

## 基于 ETAP 的发电厂电气系统暂态分析

钱序<sup>1</sup>, 万里宁<sup>1</sup>, 杨华<sup>2</sup>

(1. 东北电力设计院, 长春市, 130021; 2. 长春职业技术学院, 长春市, 130033)

**摘 要:** 依托某发电厂  $2 \times 660$  MW 空冷机组工程, 应用电力瞬态分析程序 (electrical transient analysis program, ETAP) 对该电厂的电气系统暂态稳定性进行了仿真计算。针对多种可能的操作及故障 (发电机切除, 400、10.0.4 kV 母线故障并清除, 大功率电动机启动、切除及再启动, 快切动作等) 对厂用电系统造成的影响进行了分析研究。通过仿真波形, 直观形象地反映了厂用电系统的暂态过程, 为发电厂电气系统的设计提供了有力的技术支持。

**关键词:** 发电厂; 电气系统; 暂态分析; 仿真计算; 电力瞬态分析程序 (ETAP)

## Transient Analysis for Electrical System of Power Plant Based on ETAP

QIAN Xu<sup>1</sup>, WAN Lining<sup>1</sup>, YANG Hua<sup>2</sup>

(1. Northeast Electric Power Design Institute, Changchun 130021, China;

2. Changchun Vocational Institute of Technology, Changchun 130033, China)

**ABSTRACT:** The simulative calculation of a transient stability is performed by an electrical transient analysis program (ETAP) for a  $2 \times 660$  MW coal fired power plant. Several conditions including fault and operation which may cause a big influence on the auxiliary power system of power plant are studied. The transient process is shown clearly by simulated waveform. The results give a strong support to the electrical system design of power plant.

**KEYWORDS:** power plant; electrical system; transient analysis; simulative calculation; ETAP

中图分类号: TM 621.7\*1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2012)03-0074-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-7229.2012.03.018

## 0 引言

在发电厂的运行过程中, 电力系统经常会受到很多扰动, 如各类故障、母线的投切、电动机的启停等, 此时电气系统相应的继电保护动作, 厂用电系统能继续安全、稳定地运行。在设计过程中, 如果要得到某种情况下的暂态曲线, 需要解系统网络方程和机械微分方程, 计算过程十分繁琐费时。所以, 实际工作中只能计算某点的极限状况来简化计算, 或者计算系统在某种情况下的稳定状态, 对于各种扰动从发生到结束这一段时间的暂态过程则难以获得。随着计算机仿真技术的发展, 越来越多的软件都可以实现对系统暂态的计算及仿真, 为设计和运行提供更加精确的计算结果。本文利用电力瞬态分析程序 (electrical transient analysis program, ETAP), 依托某国外发电厂  $2 \times 660$  MW 空冷机组的厂用电系统进行暂态特性仿真和分析。

## 1 某电厂电气系统概况

某电厂当期装机容量  $2 \times 660$  MW, 发电机一主变

压器为单元接线, 接入厂内 400 kV 配电装置。400 kV 系统为一个半断路器接线, 通过 4 条架空线接入系统。主变压器设置 3 台 250 MVA 的单相变压器, 装设发电机断路器。每台机组设置 1 台 75/45-45 MVA 高压厂用变压器 (下称高厂变) 和 1 台 45 MVA 高压公用厂用变压器 (下称高公变)。全厂共用 1 台高压备用变压器 (下称高备变)。2 台机组的高公变互为备用, 高备变从厂内 400 kV 配电装置引接<sup>[1]</sup>。

## 1.1 电气主接线

本工程电气主接线采用一个半断路器接线, 本期 2 回主变压器进线, 4 回出线, 1 回高备变, 2 回出线经厂内 400/132 kV 变压器向煤矿供电, 构成 5 个完整串, 其中包含 1 个预留出线扩建位置<sup>[1-2]</sup>。

## 1.2 主要设备参数

(1) 发电机。额定容量 784.7 MVA, 额定功率 667 MW, 功率因数 0.85, 额定电压 22 kV, 额定电流 20.593 kA, 频率 50 Hz, 转速 3 000 r/min, 励磁电压 498 V, 励磁电流 4.733 kA, 定子绕组接线为 YY, 冷却方式为水-氢-氢, 励磁方式为静止自并励, 直轴暂

