

# 负荷模型对系统暂态稳定计算的影响

张明理<sup>1</sup>, 王天<sup>1</sup>, 唐果<sup>2</sup>, 赵瑞<sup>3</sup>, 赵东成<sup>4</sup>

(1. 东北电力科学研究院有限公司, 辽宁省沈阳市 110006; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁省沈阳市 110004; 3. 北京电力设计院, 北京市宣武区 100055; 4. 河北省电力勘测设计研究院, 河北省石家庄市 050031)

## Effect of Load Model on Transient Stabilization Calculation

ZHANG Ming-li<sup>1</sup>, WANG Tian<sup>1</sup>, TANG Guo<sup>2</sup>, ZHAO Rui<sup>3</sup>, ZHAO Dong-cheng<sup>4</sup>

(1. Northeast Electric Power Research Institute Company Limited, Shenyang 110006, Liaoning Province, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning Province, China; 3. Beijing Electric Power Design Institute, Xuanwu District, Beijing 100055, China; 4. Hebei Electric Power Design & Research Institute, Shijiazhuang 050031, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** Two mature load models, which are applied in simulation of Northeast Power Grid, are presented. The transient stability characteristics of Northeast Power Grid under the two load models are compared and the reason causing different characteristics is analyzed. Analysis results given in this paper could be available for reference in further cognition of load characteristics of power grid.

**KEY WORDS:** load model; transient stabilization; load characteristic

**摘要:** 文中介绍了两种比较成熟的负荷模型, 并将两种负荷模型分别应用到东北电网仿真计算当中, 比较了两种负荷模型下系统的暂态稳定特性, 并分析了特性不同的原因。文中的分析结果可为进一步认识电网负荷特性提供参考依据。

**关键词:** 负荷模型; 暂态稳定; 负荷特性

## 0 引言

负荷模型<sup>[1-8]</sup>是我国乃至国际电力行业期待研究和解决的重要问题。有关专家对 1996 年 8 月 10 日北美西部发生的重大停电事故过程进行的仿真已经证明不同负荷模型对事故重现结果的影响不容忽视。

电力元件的数学模型及其参数对电力系统数值仿真计算具有非常大的影响。模型和参数的合理选择直接影响到数值仿真结果的准确性乃至正确性。目前发电机组和输电网络的模型较为成熟, 多数参数也已经实测, 而负荷模型和参数相比则显得较为简单和粗糙。

本文将以东电网为例, 将两种成熟的负荷模型分别应用到实际计算中, 分析这两种不同的负荷模型对电力系统暂态稳定计算结果的影响, 着重比较采用两种负荷模型进行电力系统计算时电网的动态响应特性<sup>[9-14]</sup>, 研究两者结论之间的差异, 并通过实际计算结果分析产生差异的内在原因。

## 1 两种负荷模型的介绍

**负荷模型 1:** 采用 50%恒阻抗和 50%的感应电动机负荷, 国内大部分区域电网在仿真计算中均采用此模型。感应电动机的等值电路如图 1 所示。

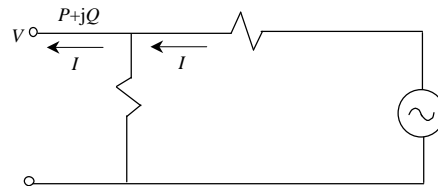


图 1 感应电动机等值电路

Fig. 1 Equivalence circuit of induction-motor

**负荷模型 2:** 该负荷模型及其参数是根据东北电网先后两次大扰动试验的实测数据拟合得到的一种配电网综合负荷模型。该模型等值结构为: 理想变压器将 220kV 母线与 110kV 母线相连, 110kV 母线又通过配电网阻抗与一个并联结构相连, 其中并联结构包括等值电动机、等值静态负荷、配网无功补偿和等值发电机 4 个部分。图 2 为配电网综合模型等值电路。

