

学校代号 10532

学 号 B06091008

分 类 号 TM714

密 级 \_\_\_\_\_



**湖南大学**  
HUNAN UNIVERSITY

## 博士学位论文

# 考虑分布式发电的配电网综合负荷 建模方法研究

学位申请人姓名 钱军

培 养 单 位 电气与信息工程学院

导师姓名及职称 李欣然 教授

学 科 专 业 电气工程

研 究 方 向 电力系统运行分析与建模

论文提交日期 2010年04月22日

学校代号：10532

学 号：B06091008

密 级：

## 湖南大学博士学位论文

# 考虑分布式发电的配电网综合负荷建模方法研究

学位申请人姓名： 钱 军

导师姓名及职称： 李欣然 教授

培养单位： 电气与信息工程学院

专业名称： 电气工程

论文提交日期： 2010 年 04 月 22 日

论文答辩日期： 2010 年 08 月 28 日

答辩委员会主席： 罗 安 教授

Studies on composite load modeling of distribution network  
considering distributed generation

by

QIAN Jun

B. E. (Changsha University of Science & Technology) 2004

M. S. (Hunan University) 2007

A dissertation submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Doctor of Engineering

in

Electrical Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Professor LI Xinran

April, 2010

湖南大学  
学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名： 

日期： 2010 年 8 月 31 日

学位论文版权使用授权书

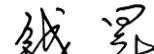
本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密 ，在 \_\_\_\_\_ 年解密后适用本授权书。

2、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名： 

日期： 2010 年 8 月 31 日

导师签名： 

日期： 2010 年 8 月 31 日

## 摘要

紧密结合国家大力开发可再生洁净能源分布式发电技术与装备的科技发展战略，综合运用电力系统分析、系统辨识、计算机技术、统计数学等科学原理与方法，将总体测辨法、仿真实验等电力系统负荷建模理论与方法有机结合，围绕考虑风力发电（Wind Power Generation, WG）、光伏电池（Photovoltaic, PV）、燃料电池（Fuel Cell, FC）、微型燃气轮机（Microturbine, MT）等典型分布式发电装置影响的配电网广义综合负荷建模开展了一系列的研究，具体工作和贡献有如下几个方面：

1、针对电力系统传统感应电动机综合负荷模型存在的结构缺陷，从总体测辨的角度，提出了一种“配电网集结等效的综合感应电动机模型”。模型将配电网用集总线路-变压器组集结等效，并计及了变压器有载调整分接头的影响；在静态负荷中考虑负荷暂态无功功率的补偿调整作用。推导出了模型的完整解析描述；提出了模型参数的“递推辨识策略”。模型实现了220kV变电站综合负荷物理环境—模型辨识环境—仿真计算环境的统一，更加符合电网的综合负荷实际结构。基于现场实测数据的建模实例表明，该模型在参数稳定性、泛化能力等综合性能上，较传统感应电动机模型有了一定的提高，为考虑分布式发影响的配电网综合负荷建模提供了有效的广义综合负荷模型结构体系基础。

2、基于 MATLAB 仿真工具并运用总体测辨负荷建模方法，研究了考虑 WG 的配电网综合负荷模型结构。提出把 WG 看作一个功率消耗为负的广义动态负荷，用异步发电机来等效描述；进而提出了一种任意动静比例的异步电机并联静态负荷的配电网广义综合负荷模型来描述含 WG 的配电网综合负荷特性。3 种典型运行方式的建模研究，检验了该模型对不同 WG 容量和负荷水平的配电网综合负荷特性的综合适应性能力。

3、在构建 IEEE 14 节点典型配电系统的基础上，研究了容量比例、地理位置和接入方式（集中或分散）等影响因素下 WG 接入对配电网综合负荷特性的影响。研究表明，容量比例的影响要明显大于地理位置的影响，占主导作用；且 WG 分散接入的影响要明显小于 WG 集中接入。在此基础上，利用上面的研究数据，进一步验证了所提出的任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型的有效性；进而结合第 1 部分的研究成果对该模型进行了扩展，提出“任意动静比例的配电网集结等效的异步电机广义综合负荷模型”，比较分析验证了该模型的优越性。

4、为研究考虑 PV 和 FC 等直流分布式电源影响的配电网综合负荷建模，在

构建 PV 和 FC 发电系统的基础上,详细阐述了各功能模块的模型和并网控制策略;提出把直流分布式电源看作一个功率消耗为负的广义静态负荷,用恒功率模型来等效描述;进而提出了一种等效静态负荷并联感应电动机的广义综合负荷模型来等效描述含直流分布式电源的配电网综合负荷特性;针对三种不同接入容量比例的直流分布式电源,进行了总体测辨建模研究,通过模型自描述能力、泛化能力和影响其综合负荷特性的关键参数(动静比例和 ZIP 静态负荷系数)的变化规律分析,验证了该模型的有效性。

5、为研究考虑 MT 的配电网综合负荷建模,在构建 MT 发电系统的基础上,详细阐述了各功能模块的模型和控制策略;提出把微型燃气轮机看作一个功率消耗为负的广义动态负荷,用一阶微分方程模型来等效描述;进而提出了一种微型燃气轮机和感应电动机组成的等效动态负荷并联静态负荷的广义综合负荷模型来等效描述含 MT 的配电网综合负荷特性;针对 MT 接入容量的不同,对三个样本进行了总体测辨建模研究,验证了该模型的有效性。

**关键词:** 电力系统; 配电网; 分布式发电; 负荷建模; 广义综合负荷; 模型结构;  
**总体测辨法**

# Abstract

With the fast development of renewable and clean energy generation, there will be a series of new theory and practical problems to be solved. One of them is the modeling of power systems. Based on the background stated above, this dissertation studies the composite load modeling of distribution power network considering distributed generation. The main work and contributions are as below:

1. Aiming at the disadvantages of the structure of traditional induction motor load model, a novel “synthesis induction-motor model considering distribution network” is established. In this model, the distribution network is equivalent to a line connecting to a terminal transformer, which can describe the influence of OLTC (on-load tap changer) and reactive power compensation. The model achieves the unity of the physics environment, parameters identification environment and simulation applying environment of composite load at the power substation. The results of modeling test based on simulation measured data shows that the “synthesis induction-motor model considering distribution network” has excellent identifiability, generalization, and the composite describing capability. Its integral performance is better than traditional induction motor model. This model provides the basis and effective structure for research on load modeling of distribution network considering distributed generation.

2. The composite load model of distribution network including wind power generation (WG) is studied with MATLAB Simulation toolbox and theory of measurement-based method. The research proves that the WG could be considered as generalized dynamic load which consumes negative power, and could be described by asynchronous generator. In order to describe the synthetic load characteristic of distribution network including WG, the author proposes a kind of generalized composite load model that is constituted by asynchronous machine in parallel with static load. In the model, the ratio of dynamic load can be any real numerical value. The validity of this composite load model with any ratio of dynamic load is testified by modeling of three typical operation modes under different capacity of wind power generation.

3. Using the typical IEEE 14 node distribution network as simulation environment, the author systematically studied the impact of WG on composite load characteristics, which consider some impotent influential elements such as capacity

ratio, location, and the connecting mode to the distribution network and so on. It has been proved that the influence of capacity is apparently greater than that of location, and the effect of dispersed WG is smaller than that of the centralized, hence the dispersed connection one have advantage to the safe and stable operation of power system. Using the measured data from simulation, the validity of generalized composite load model is tested through fitting result, average error and identification parameters. At the same time, the generalized composite load model of asynchronous machine with any ratio of dynamic load is proposed, and its superiority is also tested.

4. For the sake of studying on the composite load modeling of distribution network with photovoltaic (PV) and fuel cell (FC), the PV and FC grid-connected power system is established and the model of each function module and control strategy are expounded. It is pointed out that the PV and FC could be considered as generalized static load which consumes negative power, and could be described by constant power model. Based on this, the generalized composite load model of equivalent static load in parallel with induction motor is proposed to describe the synthetic load characteristic of distribution network including PV and FC. The validity of this generalized composite load model is testified by modeling of three typical modes under different capacity of PV and FC.

5. In order to study the composite load modeling of distribution network with microturbine (MT), the model of each function module and control strategy are expounded with establishing of the MT generation system. It is pointed out that the MT could be considered as generalized dynamic load which consumes negative power, and could be described by a first-order differential state equation. And the generalized composite load model of equivalent dynamic load consisted of MT and induction motor in parallel with static load is proposed to describe the synthetic load characteristic of distribution network including MT. The validity of the composite load model is testified by modeling to three different typical capacity of MT.

