

# 国外电力系统稳定计算使用的负荷模型

刘家庆, 陶家琪, 徐兴伟, 张弘鹏

(东北电网有限公司, 辽宁省 沈阳市 110006)

## A Survey on Research of Load Model for Stability Analysis in Foreign Countries

LIU Jia-qing, TAO Jia-qi, XU Xing-wei, ZHANG Hong-peng

(Northeast China Grid Company Limited, Shenyang 110006, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** In order to offer references for power load modeling in China, the main research results of load model in foreign countries are summarized, including the classification of load models and the approach for modeling, the load models adopted in stability analysis, the applicability of static and dynamic load models, the load model of induction motor and the selection of its parameters, etc.

**KEY WORDS:** load model; stability analysis; dynamic model; static model; induction motor

**摘要:** 对近十年来国外电力行业在负荷模型方面的主要研究成果进行了综述, 包括负荷模型分类和建模方法、在电力系统稳定分析中所使用的负荷模型的情况、静态和动态模型的适用性问题以及感应电动机模型和参数的选取等, 可为我国电力系统负荷模型的研究提供参考。

**关键词:** 负荷模型; 稳定分析; 动态模型; 静态模型; 感应电动机

## 0 引言

在电力系统稳定分析中使用不同的负荷模型对计算结果的影响很大, 该问题已受到了国外电力系统研究机构和运行部门的广泛关注。1982年IEEE成立了专门研究负荷动态特性表示方法的工作组(IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance), 1976年美国电力科学研究院(electric power research institute, EPRI)设立了电力系统负荷模型研究项目, 试图开发用于电力系统稳定研究和在线安全分析的更准确的工具, 并相继发表了一些研究成果。1996年美国发生2次大停电事故后, 在仿真计算时发现使用原有负荷模型无法重现事故的过程, 使得对负荷建模问题的研究受到了进一步的重视和推动。为借鉴国外负荷模型研究的经验, 促进我国在负荷建模方面的研究, 笔者查阅了近年来国外有关负荷模型研究的文献, 并对这

些文献进行了认真分析和讨论。下面将根据分析结果并结合与国外电力行业的交流情况, 对目前国外电力负荷模型的主要研究动态进行综述。

## 1 负荷模型的分类和建模方法

根据所研究问题的不同性质和目的可按各种方式(如线性和非线性、频率相关和频率无关、机理型和非机理型等)对负荷模型进行分类<sup>[1]</sup>。电力系统生产和运行部门主要关心所选取的负荷模型是否能反映实际电力系统的动态过程, 为此可将负荷模型分为静态模型和动态模型2种。

### (1) 静态负荷模型。

静态负荷模型主要包括恒阻抗负荷模型、恒电流负荷模型、恒功率负荷模型和多项式负荷模型, 它们的组合表达式为

$$P=P_0[a_1(V/V_0)^2+a_2(V/V_0)+a_3]$$

$$Q=Q_0[a_4(V/V_0)^2+a_5(V/V_0)+a_6]$$

式中:  $P_0$ 、 $Q_0$  和  $V_0$  分别为额定有功功率、无功功率和电压;  $P$ 、 $Q$  和  $V$  分别为实际有功功率、无功功率和电压;  $a_1\sim a_6$  为系数。

### (2) 动态负荷模型。

动态负荷模型能反应负荷的动态行为, 其中最常用的是感应电动机模型<sup>[2]</sup>。反映输入量与输出量变化关系的非机理模型是基于黑箱理论建立的输入输出特性模型, 该模型有待于进一步开发和研究, 尚不具备实际应用条件。

负荷模型的建模方法主要包括统计分析法<sup>[3]</sup>和现场实测辨识法<sup>[4-5]</sup>等, 后者由于需要投入大量的人力和时间做大量的工作, 因此仍处于研究阶段。

## 2 国外在电力系统稳定分析中使用的负荷模型

目前美国各电力公司在稳定分析中主要使用静

态模型。1996年北美发生2次大停电事故后,美国西部电网协调协会(Western Systems Coordinating Council, WSCC)根据仿真研究结果在负荷模型中加入了感应电动机成分<sup>[6-7]</sup>。但由于建模工作比较复杂,美国很多电力公司仍主要使用静态模型。

为调查负荷模型的应用情况,IEEE负荷动态特性表示法工作组曾对电力行业的85家单位作过一项调查,调查意见返回率为40%。调查结果显示,在进行暂态和小扰动分析时大多数单位采用有功为恒功率、无功为恒阻抗的静态模型,其他单位采用恒阻抗或多项式的静态模型,只有2个单位使用包括感应电动机的动态模型<sup>[8]</sup>。

