导致9月26日海南主网崩溃和大面积停电。其事故起因如下: 9月26日01:22:31 220 kV玉官线官塘侧发生B、C相间间歇性短路故障, 间歇性短路故障持续时间分别为2 794 ms、4 145 ms和9 553 ms, 故障间歇时间分别为966 ms、748 ms。官塘侧线路保护在第1次故障发生后正确动作跳闸。玉洲侧由于2套线路保护直流电源异常, 导致线路保护拒动。海南电网主网崩溃过程见文献[21], 其电网频率记录如图1所示。

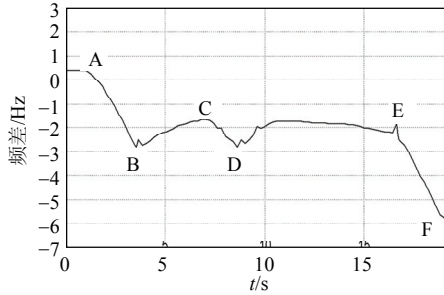


图1 海南9.26事故电网频率记录曲线
Fig. 1 Curve of power grid frequency record in Hainan 9.26 fault

在图1中, $t=1$ s 为玉官线相间短路故障开始时刻, 相当于时间 01:22:31; A 点为频率曲线的初始点; B 点为频率曲线的第 1 个低谷点; C 点为频率曲线的第 1 个高峰点; D 点为频率曲线的第 2 个低谷点; E 点为频率曲线的第 2 个高峰点; F 点为主网频率崩溃过程中的点。

图 2 为海南“9.26”事故原始数据电网频率仿真曲线。由图 2 可知电网频率的仿真结果和记录相差较大, 下面将基于目前采用的调速系统模型, 计算分析调速器参数变化对仿真结果的影响, 通过和实际录波结果的比较, 找出对仿真结果影响较大的参数^[22-23]。

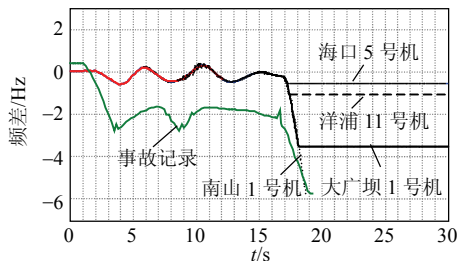


图2 海南9.26事故原始数据电网频率仿真曲线
Fig. 2 Curve of power grid frequency simulation in Hainan 9.26 fault

1) 调速系统调差系数影响分析。

为了研究调差系数变化对仿真结果的影响, 假设海南电网各发电机调差系数分别增加到 0.6 和 3.0(正常时为 0.04), 不同调差系数下海南电网事故仿真频率曲线见图 3。

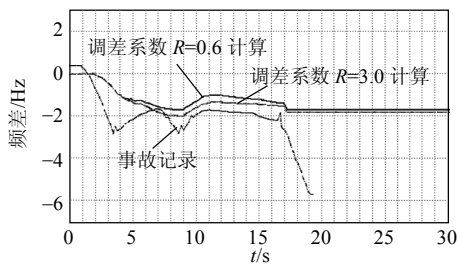


图3 不同调差系数下系统频率变化
Fig. 3 System frequency variation under different bias coefficient

比较图 2 和 3 可以看出, 调速器调差系数 R 对电网频率仿真结果有重要影响, 随调差系数的逐步增加, 电网频率仿真值不断下降, 仿真曲线明显接近记录曲线, 但仿真曲线和记录曲线仍存在较大程度差异。

2) 调速系统死区影响分析。

为了研究死区变化对仿真结果的影响, 假设海南电网各发电机死区由规定值 0.004 分别增加到 0.04 和 0.2, 不同死区下海南电网事故仿真频率曲线见图 4。

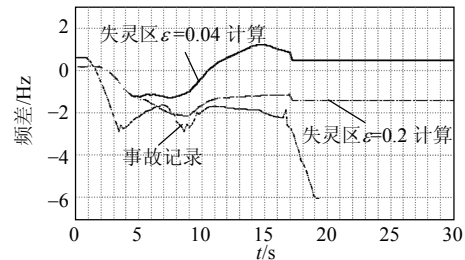


图4 不同死区下系统频率变化
Fig. 4 System frequency variation under different dead-zone

比较图 4 和图 2 可以看出, 调速器死区对电网频率仿真结果有重要影响。随死区的逐步增加, 电网频率仿真值不断下降, 仿真曲线明显接近记录曲线, 但仿真曲线和记录曲线仍存在较大程度差异。

