

## 动态负荷模型比例对电网稳定性影响分析

张鹏飞<sup>1</sup>, 罗承廉<sup>1</sup>, 孟远景<sup>1</sup>, 鄢安河<sup>1</sup>, 张毅明<sup>1</sup>, 付红军<sup>1</sup>, 张永斌<sup>1</sup>, 张景超<sup>2</sup>, 李奎<sup>2</sup>

(1 河南省电力公司, 河南 郑州 450052; 2 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 综合负荷模型对电力系统的暂态稳定性具有复杂的影响。以河南电网为例, 采用暂态安全定量分析软件 FASTEST 计算了不同动态负荷模型比例时的暂态功角稳定裕度和临界切除时间。仿真计算表明动态负荷模型比例的调整会引起电网失稳模式的变化, 且在不同失稳模式下, 其对电网稳定性的影响不同。因此不应脱离具体情况泛论动态负荷模型对稳定性的影响。

**关键词:** 负荷模型; 感应电动机; 功角稳定性; 稳定裕度; 临界切除时间

**中图分类号:** TM712

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2006) 11-0024-03

### 0 引言

电力系统负荷的数学模型是指负荷功率与电压和频率之间的关系特性, 对电力系统暂态稳定仿真分析的结果有重要影响。目前, 感应电动机和恒阻抗并联的综合负荷模型被我国部分大区电网所采用。恒阻抗模型作为静态负荷模型在暂态过程中电压、频率特性较为明确。动态负荷部分——感应电动机的动态特性却相对复杂<sup>[1]</sup>。尽管电动机模型的各个参数都对系统稳定性有着或大或小的影响<sup>[2]</sup>, 但是对于确定的电动机负荷模型, 当其在负荷中所占比例较大时, 其影响必然较大。因此, 在负荷特性研究和负荷建模中, 动态负荷的比例都是重点研究的因素之一<sup>[3]</sup>。本文以河南电网为例, 在对各供电区负荷特性初步调查的基础上选取了负荷组成较为典型的部分供电地区, 采用暂态安全定量分析软件 FASTEST<sup>[4]</sup>分析在各变电站施加扰动时, 负荷模型中感应电动机负荷比例调整对电网稳定性的影响。

### 1 河南电网负荷及负荷模型基本特性

#### 1.1 河南电网基本负荷特性

河南电网现以 220 kV 网络为主网架, 500 kV 输电网初具规模。以三回 500 kV 交流线路与华中电网, 单回 500 kV 交流线路与华北电网同步互联运行。2005 年夏季最高负荷约 17 GW。截至 2005 年底, 装机容量将达到 20 GW。

河南电网共有 220 kV 变电站 90 余座, 主要的电力负荷为: 民用; 采矿; 铝厂; 化工厂; 城镇工业; 农业; 小电厂; 电气化铁路等。220 kV 变电站的负荷

中上述负荷所占的比重不同, 其综合动态特性也会不同。但是, 分别建立准确描述各变电站负荷特性的模型还存在一定困难, 因此在目前仿真计算中还采取全网统一的负荷模型。根据调研分析, 选取了 20 个变电站分析负荷模型对稳定性的影响, 以期为今后的负荷建模工作提供依据。

#### 1.2 负荷模型选择

在目前的稳定计算中, 河南电网采用感应电动机模型和恒阻抗并联的负荷模型。其中, 用户负荷节点采用 50% 电动机加 50% 恒阻抗模型, 发电厂厂用电采用 65% 电动机加 35% 恒阻抗模型。动态负荷模型选取综合稳定程序 I 型马达模型, 考虑了转子回路电磁暂态过程和转子机械运动暂态过程<sup>[5]</sup>。描述其机电暂态过程的微分方程为:

$$\begin{cases} T_j \frac{ds}{dt} = M_m - M_e \\ T_{d0}' \frac{dE'}{dt} = -E' - jK_z(X - X') - jT_{d0}' E' s 2\pi f_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $s$  为滑差;  $E'$  为暂态电势;  $f_0$  为频率;  $T_{d0}'$  为定子开路转子回路时间常数;  $K_z$  为等值电路中将机组本身基值阻抗转化为系统基值阻抗的系数。  $X$  和  $X'$  可由表 1 参数计算得到。