### 3 静态负荷模型与动态负荷模型的适用性

IEEE负荷动态特性表示法工作组在推荐标准负荷模型的报告中指出,静态模型适用于潮流分析,在计算结果对负荷模型不敏感的地区还可用于动态分析。在计算结果对负荷模型敏感的地区,建议在进行动态分析时使用包括感应电动机的动态模型<sup>[9]</sup>。即如果采用静态和动态模型得出的结论基本相同则使用静态模型,否则应使用动态模型,对于一些大型事故的复算和研究证明了该方法是可行的。1983年瑞典电网发生电压崩溃事故后,用简单的静态模型无法重现电压崩溃的全过程,采用计及电动机、电冰箱、空调等用电设备特性的比较详尽的模型后即可对事故过程给出合理的解释。

文献[7]论述了在1996年8月10日北美WSCC系统停电事故仿真中负荷模型的有效性。采用原有负荷模型得出的结果证明系统根本没有问题,包括振荡阻尼、电压和功率变化方向及频率偏移等都比实际情况乐观得多。然后对所采用的负荷模型进行修改,加入了直流控制、自动发电控制(automatic generation control, AGC)等控制方式并锁定大型发电机组的调速器,仿真结果仍然比实际系统有更多的阻尼。最后将负荷模型从恒电流改为感应电动机与不同静特性联合的负荷模型,各量的仿真结果和实际记录终于取得了很好的一致性。因此WSCC认为开发和使用动态负荷模型是迫切需要的。2002年WSCC针对夏季高峰负荷建立了一个过渡性质的模型,它含有不同比例的静态负荷和感应电动机负荷<sup>[6]</sup>。由于采用该模型能重现1996年8月10日北美WSCC系统停电事故,因此证明该模型比静态模型更接近于实际情况。但因为该模型只用于对特定

的夏季高峰负荷时系统行为的仿真,所以WSCC认为该模型仍是过渡的而不是最终的。

### 4 感应电动机模型和参数的选取

IEEE负荷动态特性表示法工作组推荐使用感应电动机的简单模型和详细模型,简单模型就是单鼠笼三相异步电动机,它与电力系统综合程序软件包(power system analysis software package, PSASP)的I型模型一致。在缺少综合电动机参数时,可从EPRI的LOADSYN程序相应项目中选取典型参数。

文献[6]针对1996年8月10日美国WSCC系统大停电事故进行了多方面研究并给出了模型和参数值。研究内容包括是否采用感应电动机模型的计算结果比较、感应电动机负荷位于不同电压等级的计算结果比较、接于230kV以上母线的感应电动机负载特性研究、改变感应电动机负荷百分比的计算结果比较、改变感应电动机电气参数的计算结果比较、改变感应电动机惯性常数的计算结果比较、在电网中不同地点发生扰动的计算结果比较等。

使用感应电动机模型是一种折衷的办法,该模型用于代表从小型民用电动机到工业用大型电动机的各类型电动机的集合,它通过“集中”于高压或低压负荷母线上的负载将分散使用的电动机集成起来。将上述负载从高压母线移到低压母线(相当于从500kV经过3次变压)需要增加电动机负荷的比例才能得出相同的系统阻尼响应。如将所有电动机负荷移至低压母线上,电动机比例需接近50%,若移至高压母线则电动机比例只需占20%~30%,这说明直接将感应电动机接于高压母线而不考虑联系阻抗会带来较大偏差<sup>[10]</sup>。

### 5 国外负荷模型研究的主要观点

#### 5.1 用于潮流及暂态稳定仿真的标准负荷模型

为了在广泛使用的仿真程序中采用更符合实际的负荷模型,促进各商品级程序用户之间的数据交换,负荷动态特性表示法工作组于1995发表了文献[9],该论文为潮流、暂态稳定性和较长期的动态仿真推荐了标准负荷模型,所得出的结论主要包括:

(1) 对于暂态稳定、较长期动态稳定及小扰动稳定程序,推荐使用多种类型负荷(包括放电照明设备、感应电动机、同步电动机和变压器)与一条母线连接的负荷模型。

(2) 在推荐负荷模型时主要考虑2个基本点,

即模型特性要与实际负荷特性相一致以及负荷表示的灵活性。

(3) 在大规模的暂态稳定分析中, 负荷一般被仿真成与电压和频率相关的纯静态(代数)函数, 使用多项式(ZIP)模型或指数模型。除了在电压低于0.3~0.7 pu 下可以把静态负荷转换成阻抗以外, 上述模型在整个电压范围内是连续的。在动态仿真中采用指数值小于1.0的静态模型(或等效的多项式模型)来仿真动态负荷是有问题的<sup>[4]</sup>。