态电抗(饱和值)27.8%,直轴次暂态电抗(饱和值)21.6%,短路比不小于0.51,绝缘等级及温升为F级(温升按B级校验),转子转动惯量 $10\,250\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (发电机)、 $31\,051\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (汽轮机)<sup>[34]</sup>。

(2)主变压器。额定容量 $3\times 250\text{ MVA}$ ,变比 $(400\sqrt{3}\pm 8\times 1.25\%)\text{ kV}/22\text{ kV}$ ,阻抗电压14%,接线组别为Ynd11,高压侧中性点接地方式为直接接地,冷却方式为强迫油循环导向风冷。

(3)高厂变。额定容量75/45-45 MVA,变比 $(22\pm 2\times 2.5\%) \text{ kV}/10.5\text{ kV}$ ,阻抗电压17.2%,接线组别为D、yn1-yn1。

(4)高公变。额定容量45 MVA,变比 $(22\pm 2\times 2.5\%) \text{ kV}/10.5\text{ kV}$ ,阻抗电压12.5%,接线组别为Dyn1。

(5)高备变。额定容量75/45-45 MVA,变比 $(400\pm 8\times 1.25\%) \text{ kV}/10.5\text{ kV}$ ,阻抗电压17.6%,接线组别为YNyn0yn0/d。

### 1.3 10 kV厂用电系统

每台机组设2段10 kV单元工作段,单元负荷均由单元工作段供电。全厂设2段10 kV公用母线,分别由2台高公变供电。2段公用母线之间设联络断路器,可由任意一台高公变带全部公用负荷。图1为厂用电接线示意<sup>[1,5]</sup>。

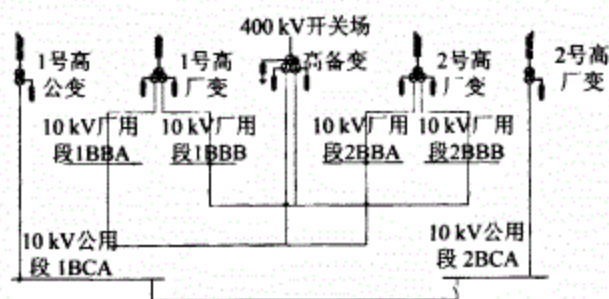


图1 厂用电接线示意

Fig. 1 Sketch drawing for auxiliary power system

## 2 电气系统暂态分析

### 2.1 计算方法

暂态稳定的研究采用ETAP电力工程计算软件,该软件在暂态分析部分遵循IEEE 1110—2002<sup>[6]</sup>、IEEE 421.5—2002<sup>[7]</sup>。利用ETAP软件对发电机系统及单元、公用高压厂用电系统、低压厂用电系统以及升压站400 kV系统进行仿真计算。

### 2.2 输入数据

(1)系统阻抗。规划容量为4 800 MW;400 kV系统的短路电流为43.4 kA,由系统提供的短路电流约为23.2 kA。

(2)主要设备参数见第1.2节。

(3)高压厂用电机的功率及负载状况如表1所示。

表1 高压电动机功率及转动惯量

Tab. 1 Power and moment of inertia for high voltage motor

| 名称         | 功率/kW  | 电机转动惯量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ) | 负载转动惯量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ) |
|------------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 电动给水泵      | 17 000 | 64 000                                | 6 000                                 |
| 引风机        | 8 000  | 380                                   | 3 800                                 |
| 凝结水泵       | 3 500  | 130                                   | 1 500                                 |
| 一次风机       | 3 500  | 130                                   | 1 800                                 |
| 送风机        | 1 900  | 91                                    | 498                                   |
| 闭式循环水泵     | 500    | 14                                    | 161                                   |
| 磨煤机        | 850    | 25                                    | 265                                   |
| C-1 输煤皮带   | 250    | 10                                    | 87                                    |
| C-5AB 输煤皮带 | 220    | 10                                    | 78                                    |
| 空压机        | 250    | 10                                    | 87                                    |
| 运灰皮带       | 355    | 12                                    | 120                                   |

(4)高压负荷。10 kV工作段的负荷计算表见文献[1],在模拟过程中的负荷容量和配置均遵循该表。

## 3 暂态稳定的仿真

### 3.1 发电机切除

状况1:1号发电机因为发电机断路器动作在1.0 s时切除,厂用电系统将由主变压器倒送供电。图2表示10 kV母线1BBA和2BBA的电压曲线。从图2可以看出,母线1BBA在这个过程中会有大约1%的电压降。受1号发电机切除的影响,母线2BBA电压会有一个短时的震颤,幅度也在1%以内。

