

负荷建模技术的研究现状与未来发展方向

张红斌, 汤涌, 张东霞, 侯俊贤

(中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100085)

Present Situation and Prospect of Load Modeling Technique

ZHANG Hong-bin, TANG Yong, ZHANG Dong-xia, HOU Jun-xian

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: The effect of load model on the power system simulation is analyzed and a survey on the present research situation of load modeling home and abroad is given. The two main methods for power system load modeling, i.e., the component-based method and the measurement based method, are presented in detail; the features of these methods are analyzed and the application of them is summarized. On the basis of the latest research advance the problems to be solve in the future are pointed out.

KEY WORDS: power system; load modeling; component-based method; measurement based method; synthesis load model

摘要: 分析了负荷模型对电力系统计算结果的影响, 对国内外负荷模型的研究动态进行了综述。详细介绍了目前用于电力系统负荷建模的2个主要方法——统计综合法和总体测辨法, 分析了其特点并总结了其应用情况。最后结合最新研究进展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; 统计综合法; 总体测辨法; 综合负荷模型

0 引言

电力系统数字仿真已被广泛应用于电力系统的规划、设计、运行和研究等领域, 数字仿真结果常常被作为相关决策的依据, 因此仿真的准确度愈来愈受到重视。1996年夏天北美发生了2次大停电事故后, 对事故进行仿真重现时采用 WSCC(Western System Coordinating Council)数据库中的模型和参数不能得到与现场记录一致的仿真结果。改变高压直流输电(high voltage direct current transmission, HVDC)的控制和发电机组调节器参数后, 仿真系统表现出比实际系统更加阻尼的特性。最后将负荷模型从恒电流模型改成电动机加上某种静态负荷的

模型后, 仿真结果才与现场记录相一致, 这充分说明目前用于电力系统动态仿真的模型或参数需要改进, 而建立和使用基于实测数据的负荷模型具有十分重要的现实意义。

目前的负荷建模方法可归纳为2类, 即统计综合法^[1]和总体测辨法^[2]。在过去的20年中, 对于采用上述2中方法进行负荷建模的研究已取得了许多成果。IEEE和CIGRE设有研究负荷建模的专门小组, 发达国家的电力公司几乎都在负荷建模研究方面做了大量工作, 例如北美主要使用的负荷建模软件包是在美国EPRI委托Texas和GE公司对负荷组成进行了大量统计的基础上, 采用统计综合法形成的软件包(如LOADSYN软件)。该软件包的计算结果并不精确, 但经过电力公司在实际运行中的不断修正, 现在每个电网基本形成了自己的负荷静特性模型并仍在实际运行中不断修正, 力求更加符合实际情况。澳大利亚采用总体测辨法(主要依靠在现场做试验)来建立负荷模型^[3]。台湾电力公司建立了负荷特性测量网络^[4], 但对建模方法未作深入研究, 主要是用实测数据来估计静态模型中的ZIP成分以及动态模型中电动机的比例。由于电网运行水平越来越接近于极限以及大量电力电子设备的涌现, 导致了20世纪70—80年代建立的负荷模型已不适用于电力系统动态仿真。因此, 美国最近又将电力系统负荷建模列为重大研究课题之一, 旨在建立更为精确的负荷模型以满足电力系统动态在线安全稳定评估的需要。

随着我国主要电网互联进程的推进, 电网的复杂程度愈来愈高, 其动态稳定性及电压稳定性问题愈来愈突出, 负荷模型对系统计算结果的影响已变得不容忽视。在东北—华北交流联网系统稳定性分析和东

北—华北联网工程调试等工程项目的研究中,采用的负荷模型和参数严重地影响了系统稳定性计算结果的可信度,给决策方案的取舍带来了一定困难。为了解决这一问题,必须探索适用于我国现阶段大规模互联电网的负荷模型和建模方法。

1 统计综合法

统计综合法首先需要通过试验和数学推导得到各种典型负荷元件(如荧光灯、家用电子设备、工业电动机和空调负荷等)的数学模型,然后在一些负荷点上统计某些特殊时刻(如冬季峰值负荷、夏季峰值负荷)的各种负荷组成,即每种典型负荷所占百分比以及配电线路和变压器的数据,最后综合这些数据从而得出该负荷点的负荷模型。

