

电力负荷的数学模型 与建模技术

汤涌著



科学出版社

电力负荷的数学模型 与建模技术

汤涌 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书阐述了用于电力系统数字仿真的负荷模型和负荷建模技术,详细介绍了负荷模型和建模技术的最新研究成果。全书共分10章,包括:绪论、电力负荷元件模型、电力系统仿真计算中的负荷模型、统计综合法负荷建模、考虑配电网的综合负荷模型的建模、总体测辨法负荷建模、故障拟合法负荷建模、东北电网大扰动试验、我国电网综合负荷模型建模研究、负荷模型对仿真的影响与建模原则。

本书可供从事电力系统调度运行、规划和科学研究的工程技术人员以及高等院校电气工程专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力负荷的数学模型与建模技术 / 汤涌著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033157-1

I. 电… II. 汤… III. 电力系统-负荷模型; 数学模型-建立模型
IV. TM306

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 275666 号

责任编辑:汤 枫 / 责任校对:张怡君
责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年3月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:336 000

定 价: 80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在过去的几十年间,发电机及其控制系统和输电网络的建模技术已取得很大的发展。与之相比,负荷建模则发展较慢,显得不相匹配。显然,电力系统仿真计算精度的提高与发电机及其控制系统、输电网络及电力负荷的模型都有密切的关系。负荷模型的粗糙阻碍了电力系统仿真精度的进一步提高。因此,负荷模型的研究和建模方法的改进是迫切需要的。但是,由于电力负荷的复杂性、分散性和随机性等特点,要建立完全精确的负荷模型,几乎是不可能的。但逐步建立更加接近真实的工程实用负荷模型,使之更加合理、有效则是可能的,也是许多研究者和工程技术人员努力的目标。

负荷建模研究是一个既具有理论深度又直接面向实际应用的课题,在理论研究和工程应用方面取得了许多探索性研究成果,在电力系统规划与运行,以及事故分析等领域中发挥了一定作用。

但是,在当前的电力系统分析计算中,负荷模型的选取通常按照一定的经验选定某种常见的负荷模型(如 ZIP 模型、感应电动机+恒阻抗模型等),并定性确定模型参数,然后通过对本网内发生的典型事故进行故障拟合,不断地对负荷模型进行修正。

然而,随着我国电网快速发展,电源构成多样化,电网规模扩大、结构复杂,安全稳定运行压力越来越大,对仿真精度的要求也越来越高。工程实践经验表明,负荷模型对仿真计算的结果有重要影响。因此,按照经验确定负荷模型的方法已变得不再适应。

国家电网公司十分重视负荷模型的研究工作,2000 年以来组织开展了大量的科研工作,2003 年成立了国家电网公司负荷模型研究工作组,2004~2005 年,在东北电网进行了四次以验证负荷模型为目的的人工三相接地短路大扰动试验,负荷模型研究工作取得了阶段性成果。2007 年,国家电网公司再次设立了重大科技项目“负荷模型参数深化研究及适应性分析”,旨在根据国家电网公司科技项目“电力系统计算分析中的负荷模型研究”和“大区电网负荷测试及模型完善研究(东北电网大扰动试验)”的研究成果,积极借鉴国内外负荷模型与建模技术的最新研究成果,在现有负荷模型基础上深化研究更加适应于我国电网的负荷模型及其参数,以提高电网仿真计算的准确度,从而提高电网规划与运行的安全性和经济性。

本书是这些科技项目研究成果的总结。中国电力科学研究院作为项目的技术负责单位,全面参与了项目的研究工作,东北电网公司、华北电网公司、华中电网公司、西北电网公司、浙江省电力公司、河海大学、华北电力大学等单位参与了项目研究,中国电力科学研究院项目组成员张东霞、张红斌、侯俊贤、朱方、蒋宜国、赵红光、蒋卫平、张文朝、赵兵、王琦、邱丽萍等参与了项目研究。在此表示衷心感谢!

限于作者水平和实践经验,书中难免有不足或有待改进之处,尚希读者不吝指正。

汤 涌

2011年11月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力负荷建模的意义	1
1.2 电力负荷建模的基本方法	1
1.3 国内外负荷建模技术的发展与现状	3
参考文献	6
第 2 章 电力负荷元件模型	9
2.1 电力负荷构成	9
2.2 常用电力负荷元件的模型	10
2.2.1 商业、居民用电阻加热器	10
2.2.2 热泵式加热器	10
2.2.3 空调负荷	12
2.2.4 家用电器	14
2.2.5 照明负荷	18
2.2.6 工业电动机	21
2.2.7 灌溉用电动机	28
2.2.8 电厂辅助设备	29
2.2.9 钢厂(电弧炉)	29
2.3 基于动模试验的常用静态负荷元件建模	34
2.3.1 白炽灯模型	35
2.3.2 荧光灯(电子镇流器)模型	35
2.3.3 钠灯模型	36
2.3.4 液晶电视模型	37
2.3.5 台式电脑(CRT 显示器)模型	38
2.3.6 笔记本电脑模型	39
2.3.7 电磁炉模型	40
2.3.8 基于短路试验的静态模型验证	41
2.3.9 新建模型与典型模型对比	43
2.4 感应电动机模型参数计算	43
2.4.1 感应电动机模型	44

2.4.2	感应电动机模型参数算法	44
2.4.3	算法验证分析	47
2.5	配电系统元件的数学模型	52
2.5.1	配电线路的模型	52
2.5.2	配电变压器及 LTC 变压器的模型	53
2.5.3	配电系统无功补偿装置的模型	56
	参考文献	59
第 3 章	电力系统仿真计算中的负荷模型	63
3.1	负荷模型的表示方法	63
3.2	静态负荷模型	63
3.2.1	幂函数模型	63
3.2.2	多项式模型	64
3.3	动态负荷模型	65
3.3.1	感应电动机负荷模型	65
3.3.2	非机理动态负荷模型	66
3.4	电力系统计算分析中常用的负荷模型	67
3.4.1	国外电网常用的负荷模型	67
3.4.2	IEEE 推荐的负荷模型	69
3.4.3	美国 WECC 的综合负荷模型	69
3.4.4	我国电网常用的负荷模型	71
3.4.5	现有综合负荷模型的不足和缺陷	71
3.5	我国现用负荷模型中感应电动机参数的确定	73
3.5.1	感应电动机负荷模型典型参数	73
3.5.2	感应电动机负荷模型中配电网系统电抗	73
3.5.3	目前我国配电网电抗的算例	74
3.5.4	电动机模型参数选择的建议	79
3.6	考虑配电网的综合负荷模型	79
3.6.1	220kV 变电站的供电系统	79
3.6.2	考虑配电网的综合负荷模型的结构	80
3.6.3	考虑配电网的综合负荷模型在程序实现过程的初始化步骤	81
3.6.4	考虑配电网的综合负荷模型的特点	81
	参考文献	82
第 4 章	统计综合法负荷建模	84
4.1	统计综合法的基本原理	84
4.1.1	负荷统计综合的基本方法	84

