

# 电力系统负荷模型研究综述

张景超<sup>1</sup>, 鄢安河<sup>2</sup>, 张承学<sup>1</sup>, 李奎<sup>2</sup>, 张鹏飞<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 河南电力调度通信中心, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 负荷模型研究的主要目的是为电力系统稳定计算提供精确的负荷模型。采用乐观或保守的负荷模型将会对电网安全或经济运行造成不利影响。随着系统规模的不断扩大和新型用电设备不断出现, 负荷的动态特性也变得越来越复杂。早期的简单负荷模型已经不能满足当前互联电网稳定计算的需要。综述了负荷模型的发展历史、负荷建模的常用方法、常用负荷模型及对系统稳定的影响, 结合最新研究进展, 提出了应该建立区域电网负荷模型动态数据库, 并指出了下一步需要研究解决的问题。

**关键词:** 电力系统; 负荷建模; 动态数据库; 综合负荷模型

## Summary of load model research in power system

ZHANG Jing-chao<sup>1</sup>, YAN An-he<sup>2</sup>, ZHANG Cheng-xue<sup>1</sup>, LI Kui<sup>1</sup>, ZHANG Peng-fei<sup>2</sup>

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Henan Electric Power Dispatching and Communication Center, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The aim of load model research is to provide precise load model for power system stability computation. Optimistic load models will endanger the safe operation of power system and pessimistic ones will degrade its economy. As continue extending of power grids and emerging of new-style facilities, the dynamic characteristics of loads become more and more complicated. The early simple load model can not meet the need of stability computation of present interconnected network. In this paper, the development history of load model and the usual approaches in load modeling are summarized, as well as the influence of load model on the power system stability. Based on the latest research, this paper proposes that load model dynamic database in regional power grid should be established and presents some problems.

**Key words:** power system; load modeling; dynamic database; synthesis load model

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)06-0083-06

## 0 引言

所谓负荷模型, 就是指用于描述母线上输出的总的有功和无功功率随母线电压和频率变化而变化的一组数学关系表达式。建立负荷模型就是要确定描述负荷特性数学方程的形式及其中的参数, 简称为负荷建模<sup>[1~3]</sup>。近年来国内外电力系统接连发生大停电事故, 从事故后的仿真分析中可知, 采用原有的负荷模型不能准确重现事故的全过程。只有修改现有的负荷模型, 才能重现事故的近似情况。为了在电网稳定仿真计算中使用恰当的负荷模型, 反映系统真实运行状况, 确保我国互联电网的安全稳定运行, 必须尽快研究符合电网实际的实用负荷模型和建模方法及相关技术支持平台。

## 1 负荷建模的方法和历程

### 1.1 负荷模型的发展历史

上个世纪五、六十年代以来, 人们逐渐认识到负荷的种类及大小对电力系统的安全稳定运行有重要影响, 负荷建模问题开始引起关注。首先提出了恒阻抗( $Z$ )、恒电流( $I$ )、恒功率( $P$ )等静态负荷模型。接着, 诸如多项式模型、幂函数模型等静态负荷模型也被陆续提出。虽然当时对负荷模型的研究大都建立在定性研究的基础上, 但是由于系统其它的模型也比较粗略, 因此基本能够满足电网计算的需要。进入七十年代, 随着发电机及其调速系统等模型不断发展, 关于负荷模型的研究也提上了议事日程。1976年由美国电科院制定了一项重要的负荷研究计划, 研究工作在美国和加拿大同时展开<sup>[2,4]</sup>。

这次关于负荷模型的研究取得了一定的研究成果,并开发了著名的 LOADSYN 软件。但是并没有定量解决负荷模型参数的计算问题。进入 80 年代以来,负荷模型的研究已经不仅限于静态负荷模型,动态负荷模型已经出现,并出现多种类型,极大地丰富了负荷模型的研究范围。这一时期负荷方面的文章很多,1995 年,IEEE 负荷动态性能研究工作组推荐了关于潮流计算和动态性能仿真的标准负荷模型<sup>[5]</sup>和一篇关于负荷模型研究文章的参考目录<sup>[6]</sup>,总结了这一时期的重要文章。从中我们可以看出这一阶段的研究方向和研究热点。与此同时,负荷模型的重要性逐渐引起我国电力科研工作者的重视,以鞠平、贺仁睦为代表的一批学者开展了这方面的研究工作,并取得了丰硕的研究成果<sup>[2, 7~25]</sup>。从而使人们对负荷模型的认识提高到了一个新的高度。

