

电力系统 负荷建模

(第二版)

◎ 鞠 平 马大强 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM714/7

2008

电力系统 负荷建模

(第二版)

鞠 平 马大强 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书就电力系统负荷建模的有关问题进行了系统的分析讨论,详细阐述了负荷建模的有关理论、方法和技术,并结合实例进行了具体的示例和应用。全书共分六章,包括绪论、电力负荷基本成分的模型、电力负荷的静态模型、电力负荷的机理动态模型、电力负荷的非机理动态模型和电力负荷的其他模型。

本书可供从事电力系统设计、运行和分析等方面工作的工程技术人员以及高等院校电力专业的研究生和教师阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统负荷建模/鞠平,马大强著. —2 版. —北京:
中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-6753-8

I. 电… II. ①鞠…②马… III. 电力系统-负荷(电)-建立
模型 IV. TM715

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 018427 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1995 年 6 月第一版

2008 年 5 月第二版 2008 年 5 月北京第二次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 15.375 印张 275 千字

印数 3001—6000 册 定价 30.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

电力系统负荷建模 (第二版)

第二版前言

本书第一版出版至今已经 10 年有余。10 余年来,电力系统负荷建模工作不断发展,时至今日已成为电力系统界的热点和重点领域。目前,人们逐步认识到电力系统负荷建模的重要性,掀起了新一轮负荷建模研究和实践的热潮。我国国家电网公司将负荷建模列为近期重点工作,各地电网公司也纷纷开展或者准备开展负荷建模项目。企业界的需求是电力系统负荷建模工作的动力所在,且近年来,有不少读者索购此书不得,也有读者建议修订此书内容。有鉴于此,修订本书已是刻不容缓。

本书第二版与第一版的不同主要体现在以下几个方面:

1. 鉴于电力系统负荷建模的方法和技术不断丰富,所以在第一章增加了相关内容。
2. 如果说第一版的内容还偏重学术化的话,第二版的内容则非常贴近工程实际,大部分内容都是经过工程应用验证的。
3. 电力负荷机理动态模型中已发展出新的综合负荷模型,考虑到配电网以及地方电源的需要,所以在第四章增加了相关内容。
4. 鉴于电压稳定研究的需要以及空调负荷比例日益增加,所以在第六章增加了相关的负荷模型内容。
5. 在附录中,专门收集汇总了国内外电力系统负荷模型参数数据,对于实际应用具有借鉴意义。
6. 各章都增加了新的实际应用,也删除了一些过时或者不适应实际需要的内容。另外,还删除了原来书中所列的数学基础知识,因为这方面内容在许多参考书中均可查阅。

俗话说,“十年磨一剑”。自从 1986 年师从韩祯祥、马大强先生开始负荷

建模研究，近10年出版第一版，又经10余年出版第二版。如今，恩师马大强先生已经仙逝，笔者不才担此修订重任，但愿没有辜负恩师的嘱托。

在研究过程和写作过程中，我的同事吴峰、韩敬东、陈谦等参与了部分工作，电力部门的许多同仁也给予了实践和应用机会，许多研究生亦参与了工作或者帮助编辑。本书成果受到了国家重点基础研究发展计划（973计划）和国家自然科学基金的资助。在此，一并表示感谢！

笔 者

2008年3月

第一版前言

电力负荷是电力系统的重要组成部分。在电力系统的设计、运行、分析中,如何正确地模拟负荷,建立负荷的模型,是国内外广大电力科学工作者深为关心的问题,由来已久。

由于负荷的复杂性、分散性和随机性等特点,建立完全精确的负荷模型,是一个不易解决的难题。但逐步建立更加接近真实情况的负荷模型,则是可能的,也是电力工作者所深感兴趣的问题之一。

多年来,电力科学工作者有关负荷问题的研究成果,大多数散见于各种期刊杂志,迄今未见汇辑成书,成为一本系统地介绍负荷问题的专著。笔者有鉴于此,特就自己近年来对负荷问题研究的成果,主要是新的建模方法,结合国内外负荷问题研究的大量资料,写成此书,希望对关心这一课题的广大电力工作者有所裨益。