4.1.2	负荷构成与特性参数	85
4.1.3	LOADSYN 程序给出的美国电网的负荷分类及其主要负荷元件	87
4.2	负荷构成特性调查方法与应用	89
4.2.1	负荷调查的主要工作流程	89
4.2.2	分类方法的原则和依据	90
4.2.3	编制普查表	91
4.2.4	220kV 变电站负荷数据调查和修正	92
4.2.5	确定典型变电站并编制典型站点详细调查表	93
4.3	静态负荷模型的统计综合方法	93
4.3.1	静态负荷模型的一般形式	93
4.3.2	有功负荷中电压相关参数的确定	94
4.3.3	无功负荷中电压相关参数的确定	95
4.3.4	频率相关参数的确定	96
4.4	一般形式静态负荷模型转换为特定形式的方法	96
4.4.1	计算方法	96
4.4.2	计算有功负荷参数	97
4.4.3	计算无功负荷参数	98
4.5	动态负荷模型的统计综合方法	99
4.5.1	LOADSYN 的感应电动机综合方法	99
4.5.2	感应电动机综合方法的仿真分析	101
4.5.3	感应电动机分组方法的改进	104
4.5.4	电动机参数综合方法的改进	105
4.6	统计综合法负荷建模软件的基本流程	109
	参考文献	110
第 5 章	考虑配电网的综合负荷模型的建模	111
5.1	配电网对统计综合法负荷建模的影响	111
5.1.1	配电网	111
5.1.2	负荷模型中配电网的影响分析	111
5.1.3	配电网的模拟方法	112
5.1.4	配电网等值电抗的近似计算方法	112
5.2	配电网及无功补偿等值方法	114
5.3	配电网等值阻抗成分分析	116
5.4	静态负荷等值	117
5.5	感应电动机的分群	118
5.6	感应电动机群等值算法	126

5.6.1	单机等值算法	126
5.6.2	等值算法对机械负载转矩-滑差特性的考虑	129
5.6.3	双机等值算法	129
5.6.4	等值算法仿真验证	131
5.7	考虑配电网络的感应电动机负荷模型聚合方法	134
5.7.1	考虑暂态的感应电动机模型及典型参数	134
5.7.2	聚合感应电动机电气参数计算	135
5.7.3	聚合感应电动机滑差计算	137
5.7.4	聚合感应电动机惯性时间常数计算	137
5.7.5	配电网络系统阻抗计算	138
5.7.6	计算实例	138
5.8	实际负荷站点综合负荷模型仿真对比	140
5.8.1	综合负荷模型建模的数据基础	140
5.8.2	综合负荷模型仿真分析	142
	参考文献	144
第6章	总体测辨法负荷建模	146
6.1	电力系统负荷模型辨识原理	146
6.1.1	静态负荷模型辨识原理	146
6.1.2	动态负荷模型辨识原理	147
6.1.3	负荷模型参数辨识方法	149
6.2	感应电动机负荷模型参数辨识	150
6.2.1	感应电动机负荷模型参数辨识实践中存在的问题	150
6.2.2	系统灵敏度分析理论	151
6.2.3	感应电动机负荷模型参数易辨识性及辨识策略	153
6.3	考虑配电网络的综合负荷模型的参数辨识	157
6.3.1	考虑配电网络的综合负荷模型的可辨识性	157
6.3.2	简化综合负荷模型的参数确定方法	157
6.3.3	计及配电网阻抗和无功补偿的完整综合负荷模型的参数辨识	163
6.4	总体测辨法负荷建模系统	174
6.4.1	总体测辨法负荷建模系统功能	174
6.4.2	总体测辨法建模系统中的模型	175
	参考文献	175
第7章	故障拟合法负荷建模研究	176
7.1	故障拟合法负荷建模	176
7.1.1	故障拟合法建模步骤	176

7.1.2	故障拟合法建模的基本内容	177
7.1.3	收集电网扰动故障并建立故障运行方式	178
7.1.4	对扰动故障资料的可用性评价	179
7.1.5	仿真结果与故障实测结果一致性判别原则	179
7.2	国外负荷模型校核研究情况	179
7.2.1	瑞典电网 1983 年 12 月 27 日事故模拟	180
7.2.2	WSCC 1996 和 2000 年两次停电事故仿真和模型校核研究	180
7.2.3	国外研究总结和分析	183
7.3	国内负荷模型校核研究情况	183
7.3.1	主要研究工作	184
7.3.2	研究成果简介	184
7.3.3	主要结论和存在问题	186
7.4	人工接地短路试验方法	187
7.4.1	扰动试验及负荷模型校核研究步骤和方法	187
7.4.2	分析和总结	189
7.5	综合负荷模型有效性验证	190
7.5.1	收集电网扰动故障	190
7.5.2	对扰动故障的模拟及可用性评价	191
7.5.3	基于扰动故障对综合负荷模型的验证和校核	193
	参考文献	196
第 8 章	东北电网大扰动试验	198
8.1	试验概况	198
8.2	试验意义	198
8.3	试验过程	199
8.3.1	2004 年大扰动试验	199
8.3.2	2005 年大扰动试验	200
8.4	试验的测试	201
8.4.1	2004 年大扰动试验	201
8.4.2	2005 年大扰动试验	201
8.4.3	试验数据的评估	201
8.5	试验的运行方式	202
8.5.1	2004 年大扰动试验	202
8.5.2	2005 年大扰动试验	202
8.6	试验测试结果	203
8.6.1	故障切除时间	203

8.6.2	短路阻抗	203
8.6.3	录波曲线	204
8.6.4	小结	204
8.7	励磁系统模型参数和小机组的调整	204
8.7.1	励磁系统模型参数的调整	205
8.7.2	小机组调整	205
8.8	基于各种负荷模型的仿真计算与实测对比	206
8.8.1	计算条件	206
8.8.2	仿真曲线示例	208
8.8.3	仿真结果分析	212
8.9	考虑配电网络的综合负荷模型拟合参数与仿真分析	213
8.9.1	综合负荷模型的拟合参数	213
8.9.2	综合负荷模型拟合参数的说明	213
8.9.3	综合负荷模型的仿真曲线	214
8.9.4	采用综合负荷模型时暂态电压跌落计算曲线	226
8.9.5	小结	229
8.10	综合负荷模型参数灵敏度分析	229
8.10.1	配电网系统电抗	229
8.10.2	配电网系统电阻	230
8.10.3	静态负荷功率因数	230
8.10.4	电动机负载率	231
8.10.5	静态负荷构成	231
8.10.6	小结	231
8.11	结论和建议	232
	参考文献	233
第9章	我国电网综合负荷模型建模研究	236
9.1	各区域电网综合负荷模型建模情况	236
9.1.1	华北电网综合负荷模型建模	236
9.1.2	西北电网综合负荷模型建模	240
9.1.3	华中电网综合负荷模型建模	243
9.1.4	东北电网综合负荷模型建模	246
9.1.5	浙江电网综合负荷模型建模	249
9.2	综合负荷模型应用管理细则	250
9.2.1	建立综合负荷模型数据库	250
9.2.2	规划负荷站点的综合负荷模型应用细则	250