## 1.2 常用负荷建模方法

迄今为止,建立电网负荷模型主要有两种方法:统计综合法和总体测辨法。统计综合法的基本思想是认为系统负荷是由千千万万个不同类型的用电设备所组成,通过在实验室对典型的用电设备进行试验,可以得到这些典型设备的负荷模型,然后根据各类典型设备在系统负荷中所占的比例,最终合成典型的负荷模型。而总体测辨法则采用不同的思路,它将负荷看成是一个整体,将现代控制理论和辨识算法引入负荷建模和辨识,通过在一些关键出线上装设负荷测辨装置,来辨识该条出线的负荷模型<sup>[4]</sup>。这两种方法各有优缺点:文献[3]中指出,总体测辨法的优点是可以直接从实际的系统中获取数据。但也存在一些缺点:首先,在一个变电站获得的负荷模型很难推广到其他变电站,因为我们知道每个变电站的负荷大小及组成都不一样。另外,由于变电站的运行电压和频率受供电质量的限制,只能在小范围内进行波动,因此很难真实反应负荷在电压和频率大范围波动时的动态特性。最后,由于负荷特性的时变性、随机性和变结构性,负荷测辨装置需要一直在线进行测量和辨识。统计综合法的优点在于不需要现场测量并且可以将最终的负荷模型很方便的推广到其他线路和系统中。但是缺点也很明显,需要收集不同负荷种类(如工业负荷,商业负荷,居民负荷等)的组成和每一种负荷类型由哪些具体负荷元件所构成及其构成比例等。

经过多年的研究,目前在我国已经有较为成熟的负荷测辨装置和辨识算法,一些电力公司也积极

与有关科研院所联合开展研究。如华北电网与华北电力大学、河南电网与河海大学进行合作,采用总体测辨法进行负荷建模,西北电网与中国电力科学研究院合作采用基于系统事故模拟的研究方法进行负荷模型研究,湖南电网与湖南大学合作采用统计综合法进行负荷建模的工作。

## 1.3 负荷模型简介

负荷模型一般可以分为静态模型和动态模型。静态模型主要有 ZIP 模型、多项式模型和幂指数模型。动态负荷模型主要有机理式负荷模型和非机理式负荷模型。由于电动机负荷在总的负荷中占有较大比例,所以机理式负荷模型常用电动机负荷模型来表示。根据研究问题侧重点的不同,电动机负荷模型又可以分为五阶电磁暂态模型,三阶机电暂态模型和一阶机械暂态模型<sup>[2]</sup>。非机理式负荷模型将负荷看作是一个输入量为电压和频率,输出量为有功和无功功率的“黑箱”,采用系统辨识的方法来确定其输入输出特性。一般有传递函数模型,差分方程模型<sup>[13, 24, 26~28]</sup>,神经网络模型<sup>[28~32]</sup>等。

目前,我国电力系统稳定计算常采用静态负荷模型和动态负荷模型相结合的形式,即采用 ZIP 模型和电动机模型相结合来描述系统总的负荷模型。为了得到更加精确的负荷模型,考虑到配电网网络阻抗和无功补偿及小电源的影响,有人提出了综合负荷模型的概念。文献[33]研究了综合负荷模型对福建电网暂态稳定性的影响,结果表明,综合负荷中电动机的负荷模型、无功补偿以及变压器和配电线路的阻抗对于负荷特性有较大影响,应该在负荷模型中得到合理反映。文献[34]提出了电力系统负荷模型中统一模拟配电网网络、无功补偿和感应电动机的模型。综合负荷模型的结构如图 1 所示。

图中, $Z$ 、 $I$ 、 $P$ 分别表示恒阻抗、恒电流、恒功率负荷部分, $C$ 表示配电网的无功补偿, $M$ 表示等值电动机模型, $G$ 表示小电源的等值模型,

$R_{\text{net}} + jX_{\text{net}}$ 表示配电网的等值阻抗。

## 1.4 负荷模型参数辨识

在负荷模型研究中,模型形式一旦确定,下一步就是如何确定和辨识该模型的参数。对于统计综合法来说,需要在实验室中确定典型负荷元件的特性和参数,然后根据典型负荷元件在典型负荷类型以及典型负荷类型在总的负荷中所占据的比例,采用聚类的方法进行聚合,最终得到负荷模型。在负荷元件的聚合中,最重要的是对电动机的聚合。文