LOADSYN 软件包是到目前为止采用统计综合法进行负荷建模的最具影响的软件包。根据 IEEE 负荷研究小组的调查结果可知,在北美有许多电力公司采用该软件建立负荷模型。使用 LOADSYN 时需要 3 种数据:①负荷组成,即各类负荷(民用、商业、工业等)所占比例;②各类负荷中各种用电设备(荧光灯、电动机、空调等)所占比例;③各用电设备的平均特性。用户对该软件包的看法主要包括:①有功功率的电压特性与实际情况比较接近,而无功功率的电压特性与实验结果的误差较大;②综合得到的频率特性与实验结果相差较大;③不能很好地模拟负荷动态特性。

统计综合法的优点是不依赖现场试验且花费较小,较适用于电网规划。该方法存在以下缺点:①需事先统计成千上万个用户的负荷组成及参数,工作量大且难以获得准确可信的统计结果;②各电器元件的平均特性难以确定;③对无功电压特性、频率特性及动态特性难以准确模拟。

2 总体测辨法

20 世纪 80 年代以来,随着系统辨识理论日趋丰富与完善以及计算机采集与处理数据技术的发展,作为一种新的负荷建模方法的总体测辨法以其简单、实用、数据直接来源于实际系统等多种优点而受到了广泛关注。该方法的基本思想是将综合负荷作为一个整体,首先从现场采集测量数据,然后根据这些数据辨识负荷模型结构和参数,最后用大量的实测数据验证模型的外推及内插效果^[5]。采用总体测辨法建立负荷模型离不开现场实测数据。

美国、加拿大等国相继研制了负荷数据记录装置用来记录一定电压和频率扰动下的负荷数据,并以这些测量数据为依据和检验标准开展负荷特性研究工作,不断吸收系统辨识理论的最新成果,推动负荷建模工作的发展^[2]。在采用总体测辨法建立的负荷模型中,除数据采集、滤波、剔除野值以及必要的电气量计算软件外,其核心为负荷模型辨识模块,它是负荷建模理论与方法的具体体现。

3 负荷模型结构

3.1 概述

现有负荷模型根据结构的不同可分为输入输出式模型和机理式模型,前者以负荷端口的输入量(电压和频率)和输出量(功率和电流)的关系为依据,并选择适当的数学表达式来表示输出量和输入量(包括 2 者的导数)之间的关系;后者则从负荷内部的物理本质入手,通过选择适当的物理模型结构来模拟负荷特性。

3.2 静态负荷模型

在电力系统的潮流及静态稳定分析中一般采用静态负荷模型,常用的有幂函数模型和多项式模型,它们都属于输入输出式模型。

(1) 幂函数模型。

幂函数模型为

$$\begin{cases} P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{p_v} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{p_f} \\ Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{q_v} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{q_f} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_0 、 Q_0 、 V_0 和 f_0 分别为基准点稳态运行时的负荷有功功率、无功功率、母线电压幅值和频率; P 、 Q 、 V 和 f 为上述各量的实际值; P_v 、 Q_v 、 P_f 、 Q_f 分别为负荷有功和无功功率的电压特性指数和频率特性指数。式(1)仅适用于电压变化范围较小($\pm 10\%$)的情况。

(2) 多项式模型。

多项式负荷模型为

$$\begin{cases} P = P_0 \left(p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right) (1 + K_{pf} \Delta f) \\ Q = Q_0 \left(q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right) (1 + K_{qf} \Delta f) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta f = f - f_0$ 为频率偏差; K_{pf} 和 K_{qf} 为频率特性系数。

3.3 动态负荷模型

在进行电力系统动态计算及稳定分析时一般采用动态模型，常用的动态模型包括机理模型和非机理模型 2 种。机理模型通常就是感应电动机模型，一般将感应电动机模型与有关静态负荷模型相结合来描述综合负荷的动态行为。对于由成千上万台特性差别极大的感应电动机和其他各种用电设备组成的综合负荷，如果采用 1 台等值电动机来描述，不仅等值机参数和状态变量失去了物理意义，而且等值效果也较差。因此，文献[6]给出了电动机群等值或合并的条件。若采用多台等值感应电动机描述综合负荷的动态行为，则参数难以确定且增加了动态仿真计算量。另外，是否能真正描述综合负荷的行为机理也没有足够的把握。