本书共分五章。第一章绪论,包括有关建模的数学基本知识的介绍,以便于读者阅读。第二章介绍基本负荷成分的工作特性及模型。第三章介绍电力负荷的静态模型。第四章介绍负荷的机理动态模型。第五章介绍负荷的非机理动态模型。各章中均附有实际例题以帮助读者理解。

本书旨在起抛砖引玉的作用。限于笔者水平和实践经验,书中难免有不足或有待改进之处,尚希读者不吝指正。

本书由西安交通大学夏道止教授详细审阅,承提出许多宝贵意见,对提高本书质量大有裨益,深为感谢!本书的撰写及研究工作,历经数年,期间得到了许多同事及朋友的鼓励和帮助,也离不开家庭的支持。在此,一并表示衷心的感谢!

笔 者

1992年8月

电力系统负荷建模
(第二版)

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 绪论	1
第一节 电力负荷建模概述	1
一、电力负荷建模的基本概念(1) 二、电力负荷建模的重要性(2)	
三、电力负荷建模的困难性(2) 四、电力负荷建模的历史回顾(3)	
第二节 电力负荷模型的要求与选择	4
一、电力负荷模型的分类(4) 二、电力负荷模型的要求(4) 三、电力	
负荷模型的选择(6) 四、电力负荷模型的接入点(7)	
第三节 电力负荷建模方法	7
一、统计综合法(7) 二、总体测辨法(10) 三、故障仿真法(10)	
四、混合方法(11)	
第四节 系统辨识方法	14
一、最小二乘方法(14) 二、卡尔曼滤波方法(16) 三、非线性递推滤	
波方法(18) 四、基于优化的非线性辨识方法(23)	
第五节 电力负荷建模系统	26
一、数据的来源(26) 二、节点负荷建模装置(27) 三、负荷建模系统	
(30) 四、应用中的几个问题(32)	
第二章 电力负荷基本成分的模型	35
第一节 电阻型负荷	35
第二节 整流型负荷	36
一、放电式灯泡(36) 二、电弧炉(37) 三、换流器(38) 四、定电流	
自动调节器(39)	
第三节 电动机负荷	39

- 一、电磁暂态模型(40) 二、机电暂态模型(41) 三、机械暂态模型(45) 四、电压暂态模型(46) 五、几种动态模型的比较(46)
- 六、静态模型(48)

第三章 电力负荷的静态模型 52

第一节 几种常见的负荷静态模型 52

第二节 根据统计资料确定负荷静态模型 54

- 一、基本步骤(54) 二、几种常见负荷的静态特征系数(55) 三、同一母线上负荷静态特征系数的综合(57) 四、传输元件的影响(58)
- 五、算例(62) 六、应用实例(62)

第三节 根据稳态试验数据确定静态负荷模型 64

- 一、试验数据的获取(64) 二、由试验数据确定静态模型参数(64)
- 三、应用实例(67)

第四节 根据在线采集数据确定静态负荷模型初步 70

第四章 电力负荷的机理动态模型 73

第一节 电力负荷机理动态模型的结构 73

- 一、间接考虑配电网的机理动态模型(74) 二、直接考虑配电网的机理动态模型(78) 三、考虑电源的广义负荷模型(82)

第二节 根据统计数据确定机理动态模型 83

- 一、总体步骤(83) 二、同一母线上电动机的综合(84) 三、低压母线上负荷调查统计(90) 四、低压母线上负荷模型的综合(93) 五、考虑传输元件的影响(94) 六、应用实例(102)

第三节 间接考虑配电网的机理动态负荷建模 111

- 一、基本原理(111) 二、参数辨识策略(112) 三、基于梯度优化方法的参数辨识(114) 四、基于模拟进化方法的参数辨识(116) 五、应用实例(119)

第四节 直接考虑配电网的机理动态负荷建模 128

- 一、参数确定方法(128) 二、参数换算(129) 三、应用实例(132)

第五节 考虑电源的广义负荷建模 139

- 一、参数确定方法(139) 二、仿真算例(140) 三、应用实例(141)

第六节 机理动态负荷建模的一些对比 144

- 一、机理动态负荷模型结构的对比(144) 二、直接与间接考虑配电网

负荷模型的结果对比(145) 三、在线统计综合方法与在线总体测辨方法的结果对比(146)