9.2.3 已投入运行中的负荷站点的综合负荷模型应用细则·····	251
参考文献·····	251
第 10 章 负荷模型对仿真的影响与建模原则 ·····	252
10.1 负荷模型对电力系统仿真计算的影响·····	252
10.1.1 负荷模型对潮流计算的影响·····	252
10.1.2 负荷模型对短路电流的影响·····	253
10.1.3 负荷模型对暂态稳定计算的影响·····	253
10.1.4 负荷模型对小扰动动态稳定计算的影响·····	254
10.1.5 负荷模型对电压稳定计算的影响·····	256
10.1.6 负荷模型对频率稳定的影响·····	257
10.1.7 综合负荷模型参数对系统稳定特性的影响·····	257
10.2 负荷建模的基本原则·····	259
10.3 负荷建模的基础性工作·····	260
10.4 负荷建模的基本方法·····	260
参考文献·····	261

第 1 章 绪 论

1.1 电力负荷建模的意义

电力系统数字仿真已成为电力系统规划设计、调度运行和试验研究的主要工具,电力系统各元件的数学模型以及由其构成的全系统数学模型是电力系统数字仿真的基础,模型的准确与否直接影响着仿真结果和以此为基础的规划与运行的决策方案。仿真所用模型和参数是仿真准确性的重要决定因素之一。目前发电机及其控制系统和输电网络的模型已较成熟,相对而言,工程实践中所用的负荷模型仍较简单,往往从基本物理概念出发,采用统一的典型模型和参数。

大量研究结果表明,负荷特性对电力系统分析计算结果具有重要影响。不同的负荷模型对电力系统的事后潮流计算、短路电流计算、暂态稳定、动态稳定、电压稳定和频率稳定的仿真计算都具有不同程度的影响,在严重情况下,不同的负荷模型可能会使计算结果发生质的变化。以往,当缺乏详细负荷模型时,在仿真计算中常常试图采用某种“保守”的负荷模型,但这种做法是有风险的。由于负荷模型对现代复杂电力系统的总体影响事先难以预计,在某种情况下“保守”的负荷模型在另一种情况下可能产生“冒进”的结果,并且不同的问题对负荷模型的要求也不尽相同。因此,必须建立和推广符合实际的负荷模型。

随着我国特高压大电网的建设、新能源发电和新型电力电子设备的引入,我国电网的规模不断扩大,复杂程度不断增加,电力系统的短路电流、动态稳定性及电压稳定性问题更加突出,负荷模型对电力系统仿真计算结果的影响已变得不容忽视。在“东北-华北交流联网”等多项工程项目的研究中,负荷模型和参数对电力系统稳定性仿真计算结果的影响变得非常突出,影响了仿真计算结果的可信度,给决策方案的取舍带来了困难,也因此受到了广泛重视。为了解决这一问题,必须研究适应于我国电网实际的负荷模型和建模方法。

1.2 电力负荷建模的基本方法

目前,电力负荷建模方法可以归纳为三类:统计综合法(component-based modeling approach)、总体测辨法(measurement-based modeling approach)和故障拟合法(fault-based modeling approach)。在过去的 20 年中,电力负荷建模技术基本上是沿着统计综合法和总体测辨法这两条道路不断发展和完善的,并已分别取

得许多可喜成果。在实际工程中则更多地采用故障拟合法。

IEEE 和 CIGRE 设有负荷建模研究的专门小组,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。北美主要使用的负荷建模软件包,是在美国电力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)委托美国得克萨斯州大学(The University of Texas)和美国通用电气公司(General Electric Company, GE)所作的大量统计负荷组成基础上,用统计综合法形成的软件包。它的结果并不精确,但经过电力公司在实际运行中不断修正,现在每个电网基本形成了自己的负荷静特性模型,同时仍在实际运行中不断修正,力求更加符合实际。澳大利亚采用了总体测辨法(主要靠在现场试验)来建立负荷模型^[1]。总之,国际上许多电力公司都在开展这方面的研究,力求采用基本符合自己电网实际的负荷模型。

多年来,我国各大区电网在电力系统分析计算时,负荷模型的选取通常按照一定的经验选定某种常见的负荷模型(如 ZIP 模型、感应电动机+恒定阻抗模型等),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,不断地对负荷模型进行修正。随着我国电网的发展,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,负荷对仿真计算的结果会产生重大影响。因此,按照经验确定负荷模型的方法已不能满足要求。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有关,造成了不同地区之间负荷模型及参数的差异性。因此,现有的负荷模型和参数很难准确描述负荷动态特性,负荷模型已经成为提高电力系统仿真准确度的瓶颈。

1) 统计综合法^[2]

统计综合法首先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、空调负荷等)的数学模型,然后在一些负荷点上统计某些典型时刻(如冬季峰值负荷、夏季峰值负荷等)各种负荷的组成,即每种典型负荷所占的百分比,以及配电线路和变压器的数据,最后综合这些数据得出该负荷点的负荷模型。美国 EPRI 的 LOADSYN 软件为其中的代表。

2) 总体测辨法^[3~9]

20 世纪 80 年代以来,随着系统辨识理论的日趋丰富与完善,加之计算机数据采集与处理技术的发展,一种新的负荷建模方法——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受到电力负荷建模工作者的关注。该方法的基本思想是将综合负荷作为一个整体,先从现场采集测量数据,然后根据这些数据辨识负荷模型的结构和参数,最后,用大量的实测数据验证模型的外推、内插的效果。

3) 故障拟合法

长期以来,在工程实际中应用最广泛的是基于故障拟合的负荷模型建模方法。通常的做法是:参照一定的经验(如负荷的基本构成、系统的运行特性等)首先选定某种常见的模型,并定性地选定模型中的参数,随后通过对典型故障的录波数据或专门的扰动试验得到的系统响应曲线进行仿真对比分析,在保证系统其他动态元

件的模型和参数基本准确的条件下,不断调整负荷模型和参数,使仿真结果尽量接近系统的实际动态过程,从而得到适用于实际电网的负荷模型和参数。

美国西部系统协调委员会(Western Systems Coordinating Council, WSCC)在对1996年8月美国西部电力系统大面积停电事故的仿真分析的基础上,采用故障拟合法,提出了WSCC系统仿真计算中负荷模型的修改意见^[10]。

应该指出的是,故障拟合法是一种系统性的建模方法,并不针对具体的负荷元件或一个变电站的负荷进行建模,主要根据系统受扰动后的动态过程,对负荷的模型和参数进行调整,以获得较好的仿真精度。因此故障拟合法更适用于电力系统仿真模型参数验证与校核。

1.3 国内外负荷建模技术的发展与现状

早在1935年就提出了确定电力系统负荷与电压扰动之间的关系要求。自此之后也发表了很多关于描述负荷与电压和频率关系的文献,如文献[11]~[19]。这些文献一致指出了负荷模型的合理描述对电力系统规划、设计、运行的重要性。

随着电力系统的发展,使用建立最“保守”的负荷特性的传统负荷建模方法已经不再适应,尤其是在考虑电力系统运行工况更接近安全稳定极限的情况下,需要建立更符合实际的负荷模型。

20世纪60~70年代,由于数字电子计算机及控制理论的发展,电力系统这门工程学科焕发了新的活力。人们大量采用计算机进行复杂电力系统的仿真计算,与其他系统元件模型一样,负荷建模工作有了一定的进展,除提出了最常用的恒定阻抗、恒定电流和恒定功率负荷模型以外,还在计算中采用了感应电动机、多项式和幂函数等负荷模型。这些负荷模型参数的确定当时主要靠定性估计,并辅以静态函数拟合,系统辨识理论尚处在发展阶段,还没有广泛引入到电力负荷建模中来。