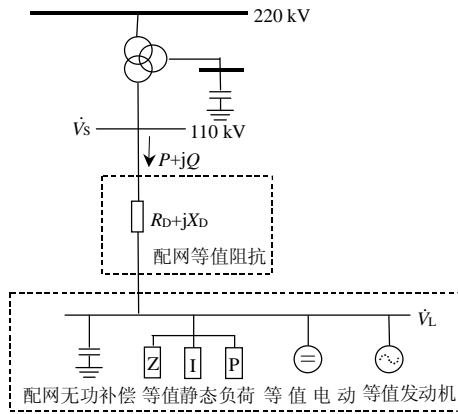


图 2 配电网综合负荷模型的等值电路  
Fig. 2 Equivalence circuit of load model

## 2 两种负荷模型下的系统动态特性分析

### 2.1 Prony 分析方法简介

Prony 分析法<sup>[15-16]</sup>是通过分析信号获取系统模态的一种方法，可以通过给定输入信号下的响应直接估计系统的振荡频率、阻尼、幅值和相对相位。近年来该算法已初步用于研究电力系统的一些问题，在系统振荡实测数据分析和暂态数据的模型估计中显示了良好的应用前景。

本文将应用 Prony 分析方法，对两种负荷模型下的暂态稳定功角曲线进行定量分析，得出故障方式下功角摇摆曲线的阻尼和振幅。

### 2.2 两种负荷模型下的系统阻尼特性分析

仿真计算模型为东北电网独立运行，考虑两种潮流方式 A、B 满足条件为：

(1) 潮流方式 A 下各条 500kV 线路潮流小于潮流方式 B 下各条 500kV 线路。

(2) 潮流方式 A 下两种负荷模型所有 500 kV 线路发生三相短路故障，系统均保持稳定。潮流方式 B 下负荷模型 1 中的梨树一沙岭线路三相短路故障，系统失去稳定，而其它线路三相短路故障系统稳定。

图 3 给出了东北电网 500kV 网架结构图。图 4 给出了潮流方式 A 下，分别采用两种负荷模型，梨树一沙岭线路靠近沙岭侧三相短路故障，伊敏厂相对元宝山厂功角变化曲线。采用负荷模型 1 时功角曲线的摆动幅值比采用负荷模型 2 时要小，但差别不大。而比较 2 组功角曲线的阻尼特性，采用负荷模型 2 时的阻尼明显大于采用负荷模型 1 时的阻尼。