献[35~37]对多个不同容量电动机的聚合进行了研究。但迄今为止, 电动机的聚合主要是采用容量加权平均法。文献[38, 39]对聚类分析在统计综合法负荷建模方面也进行了一些有益的探索。对于总体测辨法来说, 负荷模型的结构对于参数的可辨识性非常重要。由于负荷的非线性特性, 有些模型参数可能不会被唯一辨识出来。因此研究负荷模型结构的可辨识性成为动态负荷建模的一个研究分支, 鞠平教授在此方面做了大量的工作, 取得了一些重要成果和结论。另一方面, 如何根据现场数据求取负荷模型的参数, 使之最大程度地和现场实际相符合, 也是广大学者近年来一直努力的方向。文献[40]提出了基于模型回响辨识的动态负荷建模方法, 文献[16]将 KOHONEN 神经网络引入到负荷动态特性建模中, 文献[20]分析了感应电动机负荷模型中部分参数易辨识, 部分参数难以辨识且辨识结果较离散这一现象, 定义了感应电动机参数解析灵敏度, 给出了一种新的感应电动机负荷模型参数辨识策略。文献[18]对动态负荷建模中负荷的时变性进行了研究, 提出了一种改进负荷模型结构和基于多曲线拟合的参数辨识方法。

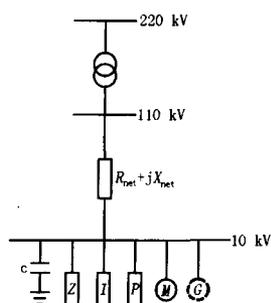


图1 综合负荷模型结构图

Fig.1 Structure of synthesis load model

负荷模型参数的辨识总的来说是一个优化问题, 即如何根据已知条件求得模型的最优解。常用的优化算法有: 最小二乘法, 模拟进化算法, 遗传算法, 粒子群优化算法等。

### 1.5 负荷模型对稳定计算的影响

暂态稳定的研究对电力系统的规划、设计和安全运行都具有重要意义。在对一个具体电网进行暂态稳定计算时, 采用不同的负荷模型将对最终计算结果影响很大。传统观点认为, 采用保守的负荷模型可以保证系统的设计和运行处于安全范围内。但是随着我国电网的互联范围不断扩大, 相同的模型在不同位置 and 不同故障中对系统的稳定影响也不同, 很难找到一个模型使得对系统其他部分的影响

总是偏乐观或者偏悲观。因此在计算中迫切需要采用和实际情况相一致的负荷模型。文献[3]指出采用精确的负荷模型可能带来的好处, 从故障后首摆暂态稳定、小信号稳定、电压稳定研究等几个方面进行了分析, 并在最后指出, 应用负荷模型并没有一个通用的方法, 对于一个给定的系统, 需要努力建立和该系统负荷特性相一致的负荷模型。

在电压稳定的研究中, 普遍认为动态负荷模型对电压稳定的研究具有重要影响<sup>[41~45]</sup>。文献[1]研究了低电压切负荷情况下, 为了保证系统的电压稳定, 采用静态和动态负荷模型对仿真计算结果的影响。文献[46]指出, 如何建立和选择适用于电压稳定分析的动态负荷模型, 是动态电压稳定研究的关键。

负荷模型不仅对系统的暂态稳定和电压稳定有重要影响, 也直接影响着电网的某些断面传输功率。在没有精确负荷模型的情况下, 人们往往试图采用比较保守的负荷模型。采用精确的负荷模型后, 对于有些联络线路, 可以在保证系统安全稳定运行的前提下, 提高电网之间的传输功率, 从而提高系统运行的经济性。

## 2 负荷模型动态数据库的建立

过去几年中, 我国电网规划和调度部门大多采用恒阻抗加恒功率或恒阻抗加电动机的负荷模型, 如河南电网的规划部门采用 40% 恒阻抗加 60% 恒功率负荷模型, 而调度部门则采用 50% 恒阻抗加 50% 电动机的负荷模型。这些模型在系统的稳定计算中发挥了重要作用。但是随着电网建设的快速发展, 区域互联电网逐渐形成, 负荷模型对于系统稳定分析的重要性变得越来越突出。如何获得符合实际的工程化实用负荷模型, 以确保我国互联电网的安全稳定运行, 成为当前的研究热点。