20世纪70年代以来,美国EPRI一直致力于统计综合法负荷建模的研究。早年的研究工作在加拿大和美国同时展开,美国的得克萨斯州大学负责建模方法的研究,GE公司负责通过现场试验对建模方法进行评价。该方法是在实验室里确定每种典型负荷(如荧光灯、电冰箱、工业电动机、空调等)的平均特性方程;然后在一个负荷点上统计一些特殊时刻(如夏季峰值负荷、冬季峰值负荷)负荷的组成,即每种典型负荷所占的百分比,以及配电线路和变压器的数据,最后综合这些数据得出该负荷点的负荷模型。经过多年的努力,发表了许多研究报告^[2,20,21],并且开发了到目前为止统计综合法负荷建模中最具影响的软件包EPRI LOADSYN。该软件使用时需提供三种数据:负荷组成,即各类负荷(民用、商业、工业等)在总负荷中所占的百分比;各类负荷中各用电设备(荧光灯、电动机、空调等)所占比例;各用电设备的平均特性。但由使用者必须提供的只有第一种数据,后两种数据可以采用软件包提供的典型值。这给软件包的使用者提供了一定的方便。

IEEE 负荷建模工作组自 1982 年成立以来,对归纳总结负荷建模的研究成果和指导负荷建模的研究发挥了重要作用。IEEE 1993 年的报告^[11]统一了负荷建模中的许多术语和定义,总结了不同类型负荷、不同分析目的的负荷模型的构造技巧和需要考虑的重要方面。1995 年 2 月的报告^[22]列出了许多有价值的负荷模型以及重要的文献和著作,以期望推动负荷建模的进一步研究和实际应用,同时也作为负荷建模标准化的补充。1995 年 8 月的报告^[23]推荐了用于电力系统潮流计算和动态仿真的标准化负荷模型。

20 世纪 80 年代前后,随着系统辨识理论的发展以及计算机数据采集与处理技术的发展,产生了一种新的负荷建模方法——总体测辨法。该方法的基本思想是将负荷群作为一个整体,首先采集现场进行的人工扰动试验或系统随机扰动的测量数据,然后用现场采集的数据辨识负荷站点的总体负荷模型的结构和参数,最后用大量的实测数据对所辨识的负荷模型进行验证。这种方法就是根据现场测量的数据和辨识确定负荷有功功率和无功功率与电压和频率之间的关系表达式。中国、美国、加拿大等国相继研制了电力负荷特性记录仪用来记录负荷扰动数据,并以这些测量数据作为依据和最终检验标准开展负荷建模的研究,不断吸收系统辨识理论的最新成果,推动负荷建模工作不断向前发展,发表的论文如文献[3]~[5]、[12]、[24]~[30]。虽然这种方法具有固有的实用特性,但是需要在现场安装大量精确的测量装置,加之实际系统中很少发生可用于负荷建模的较大扰动事件,因而该方法的广泛应用受到了限制。

长期以来,在工程实际中应用最广泛的则是基于事故仿真的负荷模型建模方法。美国 WSCC 在对 1996 年 8 月美国西部电力系统大面积停电事故的仿真分析的基础上,采用故障拟合法,提出了 WSCC 系统计算分析中负荷模型的修改意见。1996 年 8 月 10 日和 2000 年 8 月 4 日发生在美国 WSCC 的两次停电事故,促使由 WSCC 更名的美国西部电力协调委员会(Western Electricity Coordinating Council, WECC),于 2002 年用包含 20%~30% 电动机负荷的临时负荷模型(interim load model)替代纯静态负荷模型。自此 WECC 成立了负荷建模工作组,对负荷模型和建模技术开展持续深入的研究。自 1990 年以来,美国加利福尼亚(California)南部地区发生多次故障后电压缓慢恢复的事件,相似的事件同样发生于佛罗里达(Florida)电力和照明公司,而采用过渡负荷模型依然无法模拟出这些故障后母线电压缓慢恢复的特性,于是 2006 年 WECC 负荷模型工作组提出了更为复杂的模型结构^[31,32]。

国内从 80 年代中期就开始了负荷建模的研究工作,主要的研究单位有中国电力科学研究院、华北电力大学、河海大学、清华大学、湖南大学、郑州大学、上海交通大学和西安交通大学等高校和科研单位。

华北电力大学和河海大学在基于现场测量数据对负荷特性进行建模方面展开了大量的研究工作,并取得了很多的研究成果。华北电力大学贺仁睦教授领导的

研究团队长期从事负荷模型的实测辨识和模型的有效性研究。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辨测系统,经过现场运行得到了大量的数据,并通过对负荷特性的分类和综合得到了具有统计规律的负荷特性模型。2002年1月又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的实测辨识。

20世纪80年代以来,河海大学鞠平教授领导的研究团队一直开展着负荷建模的研究工作,与河南省电力调度中心、福建省电力调度等单位合作进行了负荷特性参数辨识的研究,建立了河南电网和福建电网的负荷特性数据库。针对海南电网实测数据进行了稳定性分析,发现不同季节、不同时间段的负荷动态参数对电网稳定极限的影响不同。

国家电网公司十分重视负荷模型的研究工作,2000年以来组织了大量的科研工作。2003年成立了国家电网公司负荷模型研究工作组。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”也于2003年立项,中国电力科学研究院在国家电网公司支持和各区域电网公司的配合下,完成了上述项目的研究工作,取得了负荷建模研究领域的重要成果,提出了考虑配电网络的综合负荷模型(synthesis load model, SLM)^[33,34]。2004年和2005年在东北电网进行了四次人工三相接地短路大扰动试验,为负荷建模工作提供了宝贵的大扰动实测数据。中国电力科学研究院根据对东北大扰动事故的仿真分析和模型校验结果,提出了基于考虑配电网络的综合负荷模型的拟合参数,最终应用该模型基本重现了扰动过程中系统的动态行为。考虑配电网络的综合负荷模型从模型结构上更符合实际,因为它考虑了配电网络、无功补偿、小机组的影响,而且模型结构的物理意义也非常清晰。

2007年,国家电网公司将“负荷模型参数深化研究及适应性分析”项目列为2007~2008年度国家电网公司的7个重大科技项目之一,并对中国电力科学研究院、华北电网有限公司、华中电网有限公司、东北电网有限公司分别下达了“负荷模型参数深化研究及适应性分析”、“华北电网负荷模型参数深化研究及适应性分析”、“华中电网负荷模型参数深化研究及适应性分析”、“东北电网负荷模型参数深化研究及适应性分析”专项任务。该专项任务旨在根据国家电网公司科技项目“电力系统计算分析中的负荷模型研究”和“大区电网负荷测试技术及模型完善研究(东北电网大扰动试验)”项目的研究成果,积极借鉴国内外负荷模型参数最新研究成果,在现有的负荷模型基础上深化研究更加适应于华北电网、华中电网、东北电网的负荷模型及其参数,以提高电网仿真计算的准确度,从而提高电网运行的安全性和经济性。