等值电路和参数如图 1 和表 1 所示。

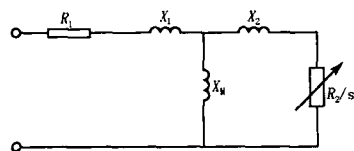


图 1 I 型感应电动机模型等值电路

Fig 1 Equivalent circuit of induction motor model I

表 1 I型感应电动机模型参数

Tab 1 Parameters of induction motor model I

| 马达负荷比例 / (%) | $R_1$ | $X_1$ | $X_M$ | $R_2$ | $X_2$ | $T_j$ |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 50 或 65      | 0     | 0.295 | 3.5   | 0.02  | 0.12  | 2.0   |

$R_1$  为定子电阻;  $X_1$  为配网等值电抗和定子漏抗之和;  $X_M$  为励磁电抗;  $R_2$  和  $X_2$  为转子电阻和漏抗;  $T_j$  为转子惯性时间常数。

## 2 实例分析

### 2.1 计算结果

针对 2005 年夏季华中电网和华北电网解网运行方式进行数值仿真。施加的扰动为母线三相永久短路故障, 0.1 s 跳开所有出线切除故障。河南电网负荷模型中电动机比例变化范围为 10% ~ 90%, 以 10% 为一档, 共划分为 9 档。

仿真计算结果表明河南电网具有良好的功角稳定性, 在上述故障下电网稳定裕度较大, 且随电动机模型比例的调整变化不大, 部分计算结果如图 2 所示。

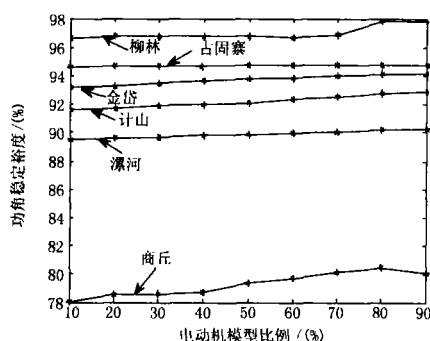


图 2 采用不同电动机模型比例时的功角稳定裕度

Fig 2 Angle stability margin under different proportion of motor model

利用暂态安全定量分析软件 FASTEST 计算采用不同负荷模型时的暂态功角稳定 CCT, 部分结果如图 3 所示。总体上, 在极限条件下功角稳定性随电动机模型比例的提高而降低。按照故障点在不同变电站时所表现出的特性可以分为两类: (1) 在电动机模型比例较小时, 功角稳定性变化不大, 当达到 40% ~ 60% 的比例时, 功角稳定性持续下降, 如古固寨、金岱、计山等; (2) 功角稳定性随电动机模型比例的提高持续下降, 如漯河、柳林、商丘等。

### 2.2 计算结果分析

负荷对暂态功角稳定性的影响主要体现在对机组加速功率的影响。根据 EEAC 理论<sup>[6]</sup>, 受扰多机系统的稳定性可以归结为该特定扰动下的两个互补

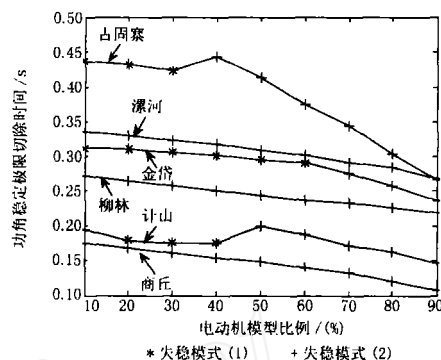


图 3 采用不同电动机比例时的 CCT

Fig 3 CCT under different proportion of motor model

机组子集间的相对运动。如果一种因素趋于增加临界群的加速功率, 则不利于减小两群间的相对加速度, 将使系统稳定裕度降低。在暂态过程中, 负荷母线电压降低。恒阻抗负荷吸收的功率与电压平方成正比, 在暂态过程中其吸收的功率迅速减少。忽略电磁暂态过程时, 感应电动机的电磁转矩与电压的平方和转差都有关系<sup>[7]</sup>。两者吸收的功率孰多孰少需根据具体的暂态过程确定。但是, 在经历低电压时, 电动机必然趋于减速, 在此过程中其电流和无功功率剧增<sup>[8]</sup>。故障点附近电压跌落较为严重, 附近机组受电动机无功负荷增大的影响, 机端电压跌落严重而且恢复较慢。这造成机组加速功率增加, 同步力矩降低。