图 5 给出了潮流方式 B 下，分别采用两种负荷模型，梨树一沙岭线路靠近沙岭侧三相短路故障，伊敏厂相对元宝山厂功角变化曲线。

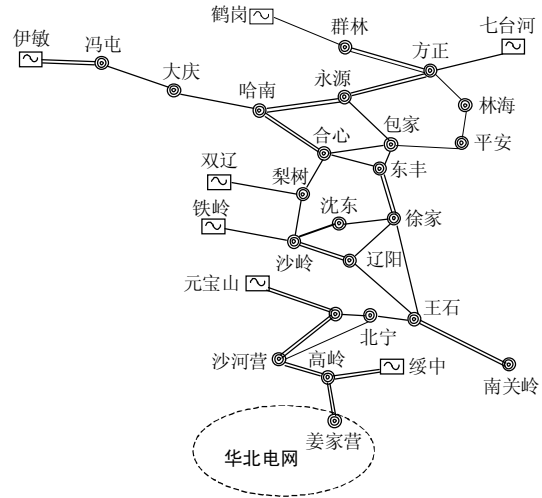


图 3 东北电网 500 kV 网架结构  
Fig. 3 500 kV structure of Northeast Grid

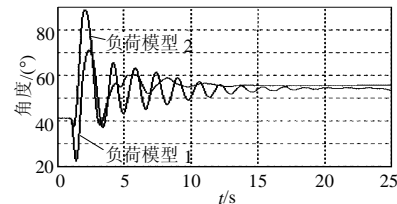


图 4 基于潮流 A 功角曲线  
Fig. 4 Angle curve based on load flow A

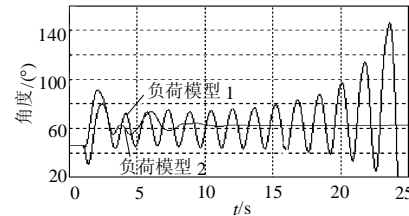


图 5 基于潮流 B 功角曲线  
Fig. 5 Angle curve based on load flow B

由图 5 可知，潮流方式 B 下梨树一沙岭线路故障时，负荷模型 1 时的计算结果显示系统失稳，而负荷模型 2 的计算结果显示系统稳定。比较图中的功角曲线可知，两组摇摆曲线的阻尼明显存在较大差异。采用负荷模型 2 使系统获得了良好的阻尼特性，因而计算结果是稳定的。相反采用负荷模型 1 系统的阻尼特性较差，计算结果不稳定。

采用 Prony 分析方法，对电网故障下功角摆动曲线进行分析，可以得出故障方式下功角摇摆曲线的阻尼比和摆幅，表 1 给出了分析结果。

表 1 中，绝大多数故障下负荷模型 2 的功角曲线的摆幅比负荷模型 1 高，而对于功角曲线的阻尼特性而言，负荷模型 2 明显优于负荷模型 1，即负荷模型 2 下系统的阻尼比负荷模型 1 大，前者的阻尼比约为后者的 2.5 倍。

表 1 功角曲线的阻尼特性和摆幅(方式 A)

Tab. 1 Damp characteristic angel curve and swing (mode A)

| 故障线路  | 阻尼比    |         | 摆幅/(°) |        |
|-------|--------|---------|--------|--------|
|       | 模型 1   | 模型 2    | 模型 1   | 模型 2   |
| 徐家—辽阳 | 0.0716 | 0.192   | 11.7   | 12.6   |
| 辽阳—沙岭 | 0.0702 | 0.213   | 18.4   | 20.6   |
| 梨树—合心 | 0.114  | 0.21    | 4.3    | 20     |
| 包家—合心 | 0.0768 | 0.157   | 14.4   | 14.5   |
| 哈南—合心 | 0.0414 | 0.165   | 25.5   | 29.6   |
| 永源—包家 | 0.0427 | 0.171   | 25     | 25.4   |
| 哈南—永源 | 0.0588 | 0.159   | 40     | 35.3   |
| 方正—永源 | 0.0565 | 0.159   | 24.9   | 13.8   |
| 平均值   | 0.0665 | 0.17825 | 20.525 | 21.475 |

### 3 故障过程中电网的注入功率分析

研究故障过程中电网的注入功率,也就是研究从故障发生到故障切除这一时间段内(即 0.1 s 左右),全网各台机组的加速功率(见表 2),即

$$\Delta P = \text{原动机输入功率} - \text{发电机输出的电功率}$$

表 2 两种负荷模型在 0.1 s 时刻切除故障的机组加速功率比较

Tab. 2 Accelerating power comparison of two models under  $t=0.1s$  fault clearance

| 机组名称   | 故障位置      |       |           |       |
|--------|-----------|-------|-----------|-------|
|        | 徐家—王石线/MW |       | 合心—哈南线/MW |       |
|        | 模型 1      | 模型 2  | 模型 1      | 模型 2  |
| 伊敏 1 号 | 6.52      | 3.41  | 22.8      | 16.96 |
| 鹤岗 1 号 | 5.67      | 3.15  | 14.8      | 10.01 |
| 哈三 3 号 | 11.83     | 6.4   | 33.02     | 23.36 |
| 长二 1 号 | 4.55      | 1.96  | 2.0       | -0.23 |
| 双辽 1 号 | 7.75      | 4.59  | 7.02      | 4.13  |
| 白山 1 号 | 12.13     | 9.33  | 3.99      | 2.24  |
| 东方 1 号 | 10.04     | 4.40  | 0.04      | -1.07 |
| 朝阳 1 号 | 10.04     | 4.4   | 0.04      | -1.07 |
| 元宝 2 号 | 2.84      | 0.07  | -0.08     | -0.39 |
| 阜新 5 号 | 16.28     | 6.79  | -0.4      | -1.94 |
| 营口 1 号 | 3.43      | 0.20  | -0.09     | -0.47 |
| 总加速功率  | 91.1      | 44.78 | 83.24     | 51.56 |