**Key Words:** Power systems; Distribution network; Distributed generation; Load modeling; Generalized composite load; Model Structure; Measurement-based approach

# 目 录

## 摘 要

Abstract

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 负荷建模研究的意义 .....	1
1.2 负荷建模的国内外研究现状 .....	1
1.3 分布式发电与负荷建模 .....	4
1.3.1 智能电网与分布式发电 .....	4
1.3.2 分布式发电对电力系统影响研究 .....	6
1.3.3 考虑分布式发电的负荷建模研究的必要性 .....	7
1.3.4 研究方法与技术路线 .....	7
1.4 本文的主要工作 .....	9
第 2 章 总体测辨负荷建模基本原理与方法 .....	11
2.1 引言 .....	11
2.2 基本原理与基本步骤 .....	11
2.2.1 基本原理 .....	11
2.2.2 基本步骤 .....	13
2.3 待解决的关键理论问题 .....	14
2.4 负荷模型的类型与结构 .....	15
2.4.1 静态负荷模型 .....	15
2.4.2 机理动态负荷模型 .....	16
2.4.3 非机理动态负荷模型 .....	17
2.5 参数辨识的优化方法 .....	19
2.6 实现过程 .....	23
2.7 本章小结 .....	25
第 3 章 配电网集结等效的综合感应电动机模型及其总体测辨建模 .....	26
3.1 引言 .....	26
3.2 感应电动机模型的结构剖析 .....	27
3.2.1 传统感应电动机模型的结构特点及其缺陷 .....	27
3.2.2 配电网集结等效的综合感应电动机模型结构 .....	28
3.3 综合感应电动机模型的数学描述 .....	29

3.3.1 电压比与基准变换关系 .....	29
3.3.2 线路-变压器组首末端功率与电压平衡关系 .....	30
3.3.3 无功补偿的描述 .....	31
3.3.4 静态负荷的功率描述 .....	31
3.3.5 感应电动机的数学描述 .....	32
3.4 模型的初始稳态条件 .....	33
3.4.1 感应电动机及静态负荷初始稳态有功功率 .....	33
3.4.2 感应电动机初始转差率 .....	34
3.4.3 感应电动机及静态负荷初始稳态无功功率 .....	35
3.4.4 感应电动机暂态电动势初始值的确定 .....	35
3.4.5 感应电动机机械负载率的确定 .....	35
3.5 综合感应电动机模型的辨识 .....	36
3.5.1 模型的待辨识参数 .....	36
3.5.2 模型的辨识准则与目标函数 .....	37
3.5.3 模型的递推辨识策略 .....	37
3.6 实例研究 .....	39
3.6.1 实测数据来源及辨识模型选择 .....	39
3.6.2 辨识结果 .....	40
3.6.3 模型有效性检验 .....	43
3.7 本章小结 .....	45
<b>第4章 考虑风力发电的配电网综合负荷建模方法和模型结构研究 .....</b>	<b>47</b>
4.1 引言 .....	47
4.1.1 世界各国风力发电的发展 .....	47
4.1.2 风力发电对电力系统的影响 .....	48
4.1.3 建模方法与思路 .....	48
4.2 仿真系统与方法 .....	49
4.2.1 配电网仿真系统结构 .....	49
4.2.2 采用的负荷模型及其参数 .....	50
4.2.3 风力发电系统模型 .....	51
4.2.4 仿真方法 .....	54
4.3 模型结构与参数辨识 .....	54
4.3.1 传统综合负荷模型结构 .....	54
4.3.2 广义综合负荷模型结构 .....	55
4.3.3 参数辨识 .....	56
4.4 风力发电系统的等效检验 .....	57

4.5 广义综合负荷模型适应性检验	58
4.5.1 仿真实验与建模结果	58
4.5.2 模型适应性检验	59
4.5.3 讨论	66
4.6 本章小结	66
<b>第 5 章 风力发电对配电网综合负荷特性的影响</b>	<b>67</b>
5.1 引言	67
5.2 配电网仿真系统	67
5.2.1 典型配电网络结构与参数	67
5.2.2 各元件模型	69
5.3 不同容量比例的风力发电接入配电网	69
5.3.1 集中接入对配电网综合负荷特性的影响	69
5.3.2 分散接入对配电网综合负荷特性的影响	71
5.3.3 同一容量比例下集中与分散接入比较	73
5.3.4 统计规律性总结	74
5.4 不同地理位置的风力发电接入配电网	76
5.4.1 集中接入对配电网综合负荷特性的影响	76
5.4.2 分散接入对配电网综合负荷特性的影响	79
5.4.3 统计规律性总结	79
5.5 不同影响因素下广义综合负荷模型建模检验	80
5.5.1 不同容量比例影响下的模型辨识	81
5.5.2 不同地理位置影响下的模型辨识	82
5.6 几种典型机理负荷模型的描述能力比较	85
5.6.1 仿真实验	85
5.6.2 三种典型机理负荷模型结构与待辨识参数	86
5.6.3 总体测辨建模结果	87
5.6.4 适应性能力比较	89
5.7 本章小结	91
<b>第 6 章 考虑直流分布式电源的配电网综合负荷建模研究</b>	<b>92</b>
6.1 引言	92
6.2 光伏电池发电系统建模	92
6.2.1 光伏电池阵列数学模型	93
6.2.2 基于单向 DC/DC 变换器的最大功率点跟踪	95
6.2.3 基于双向 DC/DC 变换器的蓄电池模型	97
6.3 燃料电池发电系统建模	99

6.3.1 基本假设 .....	99
6.3.2 数学模型 .....	99
6.3.3 SOFC 建模 .....	101
6.4 直流分布式电源逆变并网控制 .....	102
6.5 直流分布式电源的等效描述 .....	103
6.5.1 PV 的等效描述 .....	103
6.5.2 FC 的等效描述 .....	104
6.5.3 仿真检验 .....	106
6.6 考虑直流分布式电源的广义综合负荷模型 .....	108
6.6.1 模型结构及其解析描述 .....	108
6.6.2 仿真实验与建模结果 .....	110
6.6.3 模型适应性检验 .....	112
6.6.4 讨论 .....	114
6.7 本章小结 .....	114
<b>第 7 章 考虑微型燃气轮机的配电网综合负荷建模研究 .....</b>	<b>115</b>
7.1 前言 .....	115
7.2 微型燃气轮机发电系统建模 .....	115
7.2.1 MT 动态模型 .....	116
7.2.2 PMSG 动态模型 .....	117
7.2.3 机侧整流器模型与控制 .....	117
7.3 微型燃气轮机的等效描述 .....	118
7.3.1 暂态过程中 MT 的动态特性 .....	119
7.3.2 MT 的等效描述模型 .....	120
7.3.3 仿真检验 .....	124
7.4 考虑微型燃气轮机的广义综合负荷模型 .....	125
7.4.1 模型结构与待辨识参数 .....	125
7.4.2 仿真实验与建模结果 .....	127
7.4.3 模型适应性检验 .....	129
7.4.4 讨论 .....	131
7.5 本章小结 .....	131
<b>结 论 .....</b>	<b>132</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>135</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>147</b>
<b>附录 A (攻读学位期间所发表的学术论文) .....</b>	<b>148</b>
<b>附录 B (攻读学位期间所参加的科研工作) .....</b>	<b>149</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 负荷建模研究的意义

电力系统仿真计算是电力系统规划设计和运行调度的基本决策依据，合理的元件模型结构和准确的模型参数则是确保仿真计算结果准确性和可信赖程度的基本前提。目前发电机组及其调节系统、输配电网络等元件模型已较为成熟，有适应不同仿真精度要求并为电力系统所广泛接受的模型<sup>[1,2]</sup>。相对而言，作为电力系统重要元件之一的电力负荷模型仍较为简单。长期以来，国内工程仿真计算普遍采用一定比例的感应电动机动态负荷并联恒阻抗静态负荷作为暂态稳定计算的综合负荷模型，并且基本上采用一套“典型”的感应电动机参数<sup>[3]</sup>。近年来，国家电网调度中心根据中国电力科学研究院的调查研究结果对感应电动机综合负荷模型参数进行了修正，使之尽量符合我国电网实际，但相对而言依然粗糙。粗糙的负荷模型与精细的电力系统仿真计算要求极不对称，也使其它元件的精确模型不能发挥应有的作用，成为制约电力系统仿真计算结果准确与可信赖程度的关键因素。

随着我国主要区域性电网的全国性互联进程的推进和大受端系统的形成，使得我国电网的复杂程度日益增加，电网规模也空前扩大，电力系统的动态稳定性及电网的电压稳定性等安全稳定问题更加突出，负荷模型对电力系统仿真计算结果的影响已愈益不容忽视<sup>[4]</sup>。因此，电力系统负荷建模是电力系统运行分析、建模与控制领域重要的基础性研究课题。同时，由于电力负荷具有结构复杂、随机时变、地域分散和非线性等特点，负荷建模也是公认的世界性难题，其研究具有重要的理论意义。另外，建立符合电力系统实际的准确的综合负荷模型，对于更加科学合理地运行调度与规划设计，确保电力系统安全稳定经济运行，充分挖掘电网供电潜力，乃至节约电网建设投资，均具有重要且迫切的现实工程意义。