3) 调速系统停运影响分析。

海南电网 9 月 25 日受强台风“达维”袭击后, 大量负荷损失, 大批线路跳闸, 系统频率波动较大, 在这种特殊情况下, 海南主网各电厂为了减少机组出力受电网频率变化的影响, 减少机组出力波动, 从电厂自身的利益出发, 可能将厂内运行机组调速器的调频功能调至较低值, 使全网调频功能大大下降。为了仿真这一特殊情况, 将海南电厂所有机组调速器停运, 调速器停运下海南电网事故仿真频率曲线见图 5。

比较图 2 和 5 可以看出, 海南主网各发电机调速器停运对电网频率仿真结果有重要影响; B 点和 D 点频降仿真值和记录值明显接近。比较图 5 和

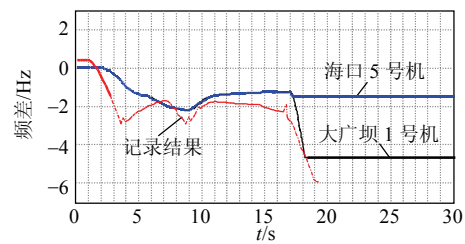


图5 调速器停运下系统频率变化
Fig. 5 System frequency variation under governor breakdown

图 3—4 可知：发电机调速器全部停运的频率仿真结果和各发电机调速器死区为 0.2 和各发电机调速器调差系数 $R=3.0$ 时的仿真结果基本一致。这说明，各发电机调速器调差系数或死区大量增加后，调速器调频功能严重下降，和调速器全部退出运行时情况接近。

从图 5 还可以看出，海南主网各发电机调速器全部停运后，电网频率下降仍不如记录曲线严重，B、D 点的频降仿真值与记录值之间仍有较大的差距，特别是 B 点，仿真值仅为记录值的 46%。这说明原海南主网各电厂调速器停运虽然是影响频率仿真计算结果的因素，但它并不是最重要因素，还要研究分析其他重要原因。

4) 弧道电阻效应影响分析。

电力系统发生短路故障时，在短路点往往产生电弧，形成电阻性弧道。对通常短路故障来说，由于故障很快被切除，故障时间很短，弧道电阻对暂态稳定仿真计算的影响一般不大。但在海南主网崩溃事故中，220 kV 玉官线官塘侧 B、C 相间发生 3 次间歇性短路故障，玉洲侧线路保护因直流电源异常拒动，3 次故障持续时间均比通常短路故障长得多，弧道电阻在事故过程中消耗了大量功率，因此弧道电阻可能成为影响电网频率仿真计算结果的重要因素。

在故障时序确定情况下，弧道电阻对电网频率仿真的影响取决于弧道电阻值的大小。在弧道电流一定情况下，弧道电阻愈大，对频率仿真的影响也愈大。电弧是一个高度非线性的时变电阻，一般来说，弧道电流增加和弧道长度减少时，弧道电阻则减少，经仿真计算，玉官线发生相间故障时，弧道电流在 1~2 kA 之间。海南“9.26”220 kV 玉官线官塘侧 B、C 相发生相间短路时，弧道电阻没有实测数据，这给弧道电阻影响的仿真计算分析带来很大困难。由于弧道电阻过大会导致电弧熄灭，因此可基本确认其大小应在 100 Ω 以内^[24]。

为了掌握弧道电阻与频率仿真曲线频差的大致关系，对频率曲线第一个低谷点 B 点频差进行玉官线加第一次短路故障弧道电阻后的仿真计算。选择 B 点进行仿真是因为在不考虑弧道电阻情况下，B 点频差的仿真值与记录值之间差别最大。B 点频差仿真计算结果如图 6 所示。