(1) 感应电动机负荷模型。

感应电动机模型应用广泛，人们根据其不同的应用领域和分析计算目的提出了多种感应电动机模型^[7-8]，较详细的模型是 5 阶电磁暂态模型，它考虑了定子绕组、转子绕组的电磁暂态特性以及转子的机械暂态特性。当忽略定子绕组的电磁暂态特性时可得到 3 阶机电暂态模型。如果进一步忽略转子绕组的电磁暂态即可获得 1 阶机械暂态模型。感应电动机模型在电力负荷中占有较大比重，对电力系统运行分析与控制具有很大的影响，很多电力负荷建模软件包均包含感应电动机模型。常用的感应电动机模型为 1 阶机械暂态模型和 3 阶机电暂态模型，一般仅在电力系统电磁暂态分析中考虑感应电动机的 5 阶电磁暂态模型。

IEEE Task Force^[7] 推荐的感应电动机负荷模型参数如表 1 所示，其中： R_s 、 X_{s0} 、 X_m 、 R_r 、 X_{r0} 和 T_j 分别表示定子电阻、定子漏抗、激磁电抗、转子电阻、转子电抗和惯性时间常数； A 和 B 为机械转矩系数； L_{Fm} 表示电动机负载率，即电动机负荷与电动机额定容量的比值。

表 1 IEEE 负荷建模工作组推荐的电动机模型参数
Tab.1 The parameters of motor models recommended by IEEE Task Force

类型	R_s	X_{s0}	X_m	R_r	X_{r0}	A	B	T_j	L_{Fm}
1	0.031	0.100	3.20	0.018	0.180	1.0	0	0.70	0.60
2	0.013	0.067	3.80	0.009	0.170	1.0	0	1.50	0.80
3	0.013	0.140	2.40	0.009	0.120	1.0	0	0.80	0.70
4	0.013	0.140	2.40	0.009	0.120	1.0	0	1.50	0.70
5	0.077	0.107	2.22	0.079	0.098	1.0	0	0.74	0.46
6	0.035	0.094	2.80	0.048	0.163	1.0	0	0.93	0.60
7	0.064	0.091	2.23	0.059	0.071	0.2	0	0.34	0.80

注：类型 1—工业小马达；2—工业大马达；3—水泵；4—厂用电；5—为民用综合马达；6—民用和工业综合马达；7—空调综合马达。

(2) 非机理动态模型。

上述机理模型物理意义明确，易于理解和应用，当负荷群的成分比较单一时机理模型是合适的。当负荷群中的动态元件类型不止一种或类型单一但特性相差较大时，用简单的等值机理模型去描述则较为困难。因此，人们开始研究负荷的非机理动态模型。非机理模型属于输入输出式模型，建立非机理模型主要是为了较好地描述负荷群输入/输出特性，而并不苛求对模型机理的解释。常见的非机理模型包括常微分方程模型^[3]、传递函数模型^[9]、状态空间模型^[10]和时域离散模型^[11]。

3.4 负荷模型辨识

负荷模型结构确定后的参数辨识相对来说比较容易，其实质是求解单纯的数值优化问题。对于静态负荷模型可采用求解非线性最小二乘问题的牛顿法、Marquart 法，也可采用各种求解非线性优化问题的方法(如最速下降法和共轭梯度法等)。对于动态负荷模型，其参数辨识包括算法和准则 2 部分，常用的准则有最小二乘、最大似然、最小方差等。准则确定后，参数辨识问题就变为求某准则函数达极值的优化计算问题，可采用上述各种非线性优化方法来求解。

4 国内负荷模型研究情况

多年来，我国各大电网在进行电力系统分析计算时，通常按照一定的经验选定某种常见的负荷模型(如电动机+恒阻抗)并定性地确定模型参数，然后通过对本网内发生的典型事故的模拟计算不断地修正负荷模型。随着我国主要电网互联进程的推进，电网越来越复杂，电压等级越来越高，各元件之间的电气距离越来越小，负荷模型对仿真计算的结果会产生质的影响。因此，按照经验确定负荷模型的方法已变得不合时宜。另外，由于负荷特性与地区的气候、资源、经济发展情况和生活水平等因素有关，这就造成了不同地区之间负荷模型及参数的差异性。现有负荷模型已很难准确地描述负荷特性，并已成为提高电力系统仿真精度的瓶颈。

20 世纪 80 年代以来，我国各科研机构及院校(如中国电力科学研究院、华北电力大学、清华大学、河海大学和西安交通大学等)对负荷模型进行了不断研究和探索，在理论研究方面取得了许多可喜成果，在电力系统事故分析等工作中发挥了一定作用。