第五章 电力负荷的非机理动态模型 148

第一节 非机理动态模型的概念 148

第二节 电力负荷的线性动态模型 149

一、一阶线性动态模型(149) 二、高阶线性动态模型(153) 三、线性动态模型的参数辨识(154) 四、线性动态模型不同形式之间的转换(158) 五、根据线性动态模型确定静态特征系数(164) 六、仿真算例(166) 七、实验室试验(170) 八、现场试验(172)

第三节 电力负荷的非线性动态模型 174

一、模型结构(174) 二、模型比较(176) 三、仿真算例(177) 四、应用实例(178)

第六章 电力负荷的其他模型 180

第一节 电压稳定与负荷特性 180

一、负荷特性的影响(180) 二、次输电和配电网络(180) 三、用电设备(183) 四、负荷无功补偿(187)

第二节 OLTC 变压器 189

一、OLTC 变压器(189) 二、线路压降补偿装置(190) 三、OLTC 串联(191) 四、OLTC 变压器等值电路(192) 五、分接头调节对并联补偿负荷的影响(192) 六、OLTC 控制系统(193)

第三节 空调负荷特性与模型 196

一、单台空调负荷动态特性与模型(196) 二、空调群负荷动态特性与模型(202) 三、含有空调的综合电力负荷建模基本步骤(208) 四、空调负荷比例的确定(209) 五、空调负荷对电压稳定的影响(211)

第四节 配电网的动态等值模型 213

一、配电网动态等值模型结构(213) 二、配电网动态等值方法(214) 三、算例(217)

附录 国内外电网负荷模型及参数汇总 220

一、国外电网负荷模型及参数(220) 二、我国电网负荷模型及参数(224)

参考文献 229

绪 论

第一节 电力负荷建模概述

一、电力负荷建模的基本概念

电力系统是由发电厂、输电网络及电力负荷三大部分组成的能量生产、传输和使用系统。发电厂是电能的发出者,这些电能经高压输电网及低压配电网被传送到各个用户,并由安装在用户处的用电设备所消耗。电力负荷就是这些用电设备的总称,其中有时也包括配电网络,并简称为负荷。

电力系统中有各式各样的负荷,可以从不同的角度进行分类。从用电主体来看,可以分为工业负荷、城市民用负荷、商业负荷、农业负荷及其他负荷。城市民用负荷主要是城市居民的家用电器负荷。商业和工业负荷是为商业与工业服务的负荷。农业负荷是农村所有负荷的统称,包括农村民用电、生产与排灌用电及农村商业用电等。其他负荷包括市政用电、公用事业用电、政府办公用电、铁路与电车用电,等等。

家用电器大致有如下几类:

(1) 照明电器:荧光灯、白炽灯。

(2) 备餐电器:电炉、电饭锅、电烤箱、烤炉等。

(3) 洗熨电器:洗衣机、电熨斗、烘干机等。

(4) 食品储存电器:电冰箱及其他冷冻设备。

(5) 调温电器:电风扇、空调等。

(6) 电视音响电器:收录机、电视机、录像机等。

工业负荷中电力设备种类更多,最主要的是感应电动机和同步电动机,其他还有整流型负荷、电弧炉、阻抗型负荷(如工厂照明),等等。配电网设备主要有配电线路、变压器和补偿电容等。

负荷吸收的有功功率(P)及无功功率(Q)是随着负荷母线的电压(U)和频率(f)的变动而变化的,这就是负荷的电压、频率特性。用于描述负荷特性的数学

方程称为负荷模型。建立负荷模型就是要确定描述负荷特性的数学方程的形式及其中的参数，简称为负荷建模。

二、电力负荷建模的重要性

电力负荷作为能量的消耗者，在电力系统的设计、分析与控制中有着重要影响。在进行电力系统分析时，不恰当地考虑负荷的模型，会使所得结果与系统实际情况不相一致，或偏乐观，或偏保守，从而构成系统的潜在危险或造成不必要的投资浪费。