参 考 文 献

- [1] David J H. Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1):166~176.
- [2] General Electric Company. Load modeling for power flow and transient stability computer studies[R]. New York:EPRI, 1987.
- [3] 鞠平,马大强. 电力负荷的新模型及动静态参数的同时辨识[J]. 控制与决策,1989,2:20~23.
- [4] 鞠平,李德丰,陆小涛. 电力系统非机理负荷模型的可辨识性[J]. 河海大学学报,1999, 27(1):16~19.
- [5] El-Ferik S, Malhame R P. Correlation identification of alternating renewal electric load models [C]. Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control, Tucson, 1992:566~567.
- [6] O'Sullivan J W, O'Malley M J. Identification and validation of dynamic global load model parameters for use in power system frequency simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2):853~857.
- [7] 章健,贺仁睦,韩民晓. 电力负荷的 $dq0$ 坐标变量模型及模型回响辨识[J]. 中国电机工程学报,1997,17(6):377~381.
- [8] 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):153~154.
- [9] El-Ferik S, Hussain S A, Al-Sunni F M. Identification and weather sensitivity of physically based model of residential air-conditioners for direct load control: A case study [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(8):997~1005.
- [10] Pereira L, Mackin P, Davies D, et al. An interim dynamic induction motor model for stability studies in the WSCC [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1108~1115.
- [11] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Load representation for dynamic performance analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2): 472~482.
- [12] IEEE Computer Analysis of Power Systems Working Group of the Computer and Analytical Methods Subcommittee—Power System Engineering Committee. System load dynamics—Simulation effects and determination of load constants [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1973, 92:600~609.
- [13] Mauricio W, Semlyen A. Effect of load characteristics on the dynamic stability of power systems [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, 92:2295~2304.
- [14] Ueda R, Takata S. Effects of induction machine load on power system [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100:2555~2562.
- [15] Omata T, Uemura K. Aspects of voltage responses of induction motor loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4):1337~1344.

- [16] 张东霞, 汤涌, 朱方, 等. 基于仿真计算和事故校验的电力负荷模型校验及调整方法研究[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 24~31.
- [17] Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 967~979.
- [18] Pereira L, Kosterev D, Mackin P, et al. An interim dynamic induction motor model for stability studies in the WSCC [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1108~1115.
- [19] 汤涌, 侯俊贤, 刘文焯. 电力系统数字仿真负荷模型中配电网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.
- [20] General Electric Company. Determining load characteristics for transient performances [R]. New York; EPRI, 1981.
- [21] General Electric Company. Determining load characteristics for transient performances [R]. New York; EPRI, 1979.
- [22] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 523~538.
- [23] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1302~1313.
- [24] 马进, 贺仁睦. 负荷模型的泛化能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 29~35.
- [25] 张红斌, 汤涌, 李柏青. 差分方程负荷模型参数分散性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 3~5.
- [26] Sabir S A Y, Lee D C. Dynamic load models derived from data acquired during system transients [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101: 3365~3372.
- [27] Dovan T, Dillon T S, Berger C S, et al. A microcomputer based on-line identification approach to power system dynamic load modeling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 2(3): 529~536.
- [28] Chiou C Y, Huang C H, Liu A S, et al. Development of a micro-processor-based transient data recording system for load behavior analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 16~22.
- [29] Karlsson D, Hill D J. Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 157~166.
- [30] Ju P, Handschin E. Identifiability of load models [J]. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1997, 44(1): 45~49.
- [31] Kosterev D, Meklin A. Load modeling in WECC [C]. IEEE/PES Power Systems Conference & Exposition, Atlanta, 2006: 576~581.

- [32] Kosterev D, Meklin A, Undrill J, et al. Load modeling in power system studies :WECC progress update[C]. IEEE/PES General Meeting ,Pittsburgh ,2008 :1~8.
- [33] 汤涌,张红斌,侯俊贤,等. 考虑配电网的综合负荷模型[J]. 电网技术,2007,31(5):34~38.
- [34] Tang Y, Zhang H B, Zhang D X, et al. A synthesis load model with distribution network for power transmission system simulation and its validation [C]. IEEE/PES General Meeting, Calgary, 2009:1~7.

第 2 章 电力负荷元件模型

2.1 电力负荷构成

电力负荷元件是指各种将电能转化成其他形式能量的用电设备,如电动机、电弧炉、加热器、空调、家用电器、照明等。在建立负荷元件模型时一般采用一系列能够表征负荷特性的模型和参数,如负荷功率因数、负荷有功功率和无功功率随电压和频率变化的特性。这种模型和参数可以表征某个具体负荷设备、负荷元件的特性,也可以是某类负荷的典型负荷特性,还可以是母线上所有负荷的综合特性。

图 2-1 描述了电力系统综合负荷建模的等值过程。其中图 2-1(a)所示的典型电力系统包含各种用电负荷及配电网络。一般情况下,在进行潮流计算或稳定性分析时,电力系统不会被描述得如此详细,而是将配电系统负荷等值在较高电压等级的变电站母线上,如图 2-1(b)所示。因此,母线上的等值负荷的模型和参数是仿真计算分析中最需要的数据,也是负荷建模的主要任务。

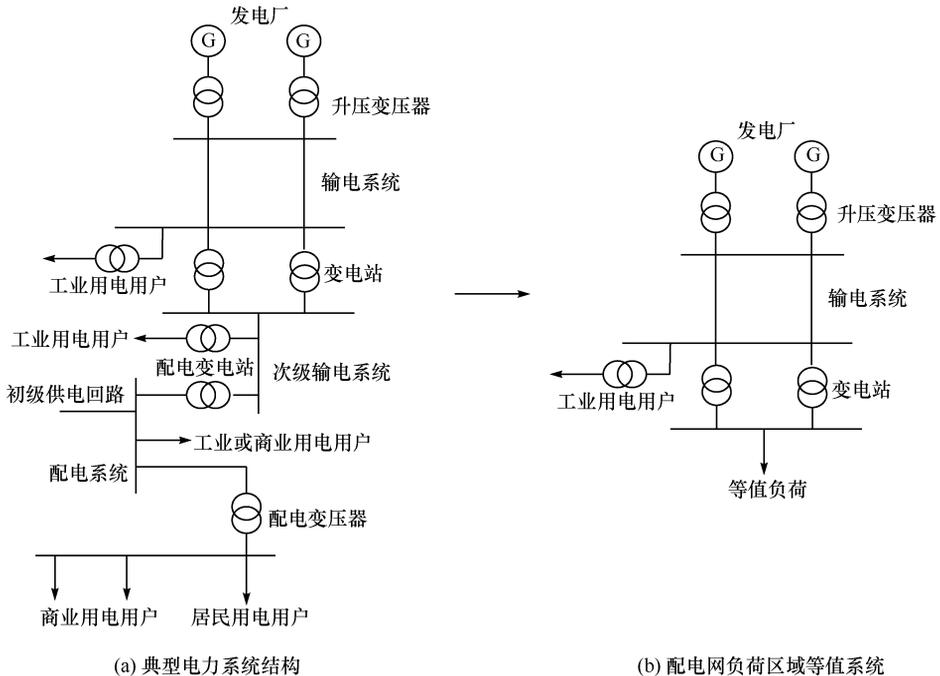


图 2-1 典型电力系统结构及其负荷区域等值

用于电力系统仿真计算的负荷模型一般应包含两类元件。一类是配电系统元件,包括配电线路、配电变压器、无功补偿装置等配电系统功率损耗元件;另一类是终端用户用电设备负荷,包括电动机、电暖器、照明灯、热水器、空调等设备。确定各种负荷元件的模型是建立等值负荷模型的基础。负荷元件的模型和参数一般需要经过试验测试才能获得。