为建立适合于全国联网稳定计算的负荷模型，国家电网公司重点科研项目“大区电网负荷测

试技术及模型完善研究”和“电力系统计算分析中的负荷模型研究”于2003年正式立项。中国电力科学研究院在国家电网公司和各区域电网公司的支持下,较好地完成了上述项目的所有研究工作,取得了负荷建模研究领域的重要成果,提出了可以拟合东北电网4次大扰动试验的考虑配电网的综合负荷模型(synthesis load model, SLM)^[12-13]。2005年10月至2006年6月底,东北电网有限公司进行了SLM在东北电网独立运行方式下的应用研究。采用考虑配电网的SLM后,吉黑省间、辽吉省间和辽宁中部等各主要输电断面稳定极限平均提高450MW左右,这对于确保东北电网向华北电网送电发挥了极其重要的作用。从2005年开始,中国电力科学研究院与河南省电力公司合作,开展了河南电网负荷模型研究工作,以期形成负荷模型计算数据库,建立适合河南电网的负荷模型。

华北电力大学电力系统控制研究所在贺仁睦教授带领下,长期进行负荷模型的实测辨识和模型的有效性研究,并为此先后与广东省电力调度中心、华北电力调度局和东北电力调度通信中心进行合作。1999年6月,华北电力大学与广东省电力调度中心合作,在广州地区安装了负荷特性测辨系统,经过现场运行得到了大量数据。经过对负荷特性的分类与综合^[14]得到了具有统计规律的负荷特性模型。将此模型用于粤西送出断面稳定极限计算和1998年7月7日220kV水贝变电站母线事故仿真,将仿真结果与现场记录进行比较可知,根据实测数据建立的动态模型在短路电流计算中得到的结果比BPA静特性模型更接近实际,在功角摇摆仿真中采用2种模型得到的结果相当接近,实测动态模型比BPA静态模型计算出的断面功率极限提高了5%^[2]。

2002年1月华北电力大学与华北电力调度局合作,分别在张家口地区的侯家庙、东山坡等变电站安装负荷特性记录仪进行负荷模型实测辨识,负荷模型采用SLM^[15]。将实测动特性负荷模型和BPA静特性负荷模型对沙昌线(沙岭—昌平500kV线路)稳定计算的影响进行比较,结果表明采用前者的极限切除时间比后者长^[15]。

20世纪80年代以来,河海大学电气工程学院在鞠平教授指导下开展了负荷建模研究工作,并于2001—2002年与河南省电力调度局合作进行了负荷特性参数实测辨识研究,建立了河南电网负荷特

性数据库。针对河南电网实测数据进行稳定分析发现,不同季节、不同时段负荷动态参数对电网稳定极限的影响不同。

除上述单位以外,清华大学、西安交通大学等单位也开展了负荷特性实测辨识工作,他们所走的技术路线与华北电力大学类似^[16],此处不再赘述。

5 结语

(1) 由于电力负荷具有复杂性、分散性和随机性等特点,建立完全精确的负荷模型绝非易事,只有通过事故分析或实验结果进行校核、分析和修正才能逐步建立切合实际的、合理的负荷模型。

(2) 由于统计综合法和总体测辨法各有特点,因此应充分发挥这2种方法的优势,尤其要加快统计综合法的研究步伐,在2种方法之间取长补短,尽快建立适用于我国电力系统分析计算的负荷模型。

(3) 根据各电网的实际情况和实测的系统动态数据研究适用于各电网的典型负荷模型,并通过专门的现场扰动试验进行修正、确认是非常必要的。

(4) 积极总结东北电网2次大扰动试验的仿真分析结果,开展考虑配电网的SLM在各区域电网的适用性研究,建立适用于全国联网稳定计算的负荷模型。

参考文献

- [1] Price W W, Wirgau K A, Murdoch A, et al. Load modeling for power flow and transient stability studies[R]. EPRI, 1987.
- [2] 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[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 78-82(in Chinese).
- [3] David J H. Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 166-176.
- [4] 富山 勝幸. 系統解析のための「動的負荷モデル」の検討[J]. 電気学会論文誌 B, 1999, 119(6): 697-703.
- [5] 富山 勝幸. 系統解析のための静的負荷特性の推定手法[J]. 電気学会論文誌 B, 1999(3): 326-332.
- [6] Chia-Jen Lin, Yuan-Tien Chen, Hsiao-Dong Chiang, et al. Dynamics load models in power system using the measurement approach[J]. IEEE Transactions on Power System, 1993, 8(1): 309-315.
- [7] 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.
- [8] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