目前，数字模型计算已成为电力系统设计、运行与控制中不可缺少的辅助手段。人们不但要求模型计算结果是定性正确的，而且要求模拟计算结果是定量精确的。大量的计算与试验结果表明：负荷模型对电力系统动态行为的定量模型结果影响很大，对潮流计算、短路计算、安全分析、电压稳定性等也有一定影响。在临界情况下，还有可能从根本上改变定性的结论。因此，改进负荷模型十分重要。

在过去的几十年间，发电机及输电网络的建模也取得了很大的发展。与之相比，负荷建模则发展较慢，显得有些不相匹配。显然，电力系统模型计算精度的提高与发电机、输电网络及电力负荷三大部分的建模都有密切的关系。负荷模型的精度较低阻碍了整个系统模拟精度的进一步提高，并降低了改善发电机及输电网络模型的价值。因此，改进负荷模型十分迫切。

现代电力系统稳定分析常需把仿真的时间跨度增大，令人们对低频率振荡、频率稳定、中长期稳定性等问题的兴趣日增。为此，更需研究相应的模型和算法，负荷模型当然也应考虑在内。

随着计算机和测量技术的迅速发展，计算机的容量和速度不断提高，电网相继建设 WAMS 系统。这就为采用更加精确、详细的负荷模型创造了条件。

总之，电力负荷是电力系统的重要组成部分，电力系统运行与控制中的大多数内容都与负荷问题有关。因此，负荷建模研究是电力系统运行与控制中的基础性课题，既具有非常重要的理论意义，又具有十分显著的工程实用价值。

三、电力负荷建模的困难性

诚然，建立每种用电设备的模型相对来说比较容易。但由于负荷是由成千上万个用电设备所组成的，各类用电设备的模型又不相同。在进行电力系计算和分析时，既无必要、也不可能对所有用电设备都逐个加以精确描述。人们所关心的是负荷群对外部系统所呈现的总体特性，因此，需要建立一个“总体”的负荷模型。这个模型应能代表某个地区（变电所）负荷群的总体外部特性。要达到这个目标，需克服一系列的困难，主要体现在下列几个方面：

1. 时变性及随机性

负荷特性是由组成负荷的各种用电设备的特性所决定的。负荷的组成与所在地区人民的生活水平、习惯、气候条件及工农业生产等情况有关。另外,各种用电设备的投切和负荷变化取决于用户本身的需要。显然,有些因素是随时间而变化的,有些因素甚至是随机的,这就导致了负荷特性的时变性和随机性。

2. 分布性

建模时所研究的负荷群包含很多用户,它们分布在很大的区域。这些用户不可能都直接连接于枢纽母线,而是通过配电网连接的。因此,配电网的结构及参数会影响负荷模型。

3. 复杂性

负荷建模与发电厂建模不一样,因为发电机的类型大同小异,而负荷则包含着各种类型的用电设备,各类用电设备的特性也不一致,因此负荷建模比发电厂建模要复杂。

4. 不连续性

当电压或频率低于(或高于)某一范围时,有些用电设备的保护装置会自动动作,电动机可能停转,某些用电设备的特性也会发生变化。这就是说,随着电压(或频率)的变化,负荷特性可能发生突变。

5. 多样性

根据所研究问题的性质及其对计算精度的要求不同,人们对负荷模型的要求也不同。即使在同一研究问题中,对处于同一系统中但在不同位置的负荷也可能采用不同的模型。

由于负荷建模的困难性及其重要性,这个问题被公认为电力系统中的难题之一,引起了广大电力科技工作者的关注。

四、电力负荷建模的历史回顾

正是由于电力负荷建模的重要性与困难性并重,使得电力负荷建模工作发展曲折。

20世纪50年代末~60年代中期,电力系统数字模拟计算处于发展初期。在这段时间内,负荷模型与其他电网元件一样,有过相当大的发展。人们不仅使用恒定阻抗、恒定电流、恒定功率来表示负荷,还提出了用静特性方程表示负荷,如多项式或幂函数方程。这些模型的参数在当时是定性估计的,由此得到的负荷模型尽管不准确,但相对于当时粗略的发电机等其他模型以及人们对电网计算的定性要求来说,还是相适应的。