2.2 常用电力负荷元件的模型

2.2.1 商业、居民用电阻加热器

电热负荷的容量可高达几十千瓦或更大,也可低至十几千瓦或更小(如电热水器的额定功率为 $1\sim 4\text{kW}^{[1]}$)。常用的电热负荷有电热水器、电暖设备和电炉灶等^[2]。

电热水器是最常见和重要的电阻热负荷,它的运行状态不仅受用户对热水需求量的大小和时间的影 响,还受热水储藏状态(如在热水储藏室内温度的分布情况)的影响。这使得热水需求在一定程度上滞后于最终的能量需求。热水储藏室在电能输入与热水输出之间起缓冲的作用,通常很难用简单的数学表达式描述这种输出与输入之间的关系。

电阻电暖设备的负荷特性与采用的材料有关。电阻电暖设备具有非线性特性,但在正常运行范围内具有线性特性。电阻电暖设备负荷不受供电频率的影响,也不消耗无功功率。

电炉灶的额定功率为 $7\sim 13.6\text{kW}$,平均功率约为 10kW ,其日负载率大约在 15% 左右。

一般情况下,为简化分析,通常将电阻型电热负荷视为恒定电阻负荷。文献^{[2]~[7]}将电阻电热负荷作为恒定电阻负荷,其功率因数 PF 为 1 ,即不消耗无功功率,数学模型为

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \quad (2-1)$$

式中, P 为负荷功率; P_0 为负荷初始功率; U 为负荷节点电压; U_0 为负荷节点初始电压。

2.2.2 热泵式加热器

1. 居民用热泵式加热器

文献^[2]中指出居民用热泵式加热器为: 10% 的电阻热负荷(用功率因数 $PF=1.0$ 的恒电阻模型描述)、 90% 的感应电动机负荷,其静态模型如式(2-2)所示:

$$P=0.9 P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.21} (1+0.9\Delta f)+0.1 P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2$$

$$Q=0.9 P_0 \tan(\arccos 0.84) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.5} (1-1.3\Delta f)$$
(2-2)

式中, P 、 Q 为负荷有功、无功功率; P_0 为负荷初始功率; U 为负荷节点电压; U_0 为负荷节点初始电压; Δf 为频率偏差。

居民用热泵式加热器的动态模型用感应电动机来模拟, 其参数为

$$R_s=0.033, \quad X_s=0.076, \quad X_m=2.4, \quad R_r=0.048, \quad X_r=0.062$$

$$U_i=0.5, \quad T_i=5.0s, \quad A=0.2, \quad B=0.0, \quad H=0.28, \quad LF=0.6$$

感应电动机的等值电路如图 2-2 所示, 其电压方程、运动方程和机械特性如下:

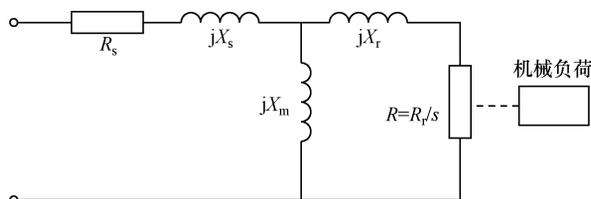


图 2-2 感应电动机等值电路

$$X = X_2 + X_m \quad (\text{转子开路电抗})$$

$$X' = X_2 + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r} \quad (\text{转子不动时短路电抗})$$

$$T_0' = \frac{X_m + X_r}{\omega R_r} \quad (\text{定子开路, 转子回路时间常数})$$

$$\omega_b = 2\pi f_{\text{base}}, \quad f_{\text{base}} = 50$$

$$\omega = 1 - s$$

$$\frac{dE_d}{dt} = -\frac{1}{T_0'} [E_d + (X - X') I_q] - \omega_b (\omega - 1) E_q$$

$$\frac{dE_q}{dt} = -\frac{1}{T_0'} [E_q - (X - X') I_d] + \omega_b (\omega - 1) E_d$$

$$I_d = \frac{1}{R_s^2 + X^2} [R_s (U_d - E_d) + X (U_q - E_q)]$$

$$I_q = \frac{1}{R_s^2 + X^2} [R_s (U_q - E_q) - X (U_d - E_d)]$$

$$T_e = E_d I_d + E_q I_q$$

$$T_m = (A \omega^2 + B \omega + C) T_0$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - T_m)$$

式中, A 、 B 、 C 为机械转矩系数(p.u.), C 由下式求得:

$$A\omega^2 + B\omega + C = 1.0$$

$$\omega = 1 - s_0$$

R_s 为定子电阻(p.u.); X_s 为定子电抗(p.u.); X_m 为激磁电抗(p.u.); R_r 为转子电阻(p.u.); X_r 为转子电抗(p.u.); U_1 为感应电动机低电压释放的电压值(当电动机机端低压降到 U_1 以下,经 T_1 延时后切除电动机)(p.u.); T_1 为感应电动机低电压释放的时延(s); H 为包括负载惯性的惯性常数[转矩(p.u.)/转速(p.u.)]; LF 为负载率(正常有功功率与基准功率之比); T_e 为电动机电磁转矩; T_m 为电动机机械转矩。

2. 商业用热泵式加热器

文献[2]中指出商业用热泵式加热器为:10%的电阻热负荷(用功率因数 PF 为1的恒电阻模型描述)、90%的感应电动机负荷,其静态模型如式(2-3)所示:

$$\begin{aligned} P &= 0.9 P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.1} (1 + 1.0 \Delta f) + 0.1 P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \\ Q &= 0.9 P_0 \tan(\arccos 0.84) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.5} (1 - 1.3 \Delta f) \end{aligned} \quad (2-3)$$

商业用热泵式加热器的动态模型参数为

$$R_s = 0.053, \quad X_s = 0.083, \quad X_m = 1.94, \quad R_r = 0.068, \quad X_r = 0.068$$

$$U_1 = 0.5, \quad T_1 = 5.0s, \quad A = 0.2, \quad B = 0.0, \quad H = 0.28, \quad LF = 0.6$$

2.2.3 空调负荷

空调的工作机理与热泵工作在制冷模式下的机理相同。空调可以分为中央空调和户式空调,户式空调的功率要比中央空调小得多。另外,空调还可分为三相空调和单相空调。大部分的商业用空调都是三相中央空调,而民用空调一般是单相中央空调或户式空调。三相中央空调、单相中央空调和户式空调的特性存在着一定的差异,须加以区分。不同厂家生产的不同类型空调的保护方案也有所不同。空调一般由一个或几个风机和一个压缩感应电动机组成。

空调负荷的日益增长使系统负荷峰值不断提高,空调负荷的动态特性对系统稳定性的影响也越来越大。文献[8]通过现场试验证明:如果空调感应电动机的电压低于正常值的60%,则空调压缩机将会发生堵转。空调压缩机的保护方案对空调感应电动机的电气特性有着重要的影响^[8]。文献[9]指出,在日本关西电力株式会社(Kansai Electric Power Company, KEPCO)系统中,空调负荷是最具变化性