由表 2 可知,分别采用负荷模型 1 和负荷模型 2 时电网在故障过程中的注入功率有如下特点:

(1) 负荷模型 1 和 2 都体现了故障分别位于电网送、受端时的不同特点。即:当故障发生于送端电网时,由于功率送不出去而导致受端电网电力不足,所以全网机组在故障没有切除前呈现出送端机组加速而受端机组减速的特点;当故障发生于受端电网时,全网机组在故障没有切除前均呈现出加速的特点。显然负荷模型 2 将这一特点表现得更为突出。

(2) 负荷模型 2 下,故障过程中电网的注入功率(发电机的加速功率)要小于负荷模型 1 下的注

入功率,前者为后者的 1/2 左右。

### 4 故障过程中电压的动态变化过程

本文以一个实例来说明两种负荷模型下电网动态电压的变化特点。潮流方式 A 下 500 kV 徐家—辽阳线路徐家变侧三相短路故障跳闸时,两种负荷模型下电网母线电压的动态变化过程。比较如下两种情况下的电压变化曲线(图 6、7):

**情况 1:** 同一潮流同一故障方式下,两种负荷模型在故障临界切除时间下系统所表现出的动态电压变化特点。负荷模型 1 在系统故障后 0.14 s 切除故障,系统临界失稳;负荷模型 2 在系统故障后 0.27 s 切除故障,系统临界失稳。

**情况 2:** 同一潮流同一故障方式下,两种负荷模型在同一故障切除时间下系统所表现的动态电压变化特点。负荷模型 1 在系统故障后 0.28 s 切除故障,系统功角失去稳定;负荷模型 2 同样在系统故障后 0.28 s 切除故障,系统功角失去稳定。

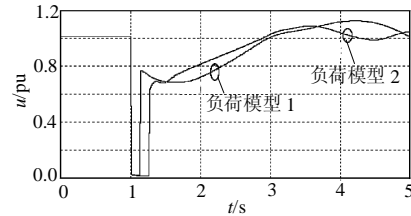


图 6 情况 1 徐家母线电压

Fig. 6 Xujia bus voltage of instance 1

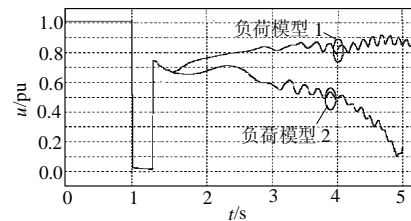


图 7 情况 2 徐家母线电压

Fig. 7 Xujia bus voltage of instance 2

从图 6、7 可知,负荷模型 2 下电网的电压动态特性与负荷模型 1 相比有如下特点:

(1) 当电网发生故障的瞬间,负荷模型 2 下的故障临界切除时间大于负荷模型 1,这说明负荷模型 2 下系统的电压支撑能力要明显优于负荷模型 1。这与负荷模型 2 下电网的注入功率小于负荷模型 1 下的注入功率结论相符。

(2) 如果故障切除后系统仍旧无法维持稳定,负荷模型 2 下的系统电压将迅速跌落,幅度将明显大于负荷模型 1。

(3) 上述两个特点说明, 负荷模型 2 下系统的动态电压特性具有非常强的刚性, 即系统稳定时具有良好的电压支撑能力, 同时系统失去稳定时电压将迅速崩溃。

## 5 结论

(1) 不同负荷模型下, 系统阻尼特性、机组加速功率变化特性和系统电压动态特性的变化将改变电力系统的动态特性这一事实。

(2) 本文通过实例证明了采用负荷模型 2 获得的稳定计算结果具有良好的阻尼特性, 因而稳定分析结果也会比采用负荷模型 1 时乐观。实际仿真计算表明, 采用负荷模型 2 的电网稳定水平明显高于采用负荷模型 1 的稳定水平。