20世纪60年代末~70年代初,发电机及其调节系统等模型都向前发展了一

步,但负荷模型却因其困难性而在原有的水平上停滞不前。为了打破负荷建模研究上的困难局面,1976年美国电力研究所(EPRI)制定了一个庞大的研究计划。根据这个计划,研究工作将在美国和加拿大同时开展。这项工作经过了严密计划和组织,在理论、现场试验以及数据采集系统的软、硬件开发和数据处理程序等几个方面全面展开。在这项工作的推动下,1980年前后的几年里,负荷模型的研究又有了新发展。在此期间,人们主要研究如何定量确定负荷模型的系数。

1982年10月,国际大电网会议(CIGRE-SC38-WG02)成立了有关负荷的工作小组,研究负荷建模及其动态特性。该小组认为,许多工程师对这个研究领域还比较陌生,而这个研究领域在电力系统分析中的重要性应该得到强调。1984年在芬兰召开的第八届电力系统计算会议(PSCC)将负荷建模列为重要课题。

近年来,人们进一步认识到电力负荷建模的重要性,掀起了新一轮负荷建模研究和实践的热潮。国家电网公司将负荷建模列为近期重点工作,各地电网公司也纷纷开展或者准备开展负荷建模项目,企业界的需求是电力负荷建模工作的动力所在。美国在2003年“8.14”大停电以后,联合调查组在其最终报告中指出,以往采用的负荷模型不合适。EPRI为此采用国际招标开展负荷建模的总体测辨方法的研究。尤为可喜的是,我国学者在这一研究领域作出了重要贡献。

第二节 电力负荷模型的要求与选择

一、电力负荷模型的分类

负荷模型可以从多方面进行分类。

(1) 从模型是否反映负荷的动态特性来看,可以分为静态的和动态的。

(2) 从模型导出的方式来看,可分为机理式和输入/输出式两种。

(3) 从模型是否线性化来看,可分为线性的和非线性的。

(4) 从模型是否与频率相关来看,可分为电压相关模型和频率相关模型,与电压及频率均相关的模型属于后一类。

负荷模型有多种,有必要对其进行选择。模型的选择主要取决于模型的应用目的及对精度的要求,同时还要考虑模型处理的简单性和参数获取的方便性。模型的精确性和简单性之间往往存在着矛盾,因而有必要在两者之间进行权衡。

二、电力负荷模型的要求

1. 负荷模型与暂态稳定

电力系统发生故障时,会造成发电机功率不平衡,从而引起功角及其他变量

的变化。负荷特性对暂态稳定动态计算以及功率极限的影响很大,可达 25% 左右。在故障初期电压一般下降,而频率却变化很小,此时只需计及负荷的电压特性。但在后期特别靠近发电机的地方,有可能要考虑负荷的频率特性。暂态稳定更大程度上取决于有功平衡,从而负荷的有功特性显得更为重要。对于典型的发电—受电系统,负荷特性的影响是明确的,也可以判断传统负荷模型所带来的究竟是偏保守还是偏乐观。但是,对于现代大型电力系统,有时很难明确区分发电—受电地点,而且不同地点负荷特性的影响往往互相关联。由于事先很难判断某种负荷模型的结果在全局上是偏保守还是偏乐观,所以有必要对那些重要负荷点都确定其特性。

从时间框架来说,暂态稳定为秒级。感应电动机负荷的转子绕组动态时间常数也在此范围,因此可能有必要考虑感应电动机负荷的动态特性。暂态稳定快速短暂的特点,对负荷数据采集和负荷特性参数的确定提出了很高要求。

2. 负荷模型与系统阻尼

电力系统发生区域间低频振荡时,不但电压会波动,而且频率也会明显变化,因而必须研究负荷的电压特性和频率特性及其影响。要注意的是,这时负荷特性的影响与暂态稳定时并不一致。

现代大型电力系统振荡的频率较低,一般在 0.1~2Hz 之间,振荡时间往往较长,可达数十秒。一般来说,负荷动态模态不分布在这一频率区间,所以负荷的一些动态参数对系统阻尼影响不大,可以采用准稳态负荷模型。但动态负荷所占比重会影响到总体静态特征系数,对系统阻尼具有显著影响,是一个重要参数。