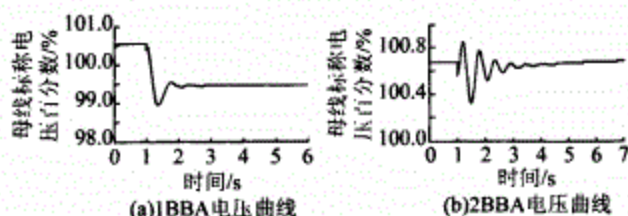


图2 10 kV母线1BBA和2BBA电压曲线(状况1)

Fig. 2 Voltage curve of 10 kV busbar 1BBA and 2BBA (case 1)

状况2:1号发电机由于400 kV断路器动作在1.0 s时停运。由于主变压器失去电源,1号高厂变将被快速切换至厂用变,1号公用变的负荷将由2号公用变一并承担。快切将在100 ms内完成。图3为10 kV母线1BBA和2BBA的电压曲线。

从图3(a)、(b)曲线可以看出,母线1BBA在切换



过程中有一个电压降,但母线电压水平还可以保持在80%以上,并且在1 s之内就可以恢复正常。2BBA受到1号发电机退出的影响,母线电压会出现一个1%以内的波动,并持续数秒。图3(c)表示当1号发电机退出运行后,公用段1BCA切至2号公用变时,1BCA段在切换中有一段短时失电,当2段母线负荷全部由2号公用变负担时,母线电压会降低到额定电压的97%。从母线电压的曲线来看,有发电机断路器的发电厂在切除发电机时,由主变倒送供厂用电时维持停机负荷对厂用电系统的扰动可更小一些。

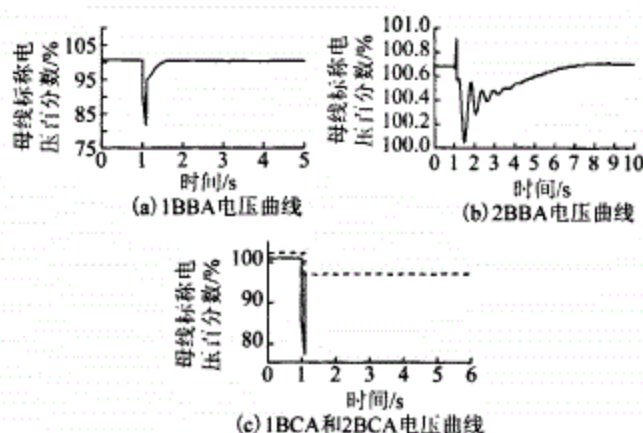


图3 10 kV 母线1BBA和2BBA电压曲线(状况2)

Fig. 3 Voltage curve of 10 kV busbar 1BBA and 2BBA (case 2)

### 3.2 400 kV 母线故障及清除

400 kV II 母线在1.0 s发生三相故障,并在1.1 s时被切除,这一情况和线路故障类似。图4(a)表示1号发电机的功角,图4(b)表示1号发电机转速曲线,图4(c)表示400 kV母线的电压曲线,图4(d)表示10 kV 母线1BBA在此故障影响下的电压曲线。