## 1.2 负荷建模的国内外研究现状

一般而言，负荷建模的方法可以归纳为2类，即统计综合法（Component-Based Modeling Approach）和总体测辨法（Measurement- Based Modeling Approach）<sup>[5]</sup>。在过去近40余年中，电力负荷建模基本上沿着这2条道路不断地发展和完善，并已取得了许多可喜成果。

统计综合法是基于元件的一种负荷建模方法，其基本思想是在对负荷构成特性进行全面分析的基础上获得综合负荷模型。美国电力科学研究院（EPRI）在上

世纪 70 年代即开展了基于统计综合法的负荷建模研究，并开发了著名的 LOADSYN 软件包<sup>[6]</sup>。但由于其耗费巨大，国内此类研究很薄弱。文献[7]利用 WEB 技术实现了基于 Internet 的我国台湾电网 1700 用户负荷构成特性调查统计，是继美国 EPRI 的 LOADSYN 工作之后，基于统计综合法负荷建模研究的最新发展。

总体测辨法是基于量测的一种负荷建模方法，其基本思想是将综合负荷作为整体，通过对现场采集的实测数据进行辨识获得综合负荷模型。基于总体测辨法的负荷建模研究起源于上世纪 80 年代，随着计算机数据采集与处理技术的发展和系统辨识理论的日益成熟，成为各国关于负荷建模研究的重要方向，是负荷建模研究最为活跃的方面。中国、美国、加拿大和日本等国相继研制和投运了一批电力系统负荷特性采集装置，并进行了大量的试验，采集了大量数据进行基于总体测辨法的负荷建模研究<sup>[8,9]</sup>。

电气电子工程师协会（IEEE）和国际大电网委员会（CIGRE）均设有专门研究负荷建模的小组，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<sup>[10~13]</sup>。我国的负荷建模研究基本上起步于上世纪 80 年代贺仁睦教授等学者的开创性工作，近 10 来年进展十分迅速。中国电力科学研究院、华北电力大学、清华大学、河海大学、湖南大学等科研院所与东北电网、华北电网、西北电网、广东电网、河南电网、福建电网、湖南电网等有关电力企业合作，对负荷建模课题进行了不断的研究，取得了一系列研究成果，大大丰富了负荷建模理论和推进了负荷模型实用化进程。

国内外负荷建模工作者经过多年的努力，已在负荷模型结构及其参数辨识、负荷特性分类与综合、负荷模型评价与实用化等方面取得了许多可喜成果。

### （1）负荷模型结构及其参数辨识

在负荷建模的研究中，模型结构及其参数辨识是基础性理论研究工作，一直倍受重视<sup>[14~24,27~34]</sup>。长期以来，我国电力系统仿真计算中应用较为广泛的是一比例的感应电动机动态负荷并联静态负荷的综合负荷模型结构<sup>[14]</sup>，且各电网公司根据其电网实际负荷构成情况和应用环境的不同，采用的感应电动机参数和静态负荷模型结构也不尽相同。然而由于电力负荷构成特性的日益繁杂，上述负荷模型结构也存在其应用的局限性。基于此，针对不同的应用需求，研究提出了相应的负荷模型结构及其参数辨识方法。文献[15]采用解耦辨识的方法，提出一种增加无功静态补偿的新型感应电动机模型，提高了模型对无功功率的描述能力；文献[16~18]建立了考虑线路参数和无功补偿的改进感应电动机模型，并提出了考虑配电网络的综合负荷模型及其参数确定方法，使模型更符合电网实际；文献[19]针对含电力机车的牵引变电站综合负荷建模，提出了牵引供电系统综合负荷模型结构，充分考虑了电铁牵引负荷其独特的负荷特性影响。尤其值得指出的是，文献[20~22]研究了配网侧地方小水电等小容量同步发电机电源对综合负荷模型的影响，提出

了“广义负荷”的概念，丰富了负荷模型类。

上述模型结构均具有明确的物理意义，易于被人们理解，称之为机理模型。但由于电力负荷内部结构的复杂性和某些用电设备负荷特性的不确定性，用机理模型有时也难以描述差异较大的综合负荷特性，因此，随着系统辨识理论的发展，非机理负荷模型应运而生。非机理模型不苛求模型的机理解释，其观点是在一个具体系统辨识中，重点强调模型对系统行为的描述能力，达到能较好地等值实际负荷特性的目的。常见的非机理模型有差分方程模型<sup>[23]</sup>、人工神经网络模型<sup>[24]</sup>、支持向量机负荷模型<sup>[25]</sup>、模糊负荷模型<sup>[26]</sup>等。然而，正因为非机理模型的结构及其参数缺乏物理意义，不宜解释，且很难找到一个绝对有效的非机理模型，因而在实际工程应用中，非机理模型的适用范围非常有限。随着综合负荷特性分类与综合<sup>[27]</sup>、结合统计综合法和总体测辨法的统计测辨法<sup>[28]</sup>等研究的逐渐深入，能有效地解决机理模型对较大差异的综合负荷特性描述能力的难点。因此，机理模型结构的研究仍然是未来研究的重要方向。

负荷模型结构确定后，模型参数的辨识相对而言比较容易，文献[29]提出了模型的可辨识性理论，指出合理的模型结构、具有全局寻优能力的辨识算法以及充分的辨识条件是保证模型参数唯一可辨识的基本条件；文献[30]在传统的独立待辨识参数中增加一个能反映感应电动机容量大小的关键参数，构造了具有自适应能力的机理模型，可克服感应电动机模型辨识参数有违实际物理意义的缺陷；文献[31]以 ANN 为基本模型结构应用于机理模型中的动/静比例辨识，提高了其辨识准确度。除此之外，研究较多的现代优化算法，如遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法等<sup>[32,33]</sup>，为负荷模型的参数辨识提供了一些新的算法，大大增强了模型参数的可辨识性，提高了其辨识的准确度。文献[34]针对应用较为广泛的遗传算法存在收敛速度慢和易早熟的缺陷，提出了一种改进的遗传算法，并成功地应用在负荷建模中，有效地提高了模型参数辨识的效率和准确度。负荷模型参数辨识的研究应该属于数值优化的范畴，必将随着优化理论的完善而日趋成熟。

## （2）负荷特性的分类与综合

为解决负荷建模中负荷时变性问题，达到模型准确性和工程实用性的合理折中，负荷特性分类与综合方法研究也是近年来较受重视的工作之一<sup>[35~38]</sup>。文献[35]首次提出负荷模型必须面向综合的观点并讨论了实现综合的基本思路；文献[36]研究了动态负荷特性分类和综合的问题，提出了基于模糊 C 均值聚类的负荷特性分类方法，采用直接综合和加权综合两种方法对分类结果进行综合建模；文献[37]依据随机过程相关性原理，首次提出基于实测响应空间的负荷动特性分类方法，并将其与基于参数空间和基于标准模型响应空间的两种负荷动特性分类方法进行了比较分析；在此基础上，文献[38]提出了基于实测响应空间的负荷动特性直接综合方法，并提出运用判别分析法确定新增实测样本的所属负荷特性类别同时修正

综合负荷模型参数的方法，通过该基于实测响应空间的分类与综合方法修正的综合负荷模型参数，能较好地反映负荷特性的差异和变化，有效地提高了模型参数的准确性。尽管负荷特性的分类与综合引起了较高的重视，但其离工程实用化还有一定的距离，仍是负荷建模研究与工程应用中亟待解决的关键问题之一。

### （3）负荷模型的评价与实用化

随着负荷模型研究的深入和工程实用化的需求，模型的评价与实用化问题也成为研究的重点<sup>[39~42]</sup>。文献[39]提出了电力系统精确仿真和模型实用化问题；文献[40]对三种感应电动机模型从计算精度、参数获取和应用场合进行了系统地比较研究，为模型选择提供了参考依据；文献[42]定义了一种考虑电压扰动强度影响的权重系数，进而提出了一个衡量负荷模型优劣的误差指标，此误差指标作为模型评价依据，比一般作为准则函数的模型响应残差更为合理。目前，负荷模型的评价工作还不可能在实际电网中大规模地进行，这是模型实用化必须经历的阶段，需要电力工作者付出更大努力。

此外，空调、冶炼、铁路等特殊用户的建模<sup>[43,44]</sup>、在线负荷建模方法<sup>[45]</sup>、负荷特性对电压稳定的影响<sup>[46]</sup>、负荷特性对电力交易的影响<sup>[47]</sup>、基于广域测量系统的负荷区域简化等值建模<sup>[48]</sup>等研究，都是负荷建模研究的重要工作。