仿真表明弧道电阻对海南“9.26”事故仿真的频率特性有重要影响。弧道电阻是影响这次事故频

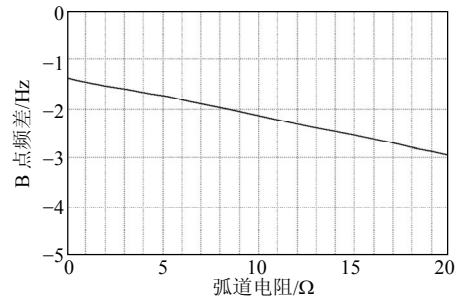


图 6 弧道电阻大小与系统频降关系

Fig. 6 The relationship between arc resistance value and system frequency decrease

率仿真结果的重要因素。

在基本数据方式基础上，假设海南主网发电机调速器停运，玉官线第 1 次、第 2 次和第 3 次相间故障弧道电阻分别为 $R_{\text{弧}1}$ 、 $R_{\text{弧}2}$ 和 $R_{\text{弧}3}$ ，按电网频率仿真曲线尽量拟合记录曲线的方法选择玉官线 3 次故障时的弧道电阻。频率仿真结果见图 7。

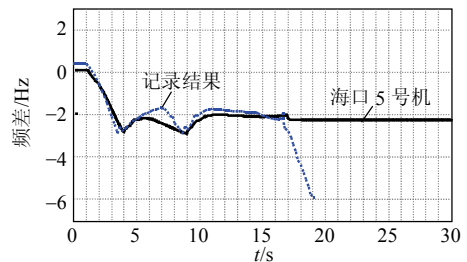


图 7 系统频率变化

Fig. 7 System frequency variation

仿真中玉官线 3 次相间故障弧道电阻的结果如下：

$R_{\text{弧}1}=18.25 \Omega$ ； $R_{\text{弧}2}=7.88 \Omega$ ； $R_{\text{弧}3}=4.12 \Omega$ 。

在海南主网调速器全部停运和考虑玉官线相间故障弧道电阻后，电网频率仿真曲线较好地重现了事故过程，玉官线 3 次相间故障弧道电阻值在 4~20 Ω 之间，且弧道电阻值逐次减少。

4 结论

1) 调速系统参数对电网频率稳定性具有重要的影响。仿真结果表明，海南电网事故前电厂调速器应出于停运状况。

2) 计及弧道电阻效应是海南电网事故频率仿真拟合成功的重要原因。由于玉洲侧保护拒动，导致 3 次相间故障的时间均较长，仿真计算中需要考虑弧道电阻在事故过程中消耗的功率。

3) 2005 年海南电网事故仿真结果表明玉官线 3 次相间故障的弧道电阻值在 4~20 Ω 之间，且弧道电阻值随故障持续时间增大而减小，建议有关部门进一步开展架空线路短路故障时弧道电阻特性的研究工作。