3. 负荷模型与静态稳定

这里的静态稳定是指由于同步功率引起的小干扰下的功角稳定问题。定性和定量研究均表明,负荷特性对静态稳定的影响较小。因此,在静态稳定研究中可以采用简单的负荷模型。

4. 负荷模型与电压稳定

一般来说,上面涉及的功角稳定主要取决于有功平衡,而电压稳定更多地取决于无功平衡。所以,对于功角稳定有功负荷特性更重要些,而对于电压稳定则无功负荷特性更重要些。对于中长期电压稳定问题,电压有时特别低,所以必须考虑负荷特性的非连续问题、有载调压变压器(OLTC)以及电压控制装置。

5. 负荷模型与其他问题

在潮流计算中,对于运行点在额定值附近的正常情况,负荷特性影响很小,可不必考虑。反之,负荷特性对功率的计算结果影响显著,对节点电压影响小。

在短路计算中,短路点附近负荷中的电动机对计算有影响,可以作为电源考

虑。其余一般可以不考虑。

CIGRE 推荐的不同研究领域对负荷建模的要求汇总为表 1.1。笔者对其中某些栏目看法不太一致,例如,空间拓扑方面除电压稳定外常常可以简化,而电动机动态模型对于暂态稳定分析中靠近故障点时一般应该考虑。

表 1.1 电力系统对负荷建模的要求

研究领域		空间拓扑	静态模型		电动机模型	非线性非连续 ^②	变压器分接头
			电压	频率			
静态稳定 ^①		详细,除非远方负荷	必须	必须	必须	无关	无关
暂态稳定	附近 ^③	详细	必须	一般	不必,除非特别精确	如果严重干扰则必须	通常不必
	远方	可简化等值	不必	不必	似乎不必	考虑集结效应	不必
中期稳定		详细,除非远方负荷	必须	必须	一般	一般	不必
长期稳定	头 2s	如电压变化大则需要详细	一般	必须	一般	同空间拓扑	不必
	此后		一般	必须	不必	必须	如考虑电压作用则需要
电压控制		详细	必须	不必	电压不稳定时需要	不必	必须

注 ①Steady state stability, 主要指低频振荡。

②Non-linear discontinuous。

③指距离故障点的远近。

总的来说,负荷特性对电力系统的影响很大,必须重视。当缺乏精确负荷模型时,常常试图采用某种“乐观”负荷模型,这种做法对现代大型电力系统往往是危险的。因为负荷模型对现代大型电力系统的总体影响事先难以确定,而且在某种情况下“乐观”的负荷模型在另一种情况下却可能是“悲观”的。再者,不同问题对负荷模型的要求也不一样。因此,必须针对应用目的及其相应要求,确定电力负荷的实际模型。除此之外,别无他法。

三、电力负荷模型的选择

在选择电力负荷模型时,可参考下列原则:

- (1) 静态模型一般适用于以下情况: ①稳态问题(如潮流计算); ②长期动态过程; ③负荷以静态成分为主,如商业、民用负荷。而在下列情况下,宜采用动态模型: ①工业区; ②负荷中包含大量感应电动机; ③系统瓦解; ④自励磁及次同步扭振; ⑤为了改善稳定性而应用并联无功控制装置的研究等。

(2) 当负荷中成分比较单一时,选择机理式模型较好。这种模型物理概念明确,能反映负荷的内部物理现象。而当负荷成分比较复杂时,宜选用输入/输出模型。这种模型结构简单、通用性强,可以反映负荷的外部总体特性。

(3) 当动态运行点偏离稳态运行点较小时,可选用线性模型,如静态稳定。这种模型便于分析、计算量少。而当动态运行点偏离稳态运行点较大时,宜采用非线性负荷模型。这种模型精度较高、计算量较大。

(4) 电力系统中频率变化比较缓慢。因此,在短期动态过程分析中,可不计及负荷频率特性。而在长期动态过程分析中则要计及。

(5) 由于恒定阻抗(恒定电流、恒定功率)模型处理方便、节省计算时间及内存空间,所以这种模型仍将经常被采用,特别是在没有系统数据可供建模之用以及负荷影响较小的场合。