应当指出，迄今发表的研究成果表明，近年来国内学者的负荷建模研究较之国外同行要活跃得多，这表明电力负荷建模的研究在国内受到前所未有的关注与重视，也表明加快推进负荷建模实用化研究是工程仿真应用的迫切需求。

## 1.3 分布式发电与负荷建模

### 1.3.1 智能电网与分布式发电

随着全球气候环境的恶化，节能减排、绿色能源、可持续发展成为现阶段各国关注的重点。人们对电网安全、经济、交互等方面的需要和用户对电能质量的高标准要求，促使智能电网的研究成为近年来全球关注的热点<sup>[49]</sup>。根据本国发展战略的不同，各国智能电网的发展历程和目的也不尽相同，但为应对各自挑战，各国都在积极研究并提出电力行业未来的发展方向，智能电网无疑是共同的选择。

美国自 2001 年由 EPRI 开始“IntelliGrid”（智能电网）研究<sup>[50,51]</sup>，到 2003 年布什总统要求美国能源部（DOE）致力于电网现代化，发布“Grid 2030”和启动电网智能化（GridWise）项目<sup>[52,53]</sup>，再到 2009 年奥巴马总统将智能电网提升为美国国家战略的高度<sup>[54]</sup>，其关注的重点是电力网络基础构架的升级更新，同时最大限度地利用信息技术，实现机器智能对人工的替代，以期建设满足智能控制、智能管理、智能分析为特征的灵活应变的智能电网。其主要目的有三个：一是通过对比较落后的电网设备进行更新改造，从而提高电网运营的可靠性，防止类似

“美加大停电”的事故重现和恐怖袭击可能会造成的破坏；二是提高能源利用效率，减缓化石能源的消耗；三是通过智能电网的建设将美国拉出金融危机的泥潭。

欧洲发展智能电网也有其独特的发展背景，主要是由大力开发可再生能源、清洁能源，以及电力需求趋于饱和后提高供电可靠性和电能质量等需求所决定的<sup>[55,56]</sup>。其关注的重点是可再生能源和分布式能源的发展，并带动整个行业发展模式的转变。其智能电网的特征和目标主要体现在四个方面：一是灵活性（Flexible），满足用户多样化的电力需求；二是易接入性（Accessible），保证所有用户都可接入电网，尤其对于可再生能源和高效、清洁的本地发电；三是可靠性（Reliable），提高电力供应的可靠性与安全性；四是经济性（Economic），通过改革及竞争调节实现最有效的能源管理，提高电网的经济效益。

我国智能电网研究起步于数字化电网（Digital Grid）和信息化企业（Informatized Enterprise），重点关注对电力生产和管理信息的数字化获取和整合，促进系统安全可靠性、企业效益和服务水平的持续提高<sup>[57]</sup>。我国在特高压输电技术国际会议上给出智能电网的定义是<sup>[58]</sup>：以坚强网架为基础、以信息通信平台为支撑、以智能控制为手段，包括电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度各个环节，覆盖所有电压等级，实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合，是坚强、可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代化电网。

综合各国智能电网发展战略，智能电网应该具备下列六个主要特征<sup>[59]</sup>：1) 坚强（Robust）。在电网发生大扰动和故障时，电网仍能保持对用户的供电能力，而不发生大面积停电事故；在自然灾害和极端气候条件下、或人为的外力破坏下仍能保证电网的安全运行；具有确保信息安全的能力和防范计算机病毒破坏的能力。2) 自愈（Self-Healing）。具有实时、在线连续的安全评估和分析能力，强大的预警控制系统和预防控制能力，自动故障诊断、故障隔离和系统自我恢复的能力。3) 兼容（Compatible）。能支持可再生能源的正确、合理地接入，使用分布式发电和微电网的接入，能使需求侧管理的功能更加完善，实现与用户的高效互动。4) 经济（Economical）。支持电力市场和电力交易的有效开展，实现资源的合理配置，降低电网损耗，提高能源利用效率。5) 集成（Integrated）。实现电网信息的高度集成和共享，采用统一的平台和模型，实现标准化、规范化和精细化的管理。6) 优化（Optimized）。优化资产的利用，降低投资成本和运行维护成本。

现阶段，国内外关于智能电网的研究尚处于初期研究阶段，相关报告多见于国际会议文章和一些研究机构与企业（如 EPRI、IBM、Xcel、埃森哲、思科公司）的技术研究报告，主要集中在智能变电站、智能调度、微电网、分布式发电等相关领域的研究。而作为智能电网的重要组成部分，分布式发电（Distributed Generation）以其节能环保、发电方式灵活、投资省、与环境兼容等特点，早在上

世纪 80 年代就被美国、欧洲等国纷纷大量采用并取得了长足的发展<sup>[60,61]</sup>。我国也于近年在北京、上海等地区建立了分布式发电的应用示范工程，并开展了一系列的研究工作<sup>[62]</sup>。

分布式发电是指功率在几十千瓦到几十兆瓦范围内、模块式的、分布在负荷附近的清洁环保发电设施，能够经济、高效、可靠地发电。分布式发电是区别于传统集中发电、远距离输电、大互联网络的发电形式。分布式发电以燃气轮机、微型燃气轮机、燃气发电机等为动力，以天然气、氢气、太阳能、风能、生物质能等为能源，可实现冷、热、电联供，是一种新型的发电和能源综合利用方式。分布式发电的原动机可以是燃气轮机、内燃机、风轮机、太阳能光伏、燃料电池、储能等多种形式的能量转换装置<sup>[63]</sup>。

分布式发电具有发电方式灵活、不过度依赖电网运行状况等特点，能为构建坚强、自愈的智能电网提供有利的保障；分布式发电接口技术的发展和需求侧管理系统的构建又能使智能电网实现高效的兼容与集成，实现与用户的相互补充；分布式发电大量采用清洁可持续发展能源，有效地提高能源利用效率和降低投资成本，又充分体现了智能电网经济与优化的特征。因此，随着智能电网研究的深入开展，分布式发电的地位与作用更加突出，开展分布式发电的相关研究也成大势所趋。

### 1.3.2 分布式发电对电力系统影响研究

大力开发可再生洁净能源的分布式发电技术是国家最新科技发展战略。分布式电源（Distributed Generation Source, DGS）具有污染少、可靠性高、能源利用率高、安装地点灵活等优点，将成为未来智能电网的重要组成部分，是未来电力系统的发展趋势之一。与此同时，分布式发电给大电网运行和控制所带来的一系列理论与技术问题也是必须深入研究的课题。基于此背景，本世纪初即有学者提出了微电网的概念，相关研究十分活跃，成为电力系统领域的热点问题之一<sup>[64,65]</sup>。

分布式发电是建立在电力电子技术基础之上的，大量的电力电子转换器增加了大量的非线性负载，将会引起电网电流、电压波形发生畸变，引起电网的谐波污染，有学者就分布式发电对电能质量的影响进行了专门的研究<sup>[66]</sup>；DGS 接入配电网后，辐射式网络将变为多电源网络，潮流也不再单向地从变电站母线流向各负荷，配电网的根本性变化使得电网各种保护定值与机理发生了深刻变化，分布式发电对继电保护的影响也不容忽视<sup>[67]</sup>；分布式发电的普及也将对电力市场的走向和最后格局产生深远的影响<sup>[68]</sup>：首先电力公司和用户之间将形成新型的关系，用户可以从电力公司买电，也可以用自己拥有的 DGS 向电力公司卖电或为电力公司有偿提供削峰、紧急功率支持等服务；另外，含 DGS 的配电网的规划与设计<sup>[69]</sup>、分布式发电的市场体系、相应的法律、法规和行业规范<sup>[70]</sup>等，也是分布式发电对

电力系统影响研究的方向之一。

就分布式发电对电力系统运行分析、建模与控制领域的影响而言，国内外考虑 DG 影响的相关研究工作尚起步，主要集中在两个方面：一是风力发电、太阳能光伏电池、燃料电池、微型燃气轮机等 DGS 自身的数学模型；二是感应发电机类 DGS 的接入对电网电压-无功控制和电压稳定的影响<sup>[71,72]</sup>。而考虑分布式发电设备接入配电网后对电网综合负荷特性的影响及其建模方面的研究则鲜见报道。

### 1.3.3 考虑分布式发电的负荷建模研究的必要性

分布式电源接入电网一般有两种基本方式。一是集中式——单一类型的 DGS 群以较高（10kV 以上）电压直接接入大型电力系统主网（如大型风电场或大型太阳能电场）；二是分散式——大量类型各异、容量不同的 DGS 以 0.4kV 或 10kV 供电电压分散地接入大电网受端配电系统。就电网仿真计算所需模型而言，“集中式”的建模即是大型风电场（或太阳能电场）等的建模问题，相对比较简单；“分散式”的建模问题则要复杂得多。