参考文献

- [1] DL 755—2001 中华人民共和国电力行业标准[S].
- [2] DL/T 1040—2007 中华人民共和国电力行业标准[S].
- [3] DL/T 428—2010 中华人民共和国电力行业标准[S].
- [4] 袁季修. 防止电力系统频率崩溃的紧急控制[J]. 电力自动化设备, 2002(4): 1-4.
Yuan Jixiu. Emergency control for preventing frequency collapse of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002(4): 1-4(in Chinese).
- [5] 魏庆海, 鲁顺, 范东春, 等. 东北电网频率与联络线潮流的关系[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 22-25.
Wei Qinghai, Lu Shun, Fan Dongchun, et al. Relation of frequency in Northeast power grid to power flow in tie-line between Northeast and North China Grids[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 22-25(in Chinese).
- [6] 赵强, 赵良. 南方电网系统频率特性及低频减载方案研究[J]. 中国电力, 2010, 43(5): 7-11.
Zhao Qiang, Zhao Liang. Study on dynamic frequency characteristics and under-frequency load shedding scheme for Southern power grid[J]. Electric Power, 2010, 43(5): 7-11(in Chinese).
- [7] 刘洪顺, 李庆民, 邹亮, 等. 安装故障限流器的输电线路潜供电弧特性与单相重合闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 31(28): 62-67.
Liu Hongshun, Li Qingmin, Zou Liang, et al. Secondary arc characteristics and single-phase autoreclosure scheme of EHV transmission line with fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 31(28): 62-67(in Chinese).
- [8] 柴旭峰, 梁曦东, 曾嵘. 串联补偿的远距离输电线路潜供电弧参数特性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 7-12.
Chai Xuzheng, Liang Xidong, Zeng Rong. Secondary arc parameters characteristics of long distance series compensated transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 7-12(in Chinese).
- [9] 电力系统安全稳定导则学习与辅导[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 91-92.
- [10] 司徒潘楚克. 高电压技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 9-46.
- [11] 于达仁, 郭钰锋, 徐基豫. 发电机组并网运行一次调频的稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 59-63.
Yu Daren, Guo Yufeng, Xu Jiyu. The primary frequency regulation stability of parallel turbo generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 59-63(in Chinese).
- [12] 赵强, 王丽敏, 刘肇旭. 全国电网互联系统频率特性及低频减载方案[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 35-40.
Zhao Qiang, Wang Limin, Liu Zhaoxu. Study on dynamic frequency characteristics and coordinative under-frequency load shedding scheme for nationwide interconnected power grid of China [J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 35-40(in Chinese).
- [13] 竺炜, 谭喜意, 唐颖杰, 等. 汽轮发电机组一次调频性能的分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 52-56.
Zhu Wei, Tan Xiyi, Tang Yingjie, et al. Analysis and research on primary frequency modulation of the turbine generation unit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 52-56(in Chinese).
- [14] 吴杰康. 在暂态过程中电力系统频率的估算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 70-74.
Wu Jiekang. Frequency estimation of power systems in transient processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 70-74(in Chinese).
- [15] 曾启明, 陈伟乐, 谢志堂, 等. 电力系统频率新的跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 70-72.
Zeng Qiming, Chen Weile, Xie Zhitang, et al. A new tracking algorithm for power system frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 70-72(in Chinese).
- [16] 赵强, 张丽, 王琦, 等. 系统负荷频率特性对电网频率稳定性的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 69-73.
Zhao Qiang, Zhang Li, Wang Qi, et al. Impact of load frequency characteristics on frequency stability of power systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 69-73(in Chinese).
- [17] NERC Training Document. Understand and Calculate Frequency Response. [2003-02-20]. <http://www.nerc.com/fileUploads/File/Training/Webinar-Generator-Frequency-Response.050509.pdf>.
- [18] Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999(11): 967-979.
- [19] Pereira L, Undrill J, Kosterev D, et al. A new thermal governor modeling approach in the WECC[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 819-829.
- [20] Pereira L, Kosterev D, Davies D, et al. New thermal governor model selection and validation in the WECC[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 517-523.
- [21] 唐斯庆, 张弥, 李建设, 等. 海南电网“9.26”大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7.
Tang Siqing, Zhang Mi, Li Jianshe, et al. Review of black out in Hainan on September 26th: causes and recommendations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7(in Chinese).
- [22] 宋新立, 刘肇旭, 李永庄. 电力系统稳定计算中火电厂调速系统模型及其使用方法的分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 44-49.
Song Xinli, Liu Zhaoxu, Li Yongzhuang. Analysis of speed governing system model for fossil fired power plant and its application in power system stability simulation[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 44-49(in Chinese).
- [23] 中国电力科学研究院. 海南电网 2005 年“9.26”主网崩溃大面积停电事故仿真计算分析[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [24] 陈维江, 颜湘莲, 贺子鸣, 等. 特高压交流输电线路单相接地潜供电弧仿真[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 1-6.
Chen Weijiang, Yan Xianglian, He Ziming, et al. Simulation for secondary arc caused by single-phase grounding in UHV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 1-6(in Chinese).



赵强

收稿日期: 2011-06-06。

作者简介:

赵强(1978), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统运行分析研究, E-mail: zhaoliang@epri.sgcc.com.cn;

徐征雄(1941), 男, 教授级高级工程师, 从事电力系统分析工作;

赵晔(1981), 工程师, 从事电网管理工作;

张丽(1978), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统设计工作;

王琦(1977), 女, 博士, 工程师, 从事电力系统运行分析工作。

(责任编辑 王晔)