(3) 本文主要针对两种负荷模型应用于东北电网安全稳定计算的一些初步结果进行了研究和分析, 很多问题还有待在实践中得到进一步论证和检验。

## 参考文献

- [1] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] 贺仁睦, 周文. 电力系统负荷模型的综合[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 12-16.  
He Rennu, Zhou Wen. The cluster and synthesis of electric power system load models[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 12-16(in Chinese).
- [3] 张伶俐, 周文, 章健, 等. 面向综合的电力负荷动态建模[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 36-45.  
Zhang Lingli, Zhou Wen, Zhang Jian, et al. The synthesis of dynamic load characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 36-45(in Chinese).
- [4] 黄梅, 贺仁睦. 东北电网负荷模型的综合与应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 85-87.  
Huang Mei, He Renmu. Application of load model classification in northeast power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 85-87(in Chinese).
- [5] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 1-4.  
He Renmu. Research into veracity of power system dynamic simulation[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 1-4(in Chinese).
- [6] 石景海, 贺仁睦. 基于量测的负荷建模—分类算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 78-82.  
Shi Jinghai, He Renmu. Measurement-based load modeling—sorting algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 78-82(in Chinese).
- [7] 王卫国, 贺仁睦. 电力系统负荷模型结构稳定性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(增刊): 28-32.  
Wang Weiguo, He Renmu. Research on power system load model structure stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(add): 28-32(in Chinese).
- [8] 贺仁睦, 王卫国, 蒋德斌, 等. 广东电网动态负荷实测建模及模型有效性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 78-82.  
He Renmu, Wang Weiguo, Jiang Debin, et al. Measurement-based dynamic load modeling and model validation on Guangdong grid Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 78-82(in Chinese).
- [9] 周鲲鹏, 陈允平. 运用轨迹灵敏度的电力系统动态安全控制[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 46-50.  
Zhou Kunpeng, Chen Yunping. Power system dynamic control based on trajectory sensitivity[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 46-50(in Chinese).
- [10] 李颖晖, 张保会. 运用非线性系统理论确定电力系统暂态稳定域的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 24-27.  
Li Yinghui, Zhang Baohui. Application to determine the transient stability boundary using nonlinear theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 24-27(in Chinese).
- [11] 彭志炜, 胡国根, 韩桢祥. 电力系统平衡解流形的追踪与电压失稳分叉点的搜索[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 173-177.  
Peng Zhiwei, Hu Guogen, Han Zhenxiang. Tracing of the power system equilibrium manifold and searching for the instability bifurcation point[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 173-177(in Chinese).
- [12] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.  
Zhou Shuangxi, Jiang Yong, Zhu Lingzhi. Review on steady voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7(in Chinese).
- [13] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 9-11.  
Yin Yonghua, Guo Jianbo, Zhao Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 9-11(in Chinese).
- [14] 刘峰, 辛焕海, 甘德强, 等. 一个基于上界函数的暂态稳定域估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 15-20.  
Liu Feng, Xin Huanhai, Gan Deqiang, et al. Transient stability domain estimation using a bounding function[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 15-20(in Chinese).
- [15] 张贤达. 现代数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [16] 卢晶晶, 郭剑. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-37.  
Lu Jingjing, Guo Jian. Power system oscillation mode analysis and parameters determination of PSS based on Prony method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 31-37(in Chinese).

收稿日期: 2007-04-05.

作者简介:

张明理(1977—), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统计算分析工作, E-mail: zml8139@126.com.

(实习编辑 王晔)