电网仿真所需负荷模型一般是主网之 220kV 变电站的 110kV 或 220kV 母线的综合负荷模型，它是包括 110kV 及以下配电网络在内的综合负荷的等效描述。在 DGS 分散地接入配电网的情况下，大量的 DGS 成为电力系统配电网综合负荷的重要组成部分，从而使原本就十分复杂的综合负荷特性的复杂程度大大增加。定义此时的配电网综合负荷为“广义综合负荷”。各种 DGS 其自身特性及控制方式、功率出力水平、物理分布位置等不同因素都可能对连接于主网的综合负荷特性产生不同程度的影响；分布式发电技术的逐步推广使得分布式电源容量的不断增大，无疑将使这种影响成为决定配网侧综合负荷特性的重要因素。因此，如何准确描述分布式电源接入后的配电网综合负荷特性成为电力系统综合负荷建模面临的新的挑战；深入研究含有大量特性各异、分布广泛、容量比例逐步增加的分布式电源之配电网综合负荷的建模原理、方法和技术，建立考虑分布式发影响的“广义综合负荷模型”，具有重要理论与实际意义，更是具有前瞻性战略意义的重要课题。

综上所述，鉴于我国负荷建模研究与工程应用现状，结合国家大力开发可再生洁净能源分布式发电技术与装备的科技发展战略，本文研究考虑分布式发电的配电网综合负荷建模方法，旨在为分布式发电技术大规模应用提供电力系统仿真建模与分析控制的理论和技术储备，具有前瞻性战略意义和广泛的工程应用前景。

### 1.3.4 研究方法与技术路线

研究考虑分布式发电的负荷建模，采用何种研究方法尤为重要。一方面，分布式发电尚处于发展阶段，还未大范围推广应用，基于统计综合法的负荷建模需

要有针对性地进行调查统计，对于现阶段而言还不够成熟；另一方面，基于总体测辨办法的负荷建模需要大量的系统运行数据，现阶段虽然这些数据还无法从电力系统实地采集，但可以结合现有的计算机数字仿真来获取，因此，就现阶段而言更加适合考虑分布式发电的负荷建模研究。同时，随着智能电网研究的逐步开展，利用广域测量系统（Wide Area Measurement System，WAMS）进行系统运行数据的实时采集与传送，为智能电网在线实时仿真计算提供准确反映系统实际运行情况的模型及其参数成为未来智能电网的一个重要研究方向，而基于总体测辨办法的利用 WAMS 实测数据的在线实时负荷建模正好能满足这种要求。因而，相对而言，现阶段采用总体测辨负荷建模的方法更适合考虑 DG 的负荷建模研究，但需要充分结合计算机仿真实验与系统辨识方法。

基于总体测辨办法的负荷建模研究的基础就是模型结构的确定，分布式发电设备种类繁多、特性各异，当其接入配电网后，难以避免的会对配电网综合负荷特性及其模型结构产生不容忽视的影响。如何充分挖掘不同分布式电源对配电网综合负荷特性的影响，构建含不同分布式电源的广义综合负荷模型类，是考虑分布式发电的负荷建模研究的基础性也是十分必要的工作，具体研究思路如下：

- ① 深入研究考虑配电网影响的综合负荷模型结构与参数确定方法，为考虑分布式发电接入配电网之后的负荷建模研究工作提供一个基础有效的配电网综合负荷模型结构体系；
- ② 在机理分析的基础上建立风力发电、太阳能光伏电池、燃料电池、微型燃气轮机的典型分布式发电系统的数学模型，为计算机仿真提供既能体现其本质特性，又适合负荷建模研究的基础模型库；
- ③ 基于计算机仿真实验，研究不同分布式发电系统的稳态和动态特性，建立能准确描述其外特性的等效模型；
- ④ 结合①建立的配电网综合负荷模型和③建立的分布式发电系统的等效描述模型，构建含不同分布式电源的广义综合负荷模型类；
- ⑤ 充分考虑 DGS 接入容量比例、地理位置、负荷水平、扰动程度等影响因素，进行系统动态仿真，采集各研究节点相应的数据样本，进行总体测辨负荷建模；
- ⑥ 基于计算机数字仿真，对模型进行综合性能检验，提出较完善的含不同分布式电源的配电网广义综合负荷模型类，形成实用化的、适应于含分布式电源配电网的广义综合负荷建模的系统理论与方法。

总体来说，采用上述的从微观机理分析到宏观等效综合描述、从统计规律总结到综合特性检验的总体研究路线，比较适合于现阶段考虑分布式发电的配电网负荷建模研究。

## 1.4 本文的主要工作

本文主要针对 1.3.4 节所阐述的“具体研究思路”中的①~④项内容，采用从微观机理分析→宏观等效综合描述、从统计规律总结→综合特性检验的总体研究路线，围绕考虑分布式发电的配电网综合负荷建模方法开展研究，主要工作如下：

第二章阐述了总体测辨负荷建模基本原理与方法。在初步阐述总体测辨负荷建模方法的基本原理与待解决的关键理论问题的基础上，重点对其涉及的两个关键研究问题——模型结构和参数优化方法进行了具体细致的解析描述；基于此，提出了本文研究的重点——将围绕机理类负荷模型结构，研究并提出考虑分布式发影响的更为合理有效的配电网机理综合负荷模型类；最后，提出了总体测辨负荷建模的实现过程。

第三章研究了配电网集结等效的综合感应电动机模型及其总体测辨建模方法。建立了基于配电网集结等效的“考虑配电网参数及无功补偿的综合感应电动机负荷模型”，给出了详细的物理分析及数学推导过程，同时提出了模型的“递推辨识策略”；通过大量基于现场实测负荷特性数据的建模，从模型描述能力、参数稳定性、泛化能力等方面，验证了所建立的“考虑配电网集结等效的综合感应电动机模型”的有效性，为考虑分布式发电的负荷建模提供了基础有效的模型结构体系。

第四章研究了考虑风力发电的配电网综合负荷建模方法和模型结构。在构建含风力发电的配电网仿真系统基础上，进行电力系统暂态仿真，获取模型参数辨识所需的数据样本；提出了风力发电可以看作一个功率消耗为负的广义动态负荷，可以用异步发电机来等效描述；进而提出了任意动静比例的异步电机并联静态负荷的配电网广义综合负荷模型来描述含风力发电的配电网综合负荷特性；通过 3 种典型运行方式的建模，验证了所提出的配电网广义综合负荷模型的综合适应性能力。

第五章研究了不同影响因素下风力发电对配电网综合负荷建模的影响。通过构建典型的配电系统，研究了不同容量比例和不同地理位置的集中和分散风力发电接入对配电网综合负荷特性的影响规律；针对这些不同的影响因素下的建模研究，从模型的拟合效果、平均拟合误差和辨识参数 3 个方面，对第四章提出的广义综合负荷模型进行了验证；结合第三章提出的配电网集结等效的综合感应电动机模型，对第四章提出的广义综合负荷模型进行了扩展，提出“任意动静比例的配电网集结等效的异步电机广义综合负荷模型”，并进行了比较分析。

第六章研究了考虑直流分布式电源的配电网综合负荷建模。首先，通过对光伏电池和燃料电池等直流分布式电源自身机理特性和运行控制方式的研究，构建了适合作为分布式发电的直流分布式发电系统，建立了既能反映其机理特性又适

合负荷建模研究的等值模型；其次，通过直流分布式电源的稳态和暂态特性分析，提出了直流分布式电源可以看作一个功率消耗为负的广义静态负荷，在负荷建模中可以用恒功率模型来等效描述；进而提出了考虑直流分布式电源的广义综合负荷模型结构，通过计算机仿真和辨识建模对其进行了有效性检验。

第七章研究了考虑微型燃气轮机的配电网综合负荷建模。首先，通过对微型燃气轮机自身机理特性和运行控制方式的研究，构建了适合作为分布式发电的微型燃气轮机发电系统，建立了既能反映其机理特性又适合负荷建模研究的等值模型；其次，通过其稳态和暂态特性的分析，提出了微型燃气轮机可以看作一个功率消耗为负的广义动态负荷，在负荷建模中可以用一阶微分方程模型来等效描述；进而提出了考虑微型燃气轮机的广义综合负荷模型结构，通过计算机仿真和辨识建模对其进行有效性检验。