- [9] Welfonder E, Weber H. Investigations of the frequency and voltage dependence of load part systems using digital self-acting measuring and identification system[J]. IEEE Trans on Power systems, 1989, 4(1): 19-25.
- [10] Meyer F J, Lee K Y. Improved dynamic load model for power systems stability studies[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(4): 3303-3309.
- [11] Dovan T. A microcomputer based on-line identification approach to power system dynamic load modeling[J]. IEEE Trans on Power systems, 1987, 2(3): 529-536.
- [12] 汤涌, 张东霞, 朱方, 等. 东北电网第 2 次大扰动试验仿真分析[R]. 中国电力科学研究院, 2005.
- [13] 汤涌, 张东霞, 朱方, 等. 东北电网大扰动试验仿真分析研究报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [14] 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.
- [15] 贺仁睦, 刘永奇, 雷为民, 等. 华北电网负荷实测建模平台项目结题报告[R]. 北京: 华北电力集团公司, 2003.
- [16] 李力, 朱守真, 沈善德, 等. 负荷动态模型集结. 电力自动化设备, 1999, 19(4), 6-10.
Li Li, Zhu Shouzhen, Shen Shande, et al. Aggregation for dynamic load modeling in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 19(4): 6-10(in Chinese).

收稿日期: 2006-12-20.

作者简介:

张红斌(1969—), 男, 工学博士, 主要从事电力系统分析和负荷建模等方面的研究, E-mail: zhhb@epri.ac.cn;

汤涌(1959—), 男, 工学博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 中国电力科学研究院副总工程师, 研究方向为电力系统分析与控制;

张东霞(1964—), 女, 工学博士, 研究方向为电力系统分析与控制;

侯俊贤(1978—), 男, 工学硕士, 主要从事电力系统分析、控制和相关软件的研发。

(编辑 王金芝)

为提高 500kV 电网送电能力 国家电网公司在东北电网进行两次大扰动试验

2004 年和 2005 年在东北电网进行的两次大扰动试验是国家电网公司提高电网送电能力工程的一项重要内容。负荷模型问题自东北—华北联网运行以来, 一直困扰着我国电力规划和调度运行部门。负荷模型和参数对系统稳定性计算结果的影响变得非常突出, 严重地影响了仿真计算结果的可信度。为了解决这一问题, 中国电力科学研究院会同东北电网公司提出“大区电网负荷测试技术及模型完善研究”科研课题, 课题核心内容是基于东北电网大扰动试验, 研究适合于东北电网仿真计算的负荷模型。

东北电网 2004 年大扰动试验于 2004 年 3 月 25 日进行, 试验分两个阶段进行。第一阶段 9:26 开始, 短路地点在黑龙江省哈尔滨地区的 500kV 哈南变电站, 试验条件为东北—华北联网运行; 第二阶段 13:28 开始, 短路地点仍在哈南变电站, 试验条件为东北电网孤立运行。

2005 年大扰动试验于 2005 年 3 月 29 日进行, 试验同样分两阶段进行。第一阶段 9:30 开始, 短路地点在吉林省四平地区 500kV 梨树变电站, 试验条件为东北—华北联网运行; 第二阶段 13:30 开始, 短路地点在黑龙江省哈尔滨地区的 500kV 哈南变电站, 试验条件为东北—华北联网运行。

当我国进入大区电网互联阶段, 仿真计算负荷模型及参数的选用对系统稳定计算结果影响密切。采用不同模型模拟电网负荷, 对网内主要断面输电极限的计算差别很大, 此类问题不仅存在于东北—华北联网系统中, 其它大区互联电网中也同样出现。由于负荷模型具有复杂性、分散性和随机性等特点, 完全依赖理论研究和国外负荷建模方法, 难以反映特定电网负荷实际特性。工程实际中, 事故分析是校核负荷模型的有效方法, 而事故真实数据来自实际大扰动试验。此次三相人工接地短路的电网大扰动试验, 是研究东北电网负荷模型的一种有效手段。

在大区电网互联情况下, 进行三相人工接地短路电网大扰动试验, 可以为国家电力规划、管理部门研究全国联网和北电南送格局提供真实可信数据, 对推动全国电网负荷模型研究, 实施优化我国电网规划建设和资源配置、促进电网安全生产和尽快步入市场调节等重大举措具有积极影响, 特别是对东北电网安全稳定运行更具深远意义。