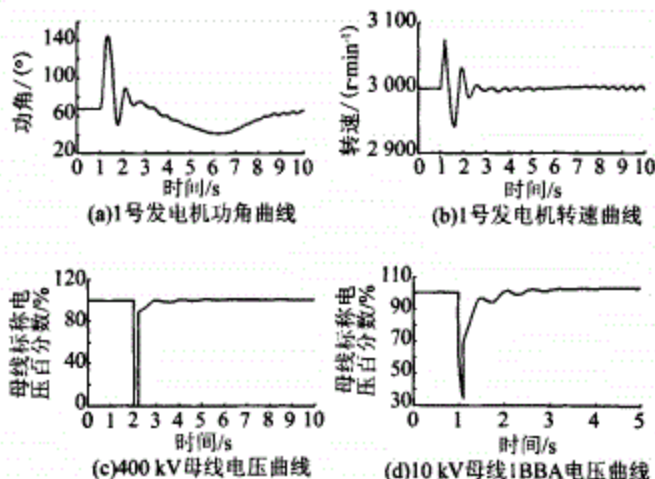


图4 400 kV 母线故障时功角、转速、电压曲线

Fig. 4 Curves of power angle, speed and voltage for 400 kV fault bus

受400 kV 母线故障的影响,故障点之外的400 kV 电压会瞬间降低为0,直至故障被切除。当故障在一定时间内被切除后,母线电压会很快恢复正常,发电机的功角也会趋于稳定,并恢复正常。但是,故障切除时间并不是可以无限延长的,当400 kV 母线发生三相故障时间过长,发电机功角将大于 $180^\circ$ ,从而失去稳定必须停机。这个故障的允许时间与发电机以及汽轮机的自身特性有关。从本工程的设定参数来看,在汽轮机调速器不参与的情况下,400 kV 三相故障超过180 ms 将导致发电机功角超过 $180^\circ$ ,并最终失去稳定<sup>[8]</sup>。

在调速器以及励磁调节共同作用下,发生故障时,励磁电压和电流将会降低使发电机出力减小,调速器也会控制汽轮机转速和输入功率<sup>[9]</sup>。但是在整个故障过程中,本机组的发电机转速将无法稳定在3 000 r/min。图5是故障时间为2 s时发电机的相对功角和转速曲线。

从图5可见,当400 kV 母线发生三相故障时,发电机转速趋于升高,但最高不超过3 150 r/min,也就是发电频率不超过52.5 Hz。根据汽轮发电机组的超速能力,在52~53 Hz 时可以累积运行1 min,每次不超过10 s<sup>[34]</sup>。所以,当高压母线发生短路故障,即使保护动作时间较长,发电机在控制系统的干预下也不会强迫停机,但缩短故障切除时间对于机组寿命还是很有好处的。

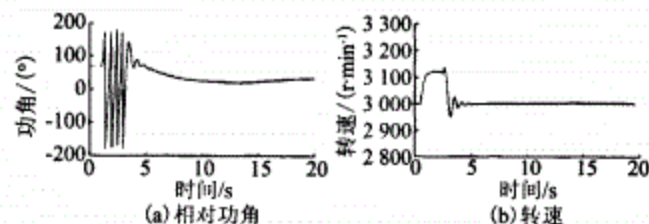


图5 1号发电机相对功角和转速曲线(故障时间2 s)

Fig. 5 Relative power angle and speed curves for unit 1 generator (fault duration 2 s)

### 3.3 10 kV 母线故障并清除

10 kV 母线1BBA或接于1BBA的某回路发生三相故障,并在0.2 s之内切除。图6(a)表示此时1BBA母线的电压曲线。对于这种故障,更应关注的是它对于其他10 kV 母线的电压影响。图6(b)和(c)表示1BBB和2BBA母线的电压曲线,图6(d)则是2台发电机的功角曲线。

母线1BBA的故障,将会导致1BBB母线产生一个大约13%的电压降,并随着故障的切除而恢复。该故障还会影响到2号机的厂用电系统,但是影响较小,只有大概2%的电压波动。根据发电机的功角曲线可以看出,系统将在故障切除后趋于稳定。

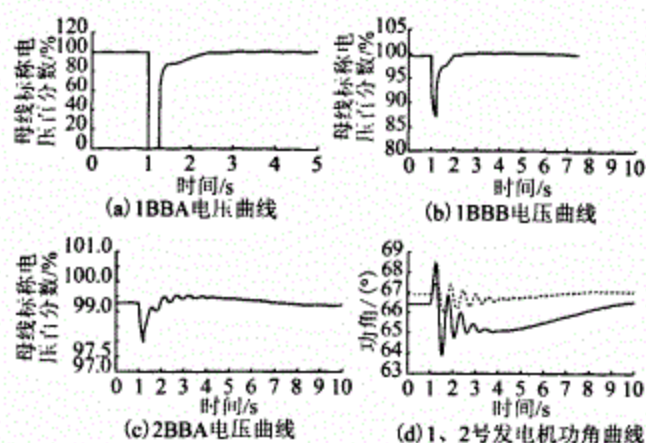


图6 10 kV 母线1BBA故障时电压和发电机功角曲线

Fig. 6 Voltage and power angle curves of generator for 10 kV 1BBA fault bus

从这个案例中可以看出,尽管发电厂的不同单元机组之间的电气联系只有400 kV母线,但是受1号机的10 kV母线故障影响,发电机的运行状态依然会发生改变,主要体现在发电机的电流受励磁系统的控制影响会发生暂时的波动,其电流有效值会在瞬间升高大约13.6%。因此其他机组的厂用电仍会受到1号机故障的干扰。