结论部分对全文的研究工作进行了总结，介绍了本文的主要研究成果，并指出今后进一步研究工作的内容和方向。

## 第 2 章 总体测辨负荷建模基本原理与方法

### 2.1 引言

从上世纪 60 年代迅速蓬勃发展起来的系统辨识理论，到 80 年代前后已取得了令人瞩目的成就，加之计算机数据采集与处理技术的发展，为总体测辨负荷建模方法的产生奠定了重要的基础。该方法简单、实用，不需要过多依赖验前知识，建模数据直接来源于实际系统，是一种颇具吸引力的负荷建模方法。目前，该方法不断吸收系统辨识理论的最新成果，各国学者基于此的研究工作十分活跃<sup>[73,74]</sup>。

同时，随着智能电网的发展和广域测量系统（WAMS）的日益完善，使得以在线实时模型为基础的电力系统实时仿真计算趋势日益明显。这就要求能够实现在线实时的负荷建模，而基于现场实测数据的总体测辨负荷建模方法恰好能满足此要求。因此，总体测辨负荷建模方法依然是负荷建模研究工作的重要发展方向。

另外，根据 1.3.4 节的分析可知，就现阶段相对而言，总体测辨负荷建模方法也更加适合考虑分布式发电的负荷建模研究。基于此，本章就总体测辨办法的基本原理与待解决的关键理论问题进行详细的阐述，对总体测辨负荷建模涉及的两个关键问题——模型结构和参数优化方法结合本文的具体研究内容，进行系统的解析描述，最后总结总体测辨负荷建模方法的实现过程。本章工作是本文后继各章工作的理论基础。

### 2.2 基本原理与基本步骤

#### 2.2.1 基本原理

总体测辨办法负荷建模是通过现场实验和在线捕捉电力系统的自然扰动获得负荷所在母线的电压、频率、电流、有功和无功数据，然后基于系统辨识理论，根据负荷的观测数据得到综合负荷模型的结构和参数，使得模型响应能最好地拟合观测得到的负荷响应数据，并且要求通过模型验证，确保所建模型在仿真计算要求的范围内具备内插、外推的能力，使模型既能突出本质又能简化地描述负荷的行为，其原理示意如图 2.1 所示。

图 2.1 中，“实际动态负荷”是变电站母线综合负荷，即待辨识系统；“数学模型”即综合负荷模型，它是待辨识系统特性的等效描述； $\mathbf{u}=[u(0), \dots, u(L)]^T$  是系统激励，通常为负荷母线电压和系统频率； $\mathbf{y}$  和  $\mathbf{y}_m$  分别为实测系统输出和模型输出，通常称之为“实测响应”和“模型响应”，一般为负荷从电网吸收的功率或电流。

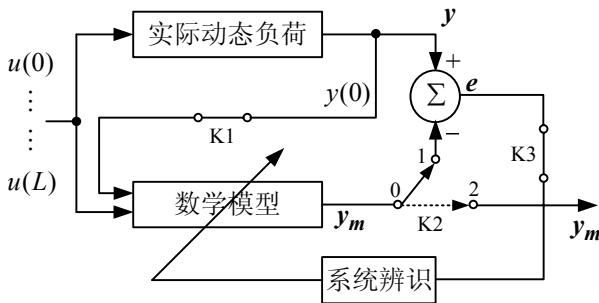


图 2.1 总体测辨负荷建模基本原理示意图

定义实测响应和模型响应之间的误差如式 (2.1) 所示。

$$e = y - y_m \quad (2.1)$$

很显然, 对于一定的变电站母线综合负荷而言, 在给定激励作用下, 实测响应  $y$  是恒定的; 在模型结构确定后, 模型响应  $y_m$  则是模型参数  $\theta$  的函数, 从而误差  $e$  是模型参数  $\theta$  的函数。

定义衡量模型响应对实际综合负荷响应拟合程度的性能指标  $J$ , 如式 (2.2) 所示, 它是  $e$  从而  $\theta$  的函数。

$$J = J(e) = J(\theta) \quad (2.2)$$

在系统辨识中, 通常称  $J$  为“准则函数”, 总体测辨办法负荷建模的任务就是: 选择合适的模型结构, 确定模型参数, 使性能指标 (即准则函数) 最小。

$$J(\theta) \rightarrow \min J(\theta) \quad (2.3)$$

通过上述分析可知, 基于总体测辨法的负荷建模有三个关键要素:

### 1) 输入一输出负荷特性数据样本的获取

总体测辨办法负荷建模离不开现场实测数据, 较早的数据采集系统中有功功率、无功功率的测量采用模拟转换器, 数据由磁带录波仪记录。模拟转换器具有响应速度慢, 测量电路复杂等缺点; 磁带录波仪使用不方便, 且数据处理麻烦。随着计算机技术和通信技术的发展, 新型的微机负荷特性数据采集装置已具备了在线连续采集负荷母线数据、通过先进的通信方式远距离传送数据等功能, 为负荷建模提供了良好的硬件环境。近年来, 随着广域测量系统 (WAMS) 的大力推广应用, 利用其进行负荷特性数据的记录与传送, 能为负荷建模提供准确实时可靠的现场实测数据。利用该系统可以掌握扰动过程中电网的整体动态信息, 必将随着智能电网的逐步深入研究受到越来越多的重视。值得注意的是, 在进行总体测辨办法负荷建模的研究过程中, 受实验设备、电网安全等限制, 往往很难即时准确地获取现场实测数据, 因此基于计算机仿真方法, 进行相关电力系统仿真计算获取负荷特性数据, 以此作为现场实测数据的补充, 也是一种重要的实验研究手段。

### 2) 模型结构的选择

根据不同的应用环境和适用范围, 模型结构也不尽相同。在经验的基础上, 通过辨识——检验——选择的不断调整与重复, 来获取合适的模型结构。模型结

构的确定还没有严格的理论指导，需要针对具体的对象而定，不能单纯地追求“精确”，实用也至关重要，力求模型结构逼近“较精确”，且结构“较简单”，符合实际现场应用要求。

### 3) 准则函数

准则函数  $J(\theta)$  即模型参数调整的目标函数，其选取是系统辨识的基本要素，选择合适的准则函数对辨识结果和精确性具有重要的意义。

## 2.2.2 基本步骤

总体测辨负荷建模基本步骤如图 2.2 所示，主要包括 4 个过程。

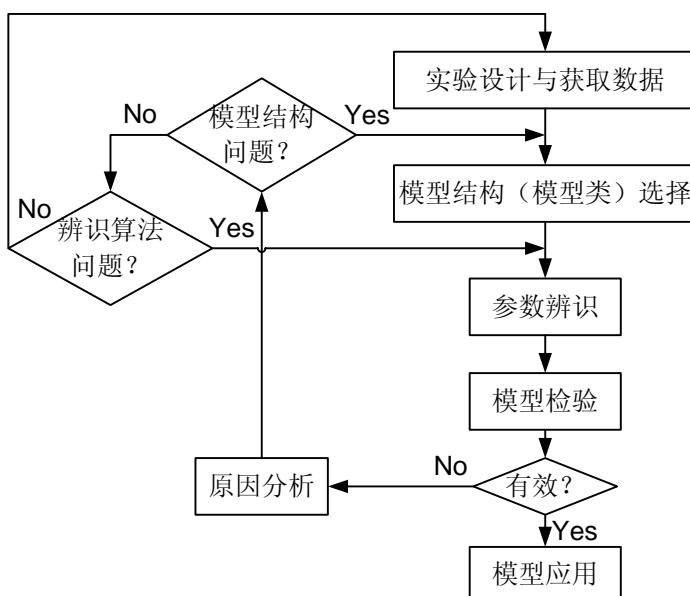


图 2.2 总体测辨负荷建模基本步骤

1) 实验设计与获取数据：为获取模型辨识所需的现场实测数据，需要开发相关的采集装置，进行实验地点的选择；或者当受限于现场设备与安全因素等时，需要构建合适的计算机仿真系统，进行电力系统仿真，按照数据要求和记录长度，获取相应的负荷特性数据，经过数据预处理，消除直流、低频和高频成份的影响，以此替代现场实测数据，为总体测辨负荷建模所用。

2) 模型结构（模型类）的选择：根据不同的应用环境和辨识要求，选择合适的模型类型（包括静态负荷、动态负荷、综合负荷等）和模型结构，确定待辨识参数。

3) 参数辨识：在如图 2.1 所示的原理图中，将开关 K2 之 0—1 接通，0—2 断开，同时开关 K3 接通，辨识模型参数，确定独立待辨识参数相量，并根据系统的初始稳态条件确定非独立待辨识参数相量。

4) 模型检验：在如图 2.1 所示的原理图中，将开关 K2 之 0—1 断开，0—2 接通，同时开关 K3 断开，由系统输入相量的时间序列求解模型响应，这一过程相当

于综合负荷建模的系统“动态回响测试”。在此基础上，进行包括拟合效果、泛化能力、参数分散性等模型检验。针对模型检验没有达到既定目标的，分析其原因：属于模型结构选择问题的，就要重新进行模型结构的选择；属于参数辨识算法问题的，就要重新选择合适的参数优化方法；均不属于上述两类问题的，就要重新设计实验，获取新的数据重新进行上述负荷建模过程。