的负荷元件之一,对母线电压的影响也最大。所以,认识空调负荷的特性及其与电网之间的相互影响对系统运行和分析是非常重要的。

1. 居民用热泵式中央空调(制冷)

文献[2]指出居民用热泵式中央空调负荷是单相运行在制冷模式下的热泵。因此,其压缩机和两个风扇具有相同的特性。其静态模型如式(2-4)所示:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.2} (1 + 0.9\Delta f) \\ Q &= P_0 \tan(\arccos 0.81) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.2} (1 - 2.7\Delta f) \end{aligned} \quad (2-4)$$

居民用热泵式中央空调的动态模型参数为

$$\begin{aligned} R_s &= 0.033, \quad X_s = 0.076, \quad X_m = 2.4, \quad R_r = 0.048, \quad X_r = 0.062 \\ U_l &= 0.5, \quad T_l = 5.0s, \quad A = 0.2, \quad B = 0.0, \quad H = 0.28, \quad LF = 0.6 \end{aligned}$$

2. 商业用热泵式中央空调(制冷)

文献[2]指出商业用热泵中央空调是三相运行在制冷模式下的热泵。因此,其压缩机和两个风扇具有相同的特性。其静态模型如式(2-5)所示:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.1} (1 + 1.0\Delta f) \\ Q &= P_0 \tan(\arccos 0.81) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.5} (1 - 1.3\Delta f) \end{aligned} \quad (2-5)$$

商业用热泵式中央空调的动态模型参数为

$$\begin{aligned} R_s &= 0.033, \quad X_s = 0.076, \quad X_m = 2.4, \quad R_r = 0.048, \quad X_r = 0.062 \\ U_l &= 0.5, \quad T_l = 5.0s, \quad A = 0.2, \quad B = 0.0, \quad H = 0.28, \quad LF = 0.6 \end{aligned}$$

3. 居民用中央空调(制冷)

文献[2]采用单相感应电动机特性描述居民用中央空调,其静态模型如式(2-6)所示:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.2} (1 + 0.9\Delta f) \\ Q &= P_0 \tan(\arccos 0.81) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.2} (1 - 2.7\Delta f) \end{aligned} \quad (2-6)$$

居民用中央空调的动态模型参数为

$$\begin{aligned} R_s &= 0.033, \quad X_s = 0.076, \quad X_m = 2.4, \quad R_r = 0.048, \quad X_r = 0.062 \\ U_l &= 0.5, \quad T_l = 5.0s, \quad A = 0.2, \quad B = 0.0, \quad H = 0.28, \quad LF = 0.6 \end{aligned}$$

4. 商业用中央空调(制冷)

文献[2]采用三相感应电动机特性描述商业用中央空调,其静态负荷模型如式(2-7)所示:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.1} (1 + \Delta f) \\ Q &= P_0 \tan(\arccos 0.81) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.5} (1 - 1.3 \Delta f) \end{aligned} \quad (2-7)$$

商业用中央空调的动态模型参数为

$$\begin{aligned} R_s &= 0.053, \quad X_s = 0.083, \quad X_m = 1.9, \quad R_r = 0.036, \quad X_r = 0.068 \\ U_1 &= 0.5, \quad T_1 = 5.0\text{s}, \quad A = 0.2, \quad B = 0.0, \quad H = 0.28, \quad LF = 0.6 \end{aligned}$$

5. 商业、居民用户式空调(制冷)

文献[2]中采用单相感应电动机特性描述商业(居民)用户式空调,其静态模型如式(2-8)所示:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.5} (1 + 0.6 \Delta f) \\ Q &= P_0 \tan(\arccos 0.75) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.5} (1 - 2.8 \Delta f) \end{aligned} \quad (2-8)$$

商业、居民用户式空调的动态模型参数为

$$\begin{aligned} R_s &= 0.1, \quad X_s = 0.1, \quad X_m = 1.8, \quad R_r = 0.09, \quad X_r = 0.06 \\ U_1 &= 0.5, \quad T_1 = 5.0\text{s}, \quad A = 0.2, \quad B = 0.0, \quad H = 0.28, \quad LF = 0.6 \end{aligned}$$

2.2.4 家用电器

1. 电冰箱

电冰箱的主要工作元件是感应电动机(风机和压缩机),一般情况下感应电动机的月耗电量约为 $80 \sim 130 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。除了感应电动机负荷外,还有在除湿情况下切换到电加热状态的电加热负荷。电加热负荷平均月耗电量约为 $15 \sim 35 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。电冰箱的日负载率约为 65% 。

文献[2]给出了电冰箱的三种负荷模型。

1) 不考虑频率影响的电压指数模型

模型 1:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{1.258}$$

$$Q = P_0 \tan(\arccos 0.701) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.851} \quad (2-9)$$

模型 2:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.732}$$

$$Q = P_0 \tan(\arccos 0.69) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{1.73} \quad (2-10)$$

2) 考虑频率和电压变化影响的多项式负荷模型

80% 感应电动机负荷 + 20% 恒电阻负荷。感应电动机静态模型如式(2-11)所示:

$$P = 0.8 P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.8} (1 + 0.5 \Delta f) + 0.2 P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2$$

$$Q = 0.8 P_0 \tan(\arccos 0.84) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.5} (1 - 1.4 \Delta f) \quad (2-11)$$

3) 电冰箱的动态模型参数为

$$R_s = 0.056, \quad X_s = 0.087, \quad X_m = 2.4, \quad R_r = 0.053, \quad X_r = 0.082$$

$$U_i = 0.5, \quad T_i = 5.0s, \quad A = 0.2, \quad B = 0.0, \quad H = 0.28, \quad LF = 0.5$$

文献[3]给出的电冰箱的指数电压频率模型如式(2-12)所示:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.77} (1 + 0.53 \Delta f)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.5} (1 - 1.46 \Delta f) \quad (2-12)$$

文献[7]给出的电冰箱的指数电压频率模型如式(2-13)所示:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.8} (1 + 0.5 \Delta f)$$

$$Q = P_0 \tan(\arccos 0.79) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.5} (1 - 1.4 \Delta f) \quad (2-13)$$

文献[10]给出的电冰箱有功负荷部分的多项式模型如式(2-14)所示:

$$P = 1.0 + 1.3958 \Delta U + 9.881 \Delta U^2 + 84.72 \Delta U^3 + 293.0 \Delta U^4 \quad (2-14)$$

文献[6]推荐的电冰箱多项式模型如式(2-15)所示:

$$P = 1.0 + 0.7594 \Delta U + 1.4361 \Delta U^2 + 0.5238 \Delta f - 3.3710 \Delta U \Delta f$$

$$Q = 0.782 + 1.9298 \Delta U + 4.2231 \Delta U^2 - 1.1266 \Delta f - 9.2356 \Delta U \Delta f \quad (2-15)$$