由于统计综合法不能经常开展, 总体测辨法又存在扰动数据的有效性、信噪比较小、辨识模型较难推广等缺陷, 故障仿真法又不能经常进行, 因此考虑将这些方法相结合, 研究建立区域电网负荷模型动态数据库成为一个比较好的选择。

在负荷模型动态数据库的研究中, 输入数据应当是随时间变化的、容易得到的、和负荷有关的数据, 如电力市场竞价交易数据或负荷曲线等, 从而可以反映负荷的随机性和时变性。在负荷建模的方法上, 可以考虑采用多种方法: 如采用统计综合法建立综合负荷模型, 采用总体测辨法和故障仿真法

进行模型参数的对比和验证工作。在负荷模型的选择上,可以选择综合负荷模型、差分方程模型和静态负荷模型等。此外,该负荷模型动态数据库还能够根据系统设置经常进行更新。

该数据库建立后,不仅能够在正常情况下为电网调度和规划部门提供该区域电网不同季节和时段的典型负荷模型,而且可以在电力系统出现故障时,为调度故障支持系统提供准确的负荷模型支持,确保电网安全稳定运行。

### 3 下一步工作展望

目前建立负荷模型动态数据库的工作正在研究中,有一些关键问题需要解决:如何基于负荷数据如电网交易数据和负荷曲线准确分析出负荷的构成及比例,如何采用新的聚合等值方法对不同容量、不同类型的感应电动机群进行更为准确的等值,如何将配电网网架结构数据反映到综合负荷模型中以提高负荷模型的精度,如何充分利用电网扰动数据如单相及两相故障的数据进行有效辨识,如何利用负荷测辨装置所测得的扰动数据(含人为和自然扰动)对负荷模型进行校验,以及如何充分利用 PMU 的数据进行负荷辨识等。

另外,对于铝厂,炼钢厂,油田等特殊负荷类型进行建模,也是下一步需要进行的研究工作。这些负荷容量一般比较大。掌握它们在电压波动情况下的功率变化过程,可以确保电网的安全稳定运行和供电的可靠性。由于行业的特殊性,这些负荷模型一旦确定,将具有很高的理论价值和实际应用价值,可以在全国范围内进行推广。

### 4 结语

随着电网的日益发展及规模的扩大,负荷模型对电网稳定计算的影响变得越来越不容忽视。由于负荷的时变性,随机性,分布性和不连续性,我们不能期望在短期内完全解决这个问题,但是在满足工程应用的前提下,应该尽可能地提高负荷模型和现场实际负荷对系统影响的接近程度。建立区域电网负荷模型动态数据库无疑提供了一个较为切实可行的方法。

### 参考文献

[1] Arnborg S G, Andersson D J, et al. On Influence of Load Modelling for Undervoltage Load Shedding Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998,13(2): 395-400.

- [2] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.  
JU Ping, MA Da-qiang. Load Modeling in Power System[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [3] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Load Representation for Dynamic Performance Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993,8(2): 472-482.
- [4] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.  
SHEN Shan-de. Parameter Identification of Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [5] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995,10(3): 1302-1313.
- [6] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995,10(1): 523-538.
- [7] 程颖, 鞠平, 吴峰. 负荷模型参数辨识的粒子群优化法及其与基因算法比较[J]. 电力系统自动化, 2003,17(11):25-29.  
CHENG Ying, JU Ping, WU Feng. PS Algorithm in Load Parameter Identification and Its Comparison with Genetic Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,17(11), 25-29.
- [8] 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.
- [9] 鞠平. 电力系统非线性辨识[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.  
JU Ping. Nonlinear Parameter Identification of Power System[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1999.
- [10] 鞠平, 戴琦, 黄永皓, 等. 我国电力负荷建模工作的若干建议[J]. 电力系统自动化, 2004,28(16):8-12.  
JU Ping, DAI Qi, HUANG Yong-hao, et al. Suggestions on Load Modelling of Power System in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(16): 8-12.
- [11] 鞠平, 李德丰, 陆小涛. 电力负荷建模系统[J]. 电力系统自动化, 1998,22(06):49-51,54.  
JU Ping, LI De-feng, LU Xiao-tao. A System for Load Modelling in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998,22(06):49-51,54.
- [12] 卫志农, 鞠平. 电力负荷在线建模方法[J]. 中国电机工程学报, 1995,15(6): 361-369.  
WEI Zhi-nong, JU Ping. On-line Modelling of Electric