## 2.3 待解决的关键理论问题

根据上述基本原理与基本步骤的阐述，总体测辨负荷建模需要解决的关键理论问题包括下述几个方面：

### 1) 辨识系统的数学模型

辨识系统的数学模型就是负荷模型结构的解析描述，是总体测辨负荷建模的基础。电力系统综合负荷是一个动态系统，按其描述方法和分析定义域的不同可以表达成不同的数学方程，所以在系统辨识过程中，弄清楚各类数学模型的表达形式、相互转换及其应用场合是十分必要的。详细负荷模型结构阐述见 2.4 节所示。

### 2) 非独立待辨识参数的确定方法

由于模型的初始稳态条件必须要与动态辨识系统的初始稳态条件相一致，因此模型待辨识参数分为独立待辨识参数和非独立待辨识参数，其中非独立待辨识参数是在独立待辨识参数确定后，根据稳态约束方程解出，在参数辨识过程中是这样，在模型检验时也是这样。与此相对应，无论在参数辨识阶段或模型检验阶段，图 2.1 中之开关 K1 当且仅当  $t=0$  时闭合。

对于负荷建模来说，上述原则具有重要的物理意义，即：在电压激励下的负荷系统响应，不仅取决于模型参数及系统激励，而且也与综合负荷功率及电压水平有关，称之为“初始等效条件”。初始等效条件对于模型的泛化能力检验以及模型的实际应用尤其重要，它意味着即使是同样的模型参数，当应用于具有同样电压激励但不同初始条件的实际系统时，其对应的非独立待辨识参数是不同的。

### 3) 模型参数辨识优化方法

模型类型和结构确定后的参数辨识相对而言来说比较容易，本质上就是一个单纯的数值优化问题，针对不同的模型类型的参数辨识和本文后继章节采用的参数辨识方法将在 2.5 节进行详细阐述。

### 4) 模型检验原理与方法

模型检验是考核模型辨识是否成功的手段，是评价模型是否能有效地应用于现场实际的重要步骤。模型检验失败，必须重新开始建模。由于辨识建模本质上是一种逼近，所以不能预期得到与实际系统完全一致的模型，通常在主要动态指标或过程得到一定误差范围的吻合，且误差又满足工程要求，即可认定模型成立。据此，常用的模型检验原理与方法有：

a) 模型描述能力检验：利用实际动态负荷的“实测响应”和系统动态回响测试的“模型响应”进行比较，分析其拟合效果，定义相关的拟合残差指标，以此来判断该模型的描述能力。

b) 模型泛化能力检验：在仿真计算中，由于系统节点与短路点的电气距离不同，各节点电压变化的幅度也不同，因而负荷模型在使用中面临的电压变化就可能差别很大。这就要求所建负荷模型无论是在较大和较小的电压扰动下都能正确描述负荷的特性，即要求负荷模型具有良好的内插、外推特性，也就是要进行模型的泛化能力检验。常用的模型泛化能力检验方法是采集多组不同扰动幅度的激励与实际系统响应数据，利用扰动幅度为 A 的激励与系统响应数据进行模型参数的辨识得到一组模型参数，然后基于该模型参数，输入扰动幅度小于 A 的激励得到模型响应(内插验证)，和输入扰动幅度大于 A 的激励得到模型响应(外推验证)，比较这些模型响应和与对应扰动幅度的实际系统响应的拟合效果和误差，来进行模型的泛化能力验证。

c) 反演检验：通过用系统辨识的动态模型来替代原有的实际动态系统进行系统的仿真反演，看能够得到与原实际动态系统相吻合的动态特性，以此来检验模型是否有效。

综上所述，总体测辨负荷建模中，除数据采集、滤波、剔除野值、必要的电气量计算等过程以外，其核心应为负荷模型的辨识过程。显然，模型结构与参数辨识是其负荷建模理论与方法的具体体现，围绕这两个方面 2.4 节与 2.5 节将进行具体的阐述。

## 2.4 负荷模型的类型与结构

在电力系统遭受扰动的暂态过程中，各负荷点的电压和频率都将发生变化，与此同时各类负荷吸收的功率也随之改变，负荷功率随电压和频率变化而变化的特性称为负荷特性，而描述这种负荷特性的数据、曲线或解析表达式称为负荷模型。由于一般在电力系统机电暂态过程中，电网频率的变化甚小，因此一般只考虑负荷功率随电压变化的特性。

负荷模型通常按照是否反映负荷的动态特性，一般分为两种类型，即静态模型和动态模型，动态负荷模型进一步可分为机理模型和非机理模型，针对上述不同类型负荷模型的结构，本节分别进行详细的阐述。

### 2.4.1 静态负荷模型

静态负荷模型主要描述负荷功率随电压的缓慢变化而改变的特性，在一定电压变化范围内能较好地描述很多负荷的静态特性，常用代数方程来描述。静态负荷模型主要适用于潮流计算和以潮流计算为基础的稳态分析。在电力系统动态仿

真中，静态负荷模型一般适用于计算结果对负荷模型不太敏感的负荷点和长过程动态分析等。基本的静态负荷模型结构有多项式模型和幂函数模型<sup>[5]</sup>。

多项式模型按照负荷功率随电压变化特性的不同，一般将其分为恒定阻抗（Z）、恒定电流（I）、恒定功率（P）三类。由于实际电力系统仿真计算中所需要的常是各节点（也即变电站母线）的综合负荷特性。因此其负荷特性应为上述三类负荷按一定比例的组合，因此多项式（ZIP）模型可用如式（2.4）所示的二次多项式函数来描述。

$$\begin{cases} P = P_0 \left[ a_p (U/U_0)^2 + b_p (U/U_0) + c_p \right] \\ Q = Q_0 \left[ a_q (U/U_0)^2 + b_q (U/U_0) + c_q \right] \end{cases} \quad (2.4)$$

其中

$$a_p + b_p + c_p = 1, \quad a_q + b_q + c_q = 1$$

式中： $U$  和  $U_0$  分别为实际电压和基值电压； $P$  和  $Q$  分别为端电压为实际电压  $U$  时负荷吸收的功率； $P_0$  和  $Q_0$  分别为端电压为基值电压  $U_0$  时负荷吸收的功率；系数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  为各类负荷所占比例，各系数值反映了负荷的静态特性，针对不同的负荷群其值具有不同的差异，这些系数是负荷模型参数辨识的对象。

幂函数模型通常用如式（2.5）所示的幂函数来描述。

$$\begin{cases} P = P_0 (U/U_0)^{P_U} \\ Q = Q_0 (U/U_0)^{Q_U} \end{cases} \quad (2.5)$$

式中： $P_U$  和  $Q_U$  分别反映负荷的静态特性，是负荷模型参数辨识的对象。

应当指出，上述模型均未考虑系统的频率影响，由于一般在电力系统机电暂态过程中，电网频率的变化甚小，因此一般忽略系统频率对负荷特性的影响。当计及频率的影响时，上述模型均需增加相应的频率影响因子，详细模型描述参见文献[5]所示。

静态负荷模型除上述多项式模型和幂函数模型外，还有指数模型、修正型幂函数模型、带负指数的多项式模型等，根据国内外大量试验工作的经验，一般以采用多项式模型及幂函数模型为主。

#### 2.4.2 机理动态负荷模型

在电力系统中，感应电动机占电力负荷的绝大部分，机理动态负荷模型通常就是感应电动机模型，一般将感应电动机模型并联有关静态负荷模型作为综合负荷动态行为的描述。其数学模型可以用如式（2.6）所示的非线性状态方程和式（2.7）所示的输出方程来描述。

$$\dot{x} = f(u, x, y, \alpha, \beta) \quad (2.6)$$

$$g(u, x, y, \alpha, \beta) = 0 \quad (2.7)$$

满足稳态约束

$$G(u_0, x_0, y_0, \alpha, \beta) = 0 \quad (2.8)$$

式中： $u$  为输入激励相量； $x$  为状态相量； $y$  为输出相量； $\alpha$  为独立待辨识参数相量； $\beta$  为非独立待辨识参数相量，当  $\alpha$  已知后，可从稳态约束方程求解  $\beta$ 。

上述式 (2.6) ~ (2.8) 所描述的数学模型就构成了机理动态综合负荷模型的基本解析描述的一般形式，根据模型类型和结构的不同，其具体解析描述也不尽相同，且其参数根据等值的条件用系统辨识方法求出。