在稳定裕度计算中, 快速切除故障使得故障点附近母线电压跌落较小, 且恢复较快, 所以负荷功率变化不大, 对稳定性影响较小。

在 CCT 计算中系统临界失稳, 因此电压跌落严重, 负荷功率变化较大, 对稳定性影响增大。计算中的临界模式有两种: (1) 川渝机组为临界群, 2 摆失稳, 如图 3 中表示为“\*”的算例。典型的临界失稳算例如图 4 所示。(2) 河南机组或故障点附近机组为临界群, 首摆失稳, 如图 3 中表示为“+”的算例。典型的临界失稳算例如图 5 所示。

对于失稳模式 (1), 由于负荷模型的改变只影响了占余下群总容量约 30% 的河南机组的加速功率, 且在第二摆中, 余下群电压的恢复使电动机的运行趋于正常, 因此系统稳定性随电动机比例的增加改变不大。失稳模式 (2) 中, 河南机组或故障点附近的河南机组构成临界群, 其加速功率受电动机模型的影响较大, 因而随电动机模型负荷比例的增加, 系统稳定性迅速降低。

在古固寨、金岱、计山等站施加扰动, 当电动机

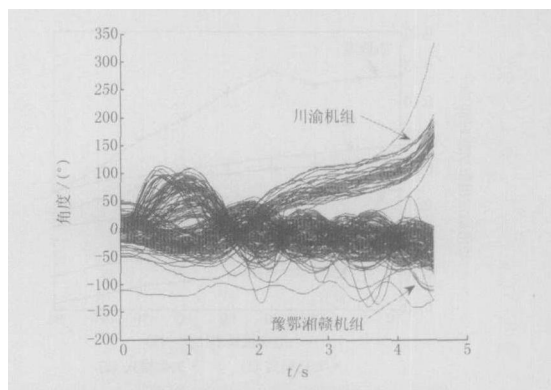


图 4 失稳模式 (1): 川渝机组 2 摆失稳

Fig 4 Unstable mode (1): Chuan-Yu generators stability loss in second swing

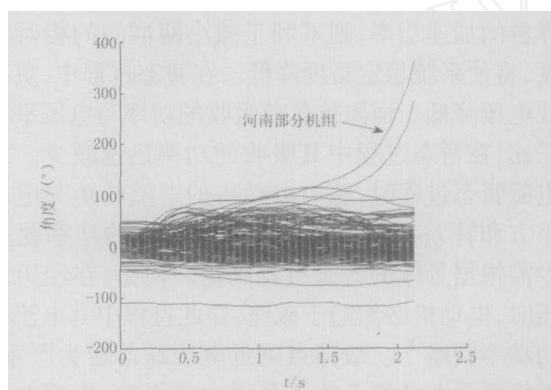


图 5 失稳模式 (2): 故障点附近机组首摆失稳

Fig 5 Unstable mode (2): generators stability loss nearby fault location in first swing

比例小于 40% ~ 60% 时, 临界失稳模式为模式 (1)。随电动机比例增加, 临界失稳模式转变为模式 (2)。在漯河、柳林、商丘等站施加扰动, 则失稳模式始终维持为模式 (2)。因此, 随电动机模型比例增加, 其功角稳定性会表现出不同的特性。

### 3 结论

电动机和恒阻抗并联的负荷模型是常用的机理负荷模型。随着电力市场和区域电网互联的发展, 电网运行必将趋于其稳定极限, 电动机负荷模型比例的变化对系统稳定性的影响也更明显。本文的仿真分析表明, 电动机负荷比例的调整过程会引起失稳模式的变化, 而在不同的失稳模式下, 稳定性变化趋势也有所差异。因此不应抛开具体的失稳模式而泛论电动机负荷模型比例的提高是否降低系统稳定性。各负荷点电动机负荷的比例是由其负荷结构、负荷类型等因素客观决定的, 因此应当在深入分析的基础上, 开展负荷特性研究和负荷建模工作, 建立