四、电力负荷模型的接入点

在实际应用中,负荷模型挂在哪一个电压等级也是需要选择的。应该说,接在越低电压等级上越能够反映负荷的实际特性,但这样会造成负荷节点过多,从而使计算任务加重。因此,要在准确性和可用性之间进行综合考虑。

对于我国目前的大部分系统来说,其主网架是500kV,骨干网架是220kV,所以负荷模型一般接在220kV变电站。随之而来的问题是挂在高压侧(220kV)还是中低压侧(比如110kV、35kV)。挂在高压侧的好处是简单,因为可以省掉中低压侧节点,但是这样却忽略了变压器的作用,这在电压稳定或者中长期动态过程分析时是不合适的。而且,高压侧能够采集到的电压扰动小于、也少于中低压侧。因此,应该将负荷模型挂在中低压侧。

对于某些特殊电网,其骨干网架是110kV的,则可以考虑挂在更低一级电压等级上。

第三节 电力负荷建模方法

时至今日,人们已提出了不少负荷建模方法,这些方法可以归纳为几类:①统计综合法(Component based methodology);②总体测辨法(Measurement based methodology);③故障仿真法(Simulation based methodology);④混合法(Hybrid methodology),本书将予以重点介绍。

一、统计综合法

(一) 传统统计综合法

统计综合法的基本思想是将负荷看成个别用户的集合,先将这些用户的电器

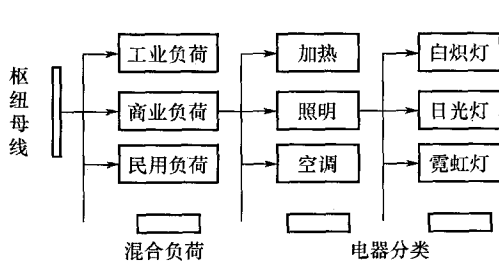


图 1-1 统计综合法建模过程示意图

分类，并确定各种类型电器的平均特性，然后统计出各类电器所占的比重，最后综合得出总体的负荷模型，如图 1-1 所示。

在采用这类方法时，需要 3 种数据资料：①负荷组成及各类负荷所占的比重；②配电网络的参数；③各类负荷的平均特性。一般来说，

后两种数据变化较小，而第一种数据变化较大。

据文献报道：①有功功率的电压特性系数随运行条件的变化较小，从而使综合得到的有功电压特性与实际比较吻合，而无功功率的电压特性系数则变化较大，使综合得到的无功电压特性与试验结果相差较大；②综合得到的频率特性与试验结果相差较大；③对负荷动态特性也不能很好地模拟。

统计综合法的优点是物理模型比较清晰、概念明确，便于人们定性了解负荷特性。但这种方法存在着下列困难：

(1) 需事先统计成千上万个用户的负荷组成及参数。这种统计工作不但耗时费力，而且难以统计准确。尤其是各类负荷的容量和实际功率并不一致，采用容量比来代替功率比误差可能较大，因为有个同时率的问题。

(2) 统计综合工作不可能随时进行，甚至不能经常进行。而随着时间的推移，实际负荷情况可能发生变化，尤其是各种负荷所占的比例、是否投入使用随时间变化明显。

(3) 对用户和设备分类繁多，负荷成分往往比较复杂，包含的用电设备可达数十种^[4]。若将所有这些类型的负荷都考虑进去，则因各类用电设备的模型不同，从而导致总的模型难以应用。随着负荷成分的日益复杂化，这个问题将更加突出。

美国电力研究院 (EPRI) 已经资助过多个负荷建模研究项目，最终成果即为综合负荷特性的计算机分析程序 (LOADSYN)^[3~5]。这套软件的理论部分是由美国 Texas 大学的 Arlington 分校负责的，GE 公司和其他电力公司负责在电网上进行实验验证。现在许多国家的电力部门都采用这类办法。其建模示意图如图 1-2 所示，实际上与图 1-1 是类似的。负荷电压和频率灵敏度的静态模型表示为如下指数形式

$$P = P_0 \left[\frac{U}{U_0} \right]^{p_u} \left[\frac{f}{f_0} \right]^{p_f} \quad (1-1)$$