当一个三相短路故障发生并切除之后,本段母线上的其他电动机会受到怎样的影响,这同样是值得关注的问题。现对故障母线段上的电动给水泵的状态进行研究。通过图7可以看出,电流曲线上存在3个尖峰。在故障发生的时刻(1 s),电动机在短路瞬间提供了大约5倍的短路反馈电流,这一数值取决于电动机的堵转电流倍数。然后这一反馈电流在故障期内快速衰减,衰减速度和电动机的负载转矩相关。1.2 s故障切除后,电动机恢复了供电,由于转子作用于定子的反电势依然较小,所以形成了第2个电流峰值,大约为额定电流的3倍。此时,负载制动转矩依然大于电磁转矩,电动机仍然在继续减速,转差率还在提高。但是受定子电流增加的影响,转子感应电势也相应增加,引起了电流的第二次衰减<sup>[10]</sup>。电磁转

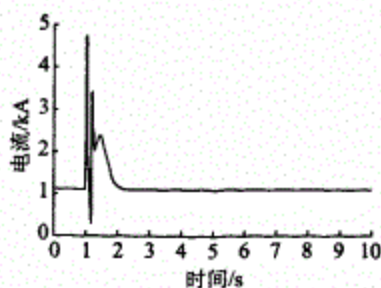


图7 电动给水泵电流曲线

Fig. 7 Current curve of feed water pump

矩逐步增加,直到电动机的电磁转矩大于负载的制动转矩以后,也就是第2个电流峰值右侧的最小值位置,电动机转速降到最低值,转差率开始减小,电动机转速开始提高,开始进入正常的电动机启动状态形成第3个电流峰值。整个过程大约持续了1.5 s。

### 3.4 0.4 kV 母线故障并切除

在这个案例中,0.4 kV 母线(1号汽机PC)发生三相故障并切除。图8为此10 kV 母线1BBA的电压曲线。0.4 kV 母线的故障,将会对上级母线(10 kV 1BBA)的电压产生影响,造成一个5%以内的电压波动,并随着故障的切除而恢复正常。

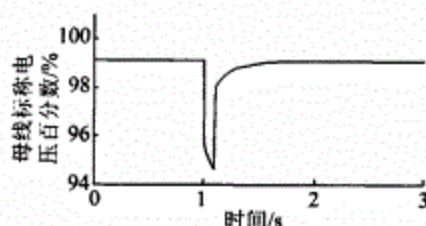


图8 10 kV 母线1BBA电压曲线(0.4 kV 母线故障)

Fig. 8 Voltage curve of 10 kV bus 1BBA (0.4 kV fault bus)

### 3.5 大功率电动机启动

在这个案例中,功率最大的一台电动机(电动给水泵电动机)满载启动,启动过程对本段母线的电压影响和对母线1BBB的影响见图9。

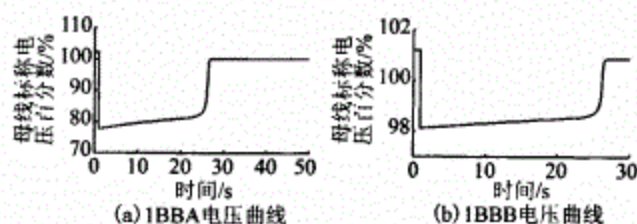


图9 电动给水泵启动时10 kV 母线电压曲线

Fig. 9 Voltage curve of 10 kV bus when feed water pump starts up

从图9可以看出,母线的最低电压出现在电动机启动的一瞬间。电动机的全部启动时间大约为25 s。受1BBA段母线上电动泵启动影响,母线1BBB的电压将存在一个大约3%的下降,时间与电动机启动时间一致。

### 3.6 大功率电动机切除及再启动

功率最大的一台电动机(电动给水泵电动机)退出及再启动,此时其母线电压的曲线见图10。这种工况主要是模拟电动给水泵备用泵进行切换时对厂用电的影响。这个过程的电压曲线与电动机启动的电压曲线相似,母线电压在电动泵退出运行时将有一个提高,