适用于电网实际的负荷模型。

### 参考文献:

- [1] Kunder P. 电力系统稳定与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.  
Kunder P. Power System Stability and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 陈凤, 李欣然, 陈辉华, 等. 电动机模型结构及参数对暂态稳定仿真的影响 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (8): 29-33.  
CHEN Feng, LI Xin-ran, CHEN Hui-hua, et al. Effect of Induction Motor Model Structure and Parameters on Simulating Computation of Electric Power System Transient Stability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (8): 29-33.
- [3] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与实践 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (19): 1-7.  
JU Ping. Theory and Practice of Load Modeling in Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (19): 1-7.
- [4] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST [J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (9): 25-30.  
XUE Yu-sheng. EEAC and FASTEST [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (9): 25-30.
- [5] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序基础数据库用户手册 [Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.  
Electric Power Research Institute. PSASP Common Database User's Manual [Z]. Beijing: Electric Power Research Institute, 2001.
- [6] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.  
XUE Yu-sheng. Quantitative Study of General Motion Stability and an Example on Power System Stability [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1999.
- [7] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. Modern Power System Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [8] 马大强. 电力系统机电暂态过程 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.  
MA Da-qiang. Power System Electromechanical Transient Process [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1988.

(下转第 48 页 continued on page 48)

得到实际应用,证明了该方法的有效性和实用性。

#### 参考文献:

- [1] 杨冠城. 电力系统自动装置原理 [M]. 北京:水利电力出版社, 1995.  
YANG Guan-cheng Theory of Automatic Devices in Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [2] 孔艳, 袁启海, 薛巍, 等. DTS中基于用户自定义的自动装置模拟 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22 (6): 37-38, 45.  
KONG Yan, YUAN Qi-hai, XUE Wei, et al User Defined Automation Devices Simulation in DTS [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22 (6): 37-38, 45.
- [3] 吴文传, 孙宏斌, 张伯明, 等. 新一代 EMS/DTS一体化系统中基于自定义建模的自动装置模拟 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (4): 57-60.

WU Wen-chuan, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al Simulation of Automatic Device Based on User-defined Model in Integrated EMS/DTS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (4): 57-60.

- [4] PAN Zhe-long, SUN Hong-bing, WU Wen-chuan, et al A New Approach to Customize Secondary Device Models in a Dispatcher Training Simulator (DTS) [J]. International Conference on Power System Technology, 2002: 616-620.

收稿日期: 2005-10-20

#### 作者简介:

杨 峰 (1974 - ), 男, 硕士, 讲师, 从事电力系统计算与仿真, 电网调度自动化研究; E-mail: yf2000@sina.com

王 乘 (1956 - ), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事大系统仿真, 三维动态仿真研究。

### Generic algorithm research for simulation of automatic device in DTS

YANG Feng, WANG Cheng

(College of Hydroelectric and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Traditional method for simulation of automatic device action is hard to extend and it is difficult to maintain simulation program. From the construction principle of automatic device, a generic algorithm is presented in this paper. This method uses layer model and separates automatic device into condition unit, reason unit and action unit to implement simulation process. The practice in two DTS shows that this method is flexible and adaptable.

**Key words:** dispatcher training simulator (DTS); automatic device; simulation

(上接第 26 页 continued from page 26)

收稿日期: 2005-11-22

#### 作者简介:

张鹏飞 (1978 - ), 男, 博士, 研究方向为电力系统运行

与分析控制; E-mail: zhangpf@126.com

罗承廉 (1945 - ), 男, 教授级高级工程师, 从事电网技术和管理的工作;

孟远景 (1957 - ), 女, 教授级高级工程师, 副总工程师, 从事电网技术、电力系统调度、生产的研究和管理的工作。

### Impact of dynamic electric load model proportion on power system stability

ZHANG Peng-fei<sup>1</sup>, LUO Cheng-lian<sup>1</sup>, MENG Yuan-jing<sup>1</sup>, YAN An-he<sup>1</sup>, ZHANG Yi-ming<sup>1</sup>,

FU Hong-jun<sup>1</sup>, ZHANG Yong-bin<sup>1</sup>, ZHANG Jing-chao<sup>2</sup>, LI Ku<sup>2</sup>

(1. State Power Corporation of Henan Province, Zhengzhou 450052, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The composite electric load model has complex impact on power system transient stability. The transient angle stability margin and critical clearing time are computed by FASTEST under different proportion of dynamic electric load model using in Henan Power Grid. The results show the change of proportions of dynamic electric load model results in conversion of unstable modes. In the two modes, the proportion has different impacts on the transient stability, so such analysis should be confined to specific conditions.

**Key words:** load model; induction motor; angle stability; stability margin; critical clearing time