(4) 由于不同电动机具有不同的特性, 因此既需要仿真小型感应电动机, 又需要仿真大型感应电动机。对于小型电动机, 只需要仿真其惯性动态而不必仿真转子磁通动态。

(5) 感应电动机是电力系统负荷的主要成分, 美国57%的电力负荷是电动机(主要是三相异步电动机)。过去由于受计算工具的限制, 在是否使用动态模型上还有争议。随着计算机技术的发展, 应逐步淘汰使用静态模型来等值表示感应电动机的做法<sup>[9]</sup>。

(6) 负荷模型的敏感性研究是针对需要仿真的其对每种运行方式的敏感性而进行的, 目的是为了确定是否使用动态电动机模型进行仿真。

(7) 推荐使用的模型包括转子动态特性并能自动跟踪系统频率的变化, 在只包含惯性(滑差)动态的简单模型中则没有这种自动跟踪功能。为了仿真频率发生较大变化时的情况, 应使用机端母线频率来计算滑差并以此修正稳态等值电路。

(8) 电动机和母线的初始有功负荷是输入参数, 相应的初始无功负荷是在模型初始化的过程中计算出来的。感应电动机无功功率和母线初始无功功率之差( $Q_0$ 的一部分)通过增加并联无功补偿来解决。

## 5.2 用于电力系统动态稳定性研究的负荷建模

文献[11]是英国工程物理咨询委员会(EPSRC Grant)GR/M38179/01项目组于2002年发表的关于电力系统稳定研究负荷建模的结论性报告, 该项目的研究目的是为了在电力系统高压母线上进行测量以获取综合负荷特性, 并为每种典型负荷提供低阶负荷模型。该文献的主要内容和观点包括:

(1) 在建立动态负荷模型时会遇到无法采集到系统中所有负荷详细数据的问题, 因此只能采用统计分析法有选择地对一定数量的动态负荷进行采样, 确定一些重要参数的统计值, 最后根据动态负荷的综合表现进行建模。一般说来, 电力系统稳定性研究只针对于负荷的综合表现行为, 而不针对

于收集到的各类负荷的全部表现行为。

(2) 研究负荷建模的另一种主要方法是以测量为基础的实测辨识法, 具体包括频域方法和时域方法, 在电力系统的研究中大多使用后者。该方法需要在各条负荷母线上放置传感器和测量设备以采集负荷数据, 从而评价相应的模型结构和参数。总体测辨法具有直接测量实际负荷数据的优点, 适用于按特定需要建立负荷模型的情况。但该方法也有局限性, 当对更大变化范围进行研究时, 很难在正常运行条件下将电压改变10%以上。可感知量级的频率变化实际上是不可能发生的, 除非专门隔离负荷。另外, 负荷本身总是在不断变化, 轻微的暂态作用将使对测量结果的解释更为复杂。

(3) 如果感应电动机负荷在总负荷中占一定比例, 则应建立动态负荷模型。感应电动机负荷所占比例因负荷类型而异, 对于居民和商业负荷, 感应电动机比例超出30%时负荷动态特性才变得非常明显, 而对于工业负荷, 感应电动机负荷只占20%时就要使用动态模型。

(4) 分析几种不同负荷模型可知, 电压变化后有功和无功负荷的响应与电压紧密相关。虽然负荷相同, 但测量到的有功和无功响应将因系统结构的不同而不同。对于同一负荷, 如果负荷母线电压发生不同的变化, 则有功功率模型的参数也不同。这说明根据一个系统的测量数据建立的有功模型参数对于另一个系统可能是无效的。负荷的无功模型参数并不像有功模型参数那样易变, 可以将其应用于其他系统。

(5) 对负荷位置、负荷模型、需要建模的负荷数量和负荷模型参数对大扰动和小扰动下系统稳定性的影响进行分析发现, 不同负荷模型对系统性能的影响并不存在普遍悲观或乐观的结论。某些系统的阻尼可以通过采用动态模型加以改进, 而另外一些系统采用动态模型后阻尼可能变小。所选择的负荷位置对分析结果也会产生影响。负荷模型参数的变化对于不同状态所起的作用不同<sup>[12]</sup>, 虽然调整负荷模型参数值可以改进一个临界状态的阻尼, 但可能恶化其他状态的阻尼。受到大干扰后转子角度的时间响应和发电机功率受到负荷模型和动态负荷位置的影响, 研究结果与特征值分析结果相符。电动机相角振荡不但受到所选负荷动态特性的影响, 也受到系统中其他负荷的模型的影响。