- Loads[J]. Proceedings of the CSEE, 1995,15(6): 361-369.
- [13] 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 Ren-mu, WANG Wei-guo, JIANG De-bin, et al. Measurement-based Dynamic Load Modeling and Model Validation on Guangdong Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(3):78-82.
- [14] 王卫国,贺仁睦,王铁强. 反映综合负荷动态特性机理的感应电动机模型[J]. 电力系统自动化, 2002,26(4): 23-27.  
WANG Wei-guo, HE Ren-mu, WANG Tie-qiang. The Induction Motor Model to Reflect Dynamic Mechanisms of Synthetic Load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26(4): 23-27.
- [15] 石景海,贺仁睦. 动态负荷模型多曲线拟合参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2003,27(24):18-22.  
SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Parameter Identification of Dynamic Load Model Using Multi-curve Fitting Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(24):18-22.
- [16] 张红斌,贺仁睦,刘应梅. 基于 KOHONEN 神经网络的电力系统负荷动态特性聚类与综合[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 1-5.  
ZHANG Hong-bin, HE Ren-mu, LIU Ying-mei. The Characteristics Clustering and Synthesis of Electric Dynamic Loads Based on KOHONEN Neural Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 1-5.
- [17] 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 Jing-hai, HE Ren-mu. Measurement-based Load Modeling-sorting Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 78-82.
- [18] 石景海,贺仁睦. 动态负荷建模中的负荷时变性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 85-90.  
SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Load Time-variation Study in Dynamic Load Modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 85-90.
- [19] 贺仁睦. 电力系统精确仿真与负荷模型实用化[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 4-7.  
HE Ren-mu. Precise Simulation of Power System and Load Modelling Realization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 4-7.
- [20] 张红斌,贺仁睦,刘应梅. 感应电动机负荷模型参数解析灵敏度分析及参数辨识策略研究[J]. 电网技术, 2004,28(6):10-14.  
ZHANG Hong-bin, HE Ren-mu, LIU Ying-mei. Analysis on Parameter Analytic Sensitivity of Induction Motor Load Model and Parameter Identification Strategy[J]. Power System Technology, 2004,28(6):10-14.
- [21] 张红斌,贺仁睦. 感应电动机模型参数解析灵敏度分析及综合策略研究[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(1): 15-20.  
ZHANG Hong-bin, HE Ren-mu, Parameter Sensitivity Analysis and Synthesis Strategy Study of Induction Motor Load Model[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(1): 15-20.
- [22] 张进,贺仁睦. 基于参数灵敏度分析的负荷建模研究[J]. 现代电力, 2005, 22(5): 29-32.  
ZHANG Jin, HE Ren-mu. Load Modeling Based on the Analysis of Parameter Sensitivity[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(5): 29-32.
- [23] 杨华春,贺仁睦,王鹏,等. 基于聚合理论的大区电网负荷建模[J]. 电力系统自动化, 2005,29(1):49-52.  
YANG Hua-chun, HE Ren-mu, WANG Peng, et al. Load Modeling in Large-scale Grid Based on the Aggregation Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(1):49-52.
- [24] 张进,贺仁睦,王鹏,等. 一种新型差分方程负荷模型与电力系统仿真程序的接口方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 57-60.  
ZHANG Jin, HE Ren-mu, WANG Peng, et al. A New Method to Interface Load Model in the Form of Difference Equation with Power System Simulation Programs[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 57-60.
- [25] 黄梅,贺仁睦,杨少兵,等. 东北电网负荷模型分类与应用[J]. 电力系统自动化, 2005,29(4):85-87.  
HUANG Mei, HE Ren-mu, YANG Shao-bing, et al. Application of Load Model Classification in Northeast Power Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(4):85-87.
- [26] 贺仁睦,魏孝铭,韩民晓. 电力负荷动态特性实测建模的外推和内插[J]. 中国电机工程学报, 1996,16(3): 151-154.  
HE Ren-mu, WEI Xiao-ming, HAN Min-xiao. The Extrapolation and Interpolation of Power System Dynamic Load Modeling Based on the Measurements in the Field[J]. Proceedings of the CSEE, 1996,16(3):151-154.
- [27] 周文,葛斐,贺仁睦,等. 电力系统负荷模型的应用接口[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 32-35.  
ZHOU Wen, GE Fei, HE Ren-mu, et al. Application Interface of Power System Load Model[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 32-35.
- [28] 艾芊,陈陈,沈善德,等. 简化前馈网络用于负荷模型参数辨识的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 21-27.  
AI Qian, CHEN Chen, SHEN Shan-de, et al. Research on Parameter Identification of Load Models by Using Linear BP Networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,