随后进入一个电动机启动的过程。受此过程影响, 0.4 kV 母线将具有一个与 10 kV 相似的电压曲线。

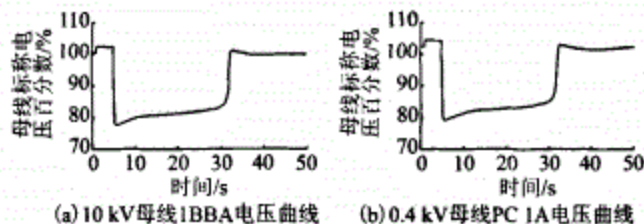


图 10 电动给水泵切换时 10 kV 和 0.4 kV 母线电压曲线  
Fig. 10 Voltage curves of 10 kV and 0.4 kV bus when feed water pump transfers

### 3.7 快切动作

这种工况下, 母线 1BBA、1BBB 以及 1BCA 的工作电源将断开, 同时投入备用电源。以上动作将在快切指令下同时进行(即快切的同时切换功能)。图 11 表示此时 1BBA 的电压曲线。快切动作时间为 70 ~ 100 ms, 厂用 10 kV 段的短时电压降大概 10%, 对于公用段而言, 由于 2 台公用变压器互为备用, 快速切换将使 2 段公用段母线由 1 台公用变来供电。

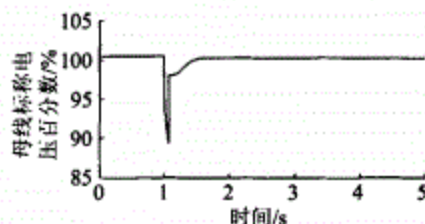


图 11 10 kV 母线 1BBA 电压曲线(快切)  
Fig. 11 Voltage curve of 10 kV bus 1BBA (fast transfer)

由于母线 1BBA 在快切动作中会有短时的失电, 因此本段母线上的电动机在快切结束后, 会有一个再加速过程。从电动泵 1A 的电流曲线(图 12)来看, 再

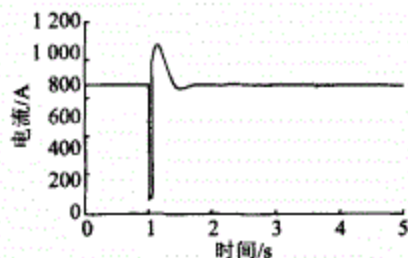


图 12 电动给水泵 1A 电流曲线(快切)  
Fig. 12 Current curve of feed water pump 1A (fast transfer)

加速电流大约为额定电流的 1.5 倍。这也证明了在进行母线电压校验计算时, 电动机启动电流倍数在快切状态下取 2.5 倍是合理的, 并且是有裕度的。

## 4 结 语

通过仿真, 可对发电厂电气系统在各种事件下的暂态过程有一个直观的概念。随着我国发电机组容量及等级的快速提升, 规程和规范跟不上发展速度, 因此在进行设计时往往没有可参考的机型以及适用的设计规定。在这种情况下, 很多设想和设计都能够通过暂态分析的仿真计算进行验证并得到支持。发电厂电气系统的暂态分析对于提高设计水平、提高系统的可靠性及精确性有很大的帮助, 值得深入研究。

## 5 参考文献

- [1] 东北电力设计院. Design description of electrical for mmamabula energy project power station[R]. 长春: 东北电力设计院, 2009.
- [2] MEPPS 2×660 MW 超临界空冷机组发电机技术协议[R]. 上海: 上海电气集团, 2009.
- [3] MEPPS 2×660 MW 超临界空冷机组汽轮机技术协议[R]. 上海: 上海电气集团, 2009.
- [4] IEEE 1110—2002 Guide for synchronous generator modeling practices and applications in power system stability analyses[S]. New York, US: IEEE, 2002.
- [5] IEEE 421.5—2005 Recommended practice for excitation system models for power system stability studies[S]. New York, US: IEEE, 2005.
- [6] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [7] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [8] 赵军友. 电机学[M]. 北京: 水利电力出版社, 2009.
- [9] DL 5000—2000 火力发电厂设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [10] DL/T 5153—2002 火力发电厂厂用电设计技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

收稿日期: 2011-10-08 修回日期: 2011-12-26

作者简介:

钱序(1978), 男, 工程师, 从事火力发电厂电气系统设计及工程管理工作, E-mail: qianxu@nepdi.net;

万里宁(1975), 男, 高级工程师, 从事火力发电厂电气系统设计及项目管理工作, E-mail: wanlining@nepdi.net;

杨华(1979), 女, 讲师, 从事电气自动化的教学和研究工作。

(编辑: 杨大浩)