(6) 本次研究只考虑随电压变化而变化的负

荷, 频率变化及其对负荷响应的影响对于建立合理的负荷模型也很重要, 对于在发生较大频率偏移时描述电力系统现象更为重要。负荷动态特性和 PSS(power system simulator)的相互作用(即负荷动态特性对 PSS 的影响)也需要详细调查, 初步研究已表明该影响是非常显著的。

### 5.3 负荷动态性能表示法

文献[8]是 IEEE 负荷动态性能表示法工作组于 1993 年发表的一篇分析报告, 该文献归纳了最新的电力系统负荷表示法, 包括相关术语的定义、对于负荷建模重要性的讨论以及对不同类型负荷进行不同类型分析时应重点考虑的事项。另外, 该文献对获取典型负荷模型数据的方法进行了评审。该文献的主要内容和观点如下:

在缺乏负荷特性的精确数据时, 通常采用稳定水平较低的负荷模型, 以便在系统设计和运行限制上提供一定的安全裕度。该方法已被证明是一种危险的方法, 因为并不总是能够选择到对于所有系统或所有试验条件均为保守的负荷模型, 其原因在于:

#### (1) 暂态稳定性。

系统电压在故障后第 1 摆振荡期间内一般会降低, 此时负荷所消耗的功率将对功率平衡产生影响, 进而影响到相角漂移的量级和系统振荡稳定性。例如某负荷具有恒定电流特性(功率消耗直接随着电压变化而变化), 如果使用恒定阻抗负荷模型则功耗将随着电压的平方而变化, 因此在电压下降期间将低于实际负荷。这对于位于加速部分的负荷会产生悲观影响, 因为功率不平衡状况会更严重<sup>[13]</sup>; 而对于远离加速部分的负荷则会产生乐观的影响。另外, 恒功率负荷模型对分析结果将产生反面影响, 因为在电压下降期间该模型使功率保持在较高数值。总之, 很难选择一个模型可以保证对于所有系统或各种干扰都是保守的。同时, 已经证明静态负荷模型在涉及较大电压或频率偏差时有不足之处, 特别是在系统解列情况下。例如如果干扰造成了解列现象, 系统某些部分供电不足并伴有明显的电压下降, 采用恒定阻抗负荷模型的分析结果将是频率升高而不是降低。将恒功率模型作为感应电动机负荷的保守表示法时, 只对负荷的有功分量是真实的, 对于无功分量当电压下降到一定数值时反而会升高, 此时模型不能代表实际负荷<sup>[8]</sup>。

#### (2) 小扰动稳定分析中的阻尼特性。

当大量发电机广泛分布于系统中时, 交互区域

的振荡状态经常导致电压和频率发生明显变化。在这种情况下, 负载电压和频率特性对振荡阻尼具有显著作用<sup>[14]</sup>。美国 WSCC 最近的一项研究表明, 在小扰动分析中使用恒定阻抗负荷表示法比使用更精确的负荷表示法对阻尼高估了 25%。

#### (3) 电压稳定性。

电压稳定性分析不能简单地使用静态负荷模型。瑞典国家电力公司曾用静态负荷模型重现 1983 年的停电事故, 但不能解释电压崩溃现象, 由此可知低压负荷特性(低于 0.8 pu)不遵从稳定性研究中所采用的传统的负荷特性。加拿大安大略省水力部对渥太华地区所做的电压稳定性研究表明进行精确的动态负荷建模非常重要。在研究断开 1 条输电线路的影响时发现, 采用静态模型和动态模型所获得的结果之间存在着本质性差别, 前者得到的是完全错误的结论。假定感应电动机具有近似恒定功率特性将产生严重后果, 英国哥伦比亚电力公司所辖北方地区电网于 1979 年发生的电压崩溃事故说明该假定是错误的。

上述讨论表明目前还没有一个通用的规则来指导采用合理的负荷模型, 工作组建议应着重研究负荷特性并充分利用包括动态模型在内的现有模型以改进所建模型的真实性和准确性。

1988 年负荷动态特性表示法工作组对工业企业进行了调查研究, 调查对象大部分位于北美, 调查意见返回率为 40%。根据调查结果可知, 大多数企业当时没有使用专用的负荷建模软件, 而使用专用软件的大多数企业使用的是 EPRI LOADSYN 软件包。大多数单位在故障前后进行潮流分析时使用恒功率负荷模型, 也有少部分单位采用电压相关模型。在进行第 1 摆和小扰动稳定性分析时大多数单位采用有功恒电流模型和无功恒阻抗模型, 少数单位采用有功和无功两用的恒阻抗模型、静态多项式模型以及 2 者的组合, 另有 2 例报告显示在某些类型的稳定性分析中使用动态感应电动机模型。调查结果表明, 约有 50% 接受调查的人对所采用的负荷模型不满意并正在致力于改进负荷模型。这项工作包括收集更多的详细数据, 在系统内所选定的位置上安装记录器, 进行现场试验以开发新的模型或验证现有表示法。