- 25(5): 21-27.
- [29] da Silva A, Ferreira A P C, de Souza A C Z, et al. A New Constructive ANN and Its Application to Electric Load Representation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997,12(4): 1569-1575.
- [30] CHEN Ding-guo, Mohler R R. Neural-network-based Load Modeling and Its Use in Voltage Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Control System Technology, 2003,11(4): 460-470.
- [31] 倪剑,郝建,栾兆文,等. BP 算法在功率耦合负荷建模中的应用[J]. 中国电力, 2005, 38(4): 41-45.  
NI Jian, HAO Jian, LUAN Zhao-wen, et al. An Application of BP Algorithm in Load Modeling with Real and Reactive Power Coupled [J]. Electric Power, 2005, 38(4): 41-45.
- [32] 沈善德,朱守真,罗骏,等. 快速 BP 网络在负荷动态建模中的应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 8-11,33.  
SHEN Shan-de, ZHU Shou-zhen, LUO Jun, et al. Application of Fast Back Propagation Neural Networks in Power System Dynamic Load Modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 8-11,33.
- [33] 赵勇, 张建平. 福州地区负荷模型影响福建电网暂态稳定性的机理 [J]. 电力系统自动化, 2005,29(12):77-82.  
ZHAO Yong, ZHANG Jian-ping. Influence of Load Models of Fuzhou Power Network on Transient Stability of Fujian Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(12):77-82.
- [34] 汤涌,侯俊贤,刘文焯. 电力系统数字仿真负荷模型中配电网络及无功补偿与感应电动机的模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(3):8-12.  
TANG Yong, HOU Jun-xian, LIU Wen-zhuo. The Modeling of Distribution Network and Var Compensator and Induction Motor in the Load Model for Power System Digital Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(3):8-12.
- [35] Nozari F, Kanham D, Price W W. Aggregation of Induction Motors for Transient Stability Load Modeling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987,2(4): 1096-1103.
- [36] Taleb M, Akbaba M, Abdullah E A. Aggregation of Induction Machines for Power System Dynamic Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994,9(4): 2042-2048.
- [37] Franklin D C, Morelato A. Improving Dynamic Aggregation of Induction Motor Models[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994,9(4): 1934-1941.
- [38] 李培强,李欣然,陈辉华,等. 电力综合负荷感应电动机模型参数的研究[J]. 中国电力, 2004, 37(11): 19-22.  
LI Pei-qiang, LI Xin-ran, CHEN Hui-hua et al. Parameters Research on Induction Motor Load Modeling[J]. Electric Power, 2004, 37(11): 19-22.
- [39] 李培强,李欣然,唐外文,等. 统计综合法负荷建模中的行业用户精选[J]. 电力系统自动化, 2005,29(14):34-38.  
LI Pei-qiang, LI Xin-ran, TANG Wai-wen, et al. Consumer Choice for an Industry in Statistical Synthesis Method Based Load Modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(14):34-38.
- [40] 章健. 电力系统负荷建模方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 1997.  
ZHANG Jian. The Studies of Electric Load Modeling[D]. Beijing: North China Electric Power University, 1997.
- [41] Ellithy K A, Choudhry M A. Effect of Load Models on AC/DC System Stability and Modulation Control Design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989,4(2): 411-418.
- [42] Hill D J. Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993,8(1): 166-176.
- [43] KAO Wen-shiow, LIN Chia-Jen, HUANG Chiang-Tsang, et al. Comparison of Simulated Power System Dynamics Applying Various Load Models with Actual Recorded Data[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994,9(1): 248-254.
- [44] Canizares C A. On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modeling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995,10(1): 512-522.
- [45] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [46] 段献忠,包黎昕. 电力系统电压稳定分析和动态负荷建模[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 25-28.  
DUAN Xian-zhong, BAO Li-xin. Voltage Stability Analysis and Dynamic Load Modelling for Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 25-28.

收稿日期: 2006-10-12; 修回日期: 2006-11-27

作者简介:

张景超(1973-)男,博士研究生,主要研究方向为电力系统负荷建模与稳定分析; E-mail: zepczjc@163.com

郝安河(1952-)男,高级工程师,从事电力系统稳定运行与控制及继电保护研究工作;

张承学(1952-)男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统自动化,嵌入式系统,虚拟仪器等。