2. 洗碗机

洗碗机的主要负荷集中在热水加热器上。常用的洗碗机的额定功率一般为 1kW,其中大约 250W 用于洗碗机的感应电动机负荷,其余的 750W 用于电阻加热器^[2]。文献[2]以电压-频率指数关系式描述洗碗机的负荷模型为:25% 感应电动机+75% 恒电阻模型,恒电阻负荷的功率因数为 1。感应电动机负荷的静态模型如式(2-16)所示:

$$P=0.25 P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{1.8} + 0.75 P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \quad (2-16)$$

$$Q=0.25 P_0 \tan(\arccos 0.99) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{3.5} (1-2.5\Delta f)$$

洗碗机的动态模型参数为

$$R_s=0.11, \quad X_s=0.14, \quad X_m=2.8, \quad R_r=0.11, \quad X_r=0.065$$

$$U_1=0.5, \quad T_1=5.0s, \quad A=1.0, \quad B=0.0, \quad H=0.28, \quad LF=0.5$$

3. 洗衣机

洗衣机的运行特性与洗碗机比较相似,只是额定容量比较小。常见的洗衣机的额定功率大约为 340W,主要的工作元件为感应电动机,可为分相式感应电动机、鼠笼式感应电动机或双向感应电动机^[2]。文献[2]给出的静态负荷模型如式(2-17)所示:

$$P=P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.08} (1+2.9\Delta f) \quad (2-17)$$

$$Q=P_0 \tan(\arccos 0.65) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{1.6} (1+1.8\Delta f)$$

文献[10]给出的洗衣机有功负荷部分的多项式模型如式(2-18)所示:

$$P=1.0+1.2786\Delta U+3.099\Delta U^2+5.939\Delta U^3 \quad (2-18)$$

文献[2]给出的洗衣机的动态模型参数为

$$R_s=0.11, \quad X_s=0.12, \quad X_m=2.0, \quad R_r=0.11, \quad X_r=0.13$$

$$U_1=0.5, \quad T_1=5.0s, \quad A=1.0, \quad B=0.0, \quad H=0.69, \quad LF=0.4$$

文献[11]分别用多项式模型和幂指数模型描述了一台功率因数 $PF=0.61$ 、额定容量为 654VA 的洗衣机负荷,没有考虑频率的影响。其多项式模型如式(2-19)所示,其幂指数模型如式(2-20)所示:

$$P=P_0 \left[0.05 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + 0.31 \left(\frac{U}{U_0} \right) + 0.63 \right]$$

$$Q=Q_0 \left[-0.56 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + 2.2 \left(\frac{U}{U_0} \right) - 0.65 \right] \quad (2-19)$$

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0.42} \\
 Q &= Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{1.09}
 \end{aligned}
 \tag{2-20}$$

4. 烘干机(干衣机)

居民用衣物烘干机内的温度大约为 $65.6 \sim 82.2^\circ\text{C}$, 主要由衣物的材质决定。烘干机主要由电阻加热元件、吹风机和感应电动机组成, 其典型的额定功率为 $5.5\text{kW}^{[2]}$ 。文献[2]给出的衣物烘干机的静态负荷模型如式(2-21)所示:

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.0} \\
 Q &= 0.2 P_0 \tan(\arccos 0.99) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{3.3} (1 - 2.6 \Delta f)
 \end{aligned}
 \tag{2-21}$$

文献[7]给出的衣物烘干机的静态模型如式(2-22)所示:

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.0} \\
 Q &= P_0 \tan(\arccos 0.99) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{3.3} (1 - 2.6 \Delta f)
 \end{aligned}
 \tag{2-22}$$

文献[6]推荐的衣物烘干机的静态模型如式(2-23)所示:

$$\begin{aligned}
 P &= 1.0 + 2.04 \Delta U + 0.995 \Delta U^2 - 0.593 \Delta U^3 \\
 Q &= 0.1307 + 0.4271 \Delta U + 0.6274 \Delta U^2 + 0.469 \Delta U^3 \\
 &\quad - 0.3437 \Delta f - 0.6734 \Delta U \Delta f
 \end{aligned}
 \tag{2-23}$$

文献[2]给出的衣物烘干机的动态模型参数为

$$\begin{aligned}
 R_s &= 0.12, \quad X_s = 0.15, \quad X_m = 1.9, \quad R_r = 0.13, \quad X_r = 0.14 \\
 U_i &= 0.5, \quad T_i = 5.0\text{s}, \quad A = 1.0, \quad B = 0.0, \quad H = 0.11, \quad LF = 0.4
 \end{aligned}$$

5. 电视机

电视机(彩色或黑白)的耗电量一般比较小, 其额定功率大约为 $80 \sim 110\text{W}$ 。文献[2]给出的电视机的静态负荷模型如式(2-24)所示:

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.0} \\
 Q &= P_0 \tan(\arccos 0.77) \left(\frac{U}{U_0} \right)^{5.2} (1 - 4.6 \Delta f)
 \end{aligned}
 \tag{2-24}$$

文献[3]给出的电视机的静态负荷模型如式(2-25)所示:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{2.0}$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{5.2} (1 - 4.6 \Delta f)$$
(2-25)

2.2.5 照明负荷

对于一般的商业建筑,照明用电负荷较重,占其总用电负荷的 20%~50%^[1];在工业负荷中,照明负荷约占总负荷用电量的 9%^[12]。由此可见照明负荷在商业负荷中的重要性,其负荷模型的选择对系统响应特性有着重要的影响。参见文献[1],现实生活中最常用的照明负荷有两种:白炽灯和放电灯(主要是荧光灯)。这里将对这两种照明负荷的特性及模型加以描述。

1. 白炽灯

白炽灯由钨灯丝及具有地热传导特性的惰性气体构成,它的效力一般在 17~24lm/W (lm/W 是光源辉度效力单位,流明/瓦)范围内。白炽灯是一种低效力的光源元件,但由于其简单的光学控制特性,可用于小面积的照明,如商店、房间或剧院等。对于大面积的区域或长时间的照明一般不采用白炽灯。

文献[13]对白炽灯负荷进行了电压扰动试验,并记录了扰动过程中的电压波形和电流波形。图 2-3 是电压在 0ms 突然由 100% 跌落到 50% 和 70% 的波形,图 2-4 是在扰动过程中与电压波形相对应的电流波形。比较电流与电压的波形可以看出,负荷电流完全随着电压的变化而变化。因此,白炽灯的模型可以描述为恒电阻负荷模型,等值电路图如图 2-5 所示, R 为白炽灯的等值电阻,其大小可由其额定功率及额定电压计算出。

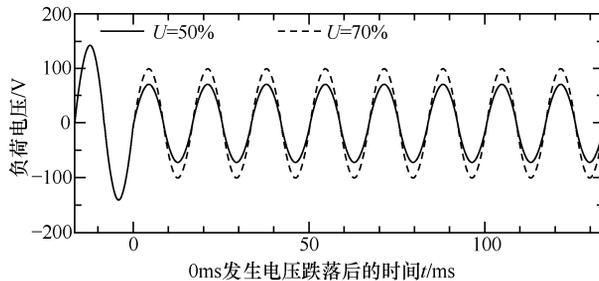


图 2-3 白炽灯负荷电压波形图

文献[2]认为白炽灯的灯丝电阻会随着电压的变化而略有变化,即在电压变化过程中不是恒定的。文中给出了白炽灯的负荷模型,由于白炽灯不消耗无功功率,因此白炽灯的负荷模型为