负荷建模时需要考虑的事项包括第 1 摆、小扰动、负荷与发电不平衡、感应电动机稳定性、负荷冷启动、电压稳定性及动态过电压。是否需要特

定负荷类型进行详细建模取决于该负荷类型对电压和频率的影响程度。如果静态负荷模型显示了很强的负荷效应就应采用动态感应电动机模型,一般50%~70%的负荷成份可用感应电动机模型代替,电动机模型应基于典型的感应电动机数据并具有与转速成正比的负荷转矩。只要一个区域内所需要的总体负荷可以用一定比例的电动机表示,就没有必要在每个母线上都包含动态感应电动机。

大型特殊负荷(如氯厂、铝提炼厂、熔炉和电炉等)在使用精确反映负荷特性的模型时将产生明显的电压和频率偏移。由于在振荡期间发电厂附近发生了频率变化,在暂态稳定性研究中应对发电厂辅机(包括可调速电动机等)进行详细建模,特别是在故障区附近。

## 6 结语

在研究电力系统稳定性时应使用能够反映系统动态的负荷模型,只有在静态和动态模型对计算结果影响相差较小时才可使用静态模型。目前使用的模型都与实际有一定的偏离,需要对其进行进一步研究。IEEE 负荷动态特性表示法工作组的调查结果显示,在接受调查的用户中有一半对所使用的负荷模型不满意并正致力于改进负荷模型。目前国际上普遍采用动态的和详细描述负荷模型。一种模型可能对一种方式或一个局部电网是保守的,但对另一种方式或局部电网有可能是冒进的。目前最先进的建模方法是通过现场实际测量记录再经过拟合而取得负荷动态特性的方法<sup>[15-16]</sup>。

## 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] Popovic D H, Hiskens I A, Hill D J. Stability analysis of induction motor networks[J]. *Electrical Power & Energy Systems*, 1998, 20(7): 475-487.
- [3] 黄梅, 贺仁睦, 杨少兵. 模糊聚类在负荷实测建模中的应用[J]. *电网技术*, 2006, 30(14): 49-52.  
Huang Mei, He Renmu, Yang Shaobing. Application of fuzzy clustering in measurement-based load modeling[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(14): 49-52(in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Pereira L, Kosterev D, Makin P, et al. An interim dynamic induction motor model for stability studies in the WSCC[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2002, 17(4): 1108-1115.
- [7] Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1999, 14(3): 967-979.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 张东霞, 汤涌, 朱方, 等. 接于高压母线的电动机负荷等值模型[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(6): 14-18.  
Zhang Dongxia, Tang Yong, Zhu Fang, et al. Equivalent model for induction-motor load connected to high voltage bus[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(6): 14-18(in Chinese).
- [11] Milanovic J, Jenkins N. Power system load modeling for stability studies[R]. London: Department of Electrical Engineering & Electronics, EA Technology Ltd., 2002.
- [12] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. *电网技术*, 2005, 29(23): 1-6.  
Sun Huadong, Zhou Xiaoxin, Li Ruomei. Influence of induction motor load parameters on power system transient voltage stability[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(23): 1-6(in Chinese).
- [13] General Electric Company. Load modeling for power flow and transient stability computer studies[R]. EPRI, 1987.
- [14] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Bibliography on models for power flow and dynamic performance simulation[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1995, 10(1): 523-538.
- [15] 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]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [16] 吴丽华, 姚国灿, 朱方, 等. 基于事故仿真方法对西北网负荷模型的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2003.

收稿日期: 2006-12-20.

作者简介:

刘家庆(1964—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 长期从事电力系统安全稳定运行及管理工作, E-mail: liujiaqing@spnec.com;

陶家琪(1950—), 男, 工学硕士, 教授级高级工程师, 长期从事电力系统安全稳定运行及管理工作;

徐兴伟(1971—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度、运行方式安排及稳定分析工作;

张弘鹏(1975—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事电网安全稳定分析及运行方式安排工作。

(编辑 王金芝)