值得注意的是，这种模型采用习惯的电气参数，具有明确的物理意义，易于被人接受，因此在电力系统暂态仿真计算分析中被广泛的采用，也是相关研究的重要方向之一。各国根据自身不同的实际情况，均采用了不同的感应电动机模型及其典型参数<sup>[5]</sup>。然而，随着各区域或省级电网的日益复杂、地方小电源和分布式发电的接入等影响因素的增加，使得传统的感应电动机类综合负荷模型存在一定的缺陷，阻碍了其工程应用。基于此，本文后继章节充分考虑这些影响因素的增加，研究并提出更为合理的机理类负荷模型结构，为负荷模型的实用化进程提供理论与方法的支持。

### 2.4.3 非机理动态负荷模型

非机理模型是在系统辨识理论发展过程中，从大量具体动态系统建模中概括出来的，其基本观点是将整个负荷群当做一个从该节点看进去的“黑箱”或“灰箱”，在具体系统辨识中，着重强调模型对系统输入——输出特性的描述能力，而不必苛求模型的机理解释。常见的非机理模型分为线性或非线性动态系统形式负荷模型和模型结构未知的复杂系统描述模型，前者包括差分方程、传递函数、状态方程等形式，这些模型本质基本一致，可以相互转换与统一；后者包括人工神经网络负荷模型、支持向量机负荷模型、模糊负荷模型、样条函数负荷模型等，且尤以人工神经网络模型的研究最为活跃。本小节以差分方程和人工神经网络负荷模型为例，对其模型结构进行简单的阐述。

#### 2.4.3.1 差分方程形式负荷模型

差分方程由于结构简单，需要数据信息较少，可以从输入——输出总体上反映负荷的外部动态特性，因此，对于负荷成份比较复杂，量测信息较少的系统可以采用差分方程进行辨识。其模型结构可分为线性差分方程模型和非线性差分方程模型，模型描述分别如式 (2.9) 和 (2.10) 所示<sup>[75]</sup>。

##### 1) 线性差分方程模型

$$\Delta y(k) = \sum_{i=1}^n A_i \Delta y(k-i) + \sum_{i=0}^m B_i \Delta U(k-i) + \sum_{i=0}^l C_i \Delta f(k-i) \quad (2.9)$$

式中:  $\Delta y$  为输出的有功或无功, 也可为相应的电流分量;  $\Delta U$  和  $\Delta f$  分别为电压和频率变量;  $n$ 、 $m$ 、 $l$  分别为各对应分量所采用的阶数;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为各采样时刻输入一输出的函数关系系数。

## 2) 非线性差分方程模型

$$\begin{aligned}\Delta y(k) = & \sum_{i=1}^n A_i \Delta y(k-i-1) \cdot \Delta y(k-i) \\ & + \sum_{j=0}^q \sum_{i=0}^m B_{ij} \Delta U(k-i-1) \cdot \Delta U(k-i) + \sum_{i=0}^l C_i \Delta f(k-i)\end{aligned}\quad (2.10)$$

式中各项含义同式 (2.9), 电压项的高次项用来表示负荷的非线性特性。

### 2.4.3.2 人工神经网络负荷模型

电力系统综合负荷构成的复杂性决定了其高度的非线性特点, 人工神经网络由于具有较强的非线性映射能力, 近年来在负荷建模研究中得到了较为广泛的关注<sup>[24]</sup>。常用的人工神经网络负荷模型多基于 BP (Back Propagation) 算法, 且进行了不同程度的改进<sup>[31]</sup>。然而 BP 神经网络应用于综合负荷建模存在关键性的缺陷, 主要是由于 BP 神经网络或其改进结构本质上是一种静态的前向型网络, 应用于负荷建模时参数空间非常庞大, 不便于实际应用。基于此, 文献[76]提出了一种适合描述综合负荷动态特性的 Elman 神经网络模型, 其基本结构如图 2.3 所示。

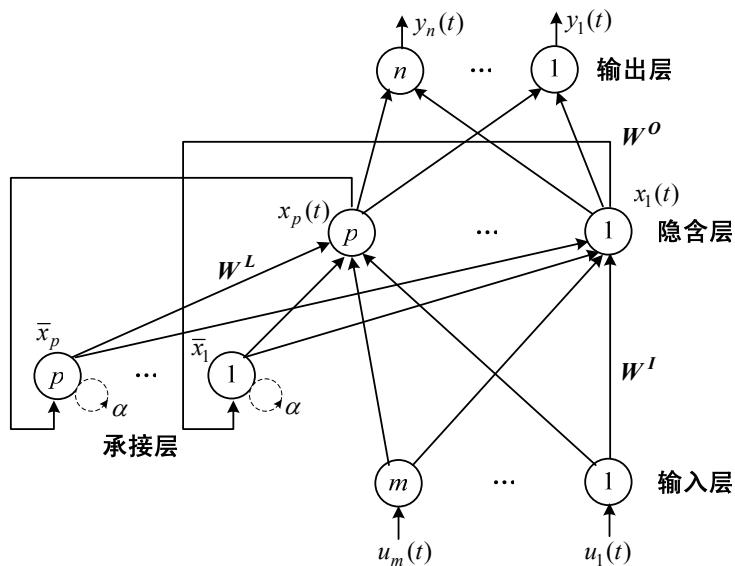


图 2.3 Elman 神经网络模型结构

图 2.3 所示的 Elman 神经网络模型由输入层、输出层、隐含层和承接层构成, 其中输入相量和输出相量分别为  $\mathbf{U}(t) = [u_1(t), \dots, u_m(t)]^T \in \mathbf{R}^{m \times 1}$  和  $\mathbf{Y}(t) = [y_1(t), \dots, y_n(t)]^T \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ ; 隐含层和承接层输出分别为  $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), \dots, x_p(t)]^T \in \mathbf{R}^{p \times 1}$  和  $\bar{\mathbf{X}}(t) = [\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_p]^T = (1+\alpha)[x_1(t-1), \dots, x_p(t-1)]^T \in \mathbf{R}^{p \times 1}$ 。该结构是在 3 层前向网络的基础上将隐含层节点反馈到承接层, 得到一种局部反馈神经网络, 同时在承接层的反

馈节点上增加了反馈系数为  $\alpha$  的自反馈环节，因而 Elman 神经网络中的承接层具有记忆功能，其作用是记忆隐含层单元以前时刻的输出值，即承接层神经元的映射作用相当于延时算子。

对图 2.3 所示的 Elman 神经网络，假设其输入单元个数为  $m$ ，输出单元个数为  $n$ ，隐含层和承接层神经元个数相等，均为  $p$ 。则有输入层对隐含层的耦合权值矩阵  $\mathbf{W}^I = [w_{ji}^I] \in \mathbf{R}^{p \times m}$ ， $w_{ji}^I$  为第  $i$  个输入神经元对第  $j$  个隐含神经元的耦合权重；隐含层对输出层的耦合权值矩阵  $\mathbf{W}^O = [w_{kj}^O] \in \mathbf{R}^{n \times p}$ ， $w_{kj}^O$  为第  $j$  个隐含神经元对第  $k$  个输出神经元的耦合权重；承接层对隐含层的耦合权值矩阵  $\mathbf{W}^L = [w_{jl}^L] \in \mathbf{R}^{p \times p}$ ， $w_{jl}^L$  为第  $l$  个承接神经元对第  $j$  个隐含神经元的耦合权重。上述各层神经元的映射关系如式（2.11）描述。

$$\begin{cases} Y(t) = g[\mathbf{W}^O \cdot X(t)] \\ X(t) = f[\mathbf{W}^L \cdot \bar{X}(t) + \mathbf{W}^I \cdot U(t)] \\ \bar{X}(t) = (\mathbf{I} + \mathbf{A}) \cdot X(t-1) \end{cases} \quad (2.11)$$

式中： $\mathbf{I} \in \mathbf{R}^{p \times p}$  为单位矩阵； $\mathbf{A} = \text{diag}[\alpha] \in \mathbf{R}^{p \times p}$ ； $g_k(\cdot)(k=1, \dots, n)$  取线性函数， $g_k(x) = x$ ； $f_j(\cdot)(j=1, \dots, p)$  取 tansig 函数， $f_j(x) = [1 - \exp(-2x)] / [1 + \exp(-2x)]$ ； $0 \leq \alpha < 1$  为自反馈增益因子，当  $\alpha$  为 0 时，此网络为标准 Elman 网络， $\alpha$  不为 0 时，网络即为改进 Elman 网络。

需要指出的是，除 2.4.2 节真正的机理模型外，上述非机理模型由于不具备明确的物理意义，且都有其相对有效的范围，很难找到一个绝对有效的非机理模型，因而在电力系统中应用还较为困难，现阶段仅停留在理论研究的层面。然而，譬如感应电动机类的综合机理负荷模型结构由于其具有明确的物理意义，易于被人接受，被大量应用于现阶段的电力系统仿真与分析中，仍具有较高的理论与工程应用研究价值。基于此，本文后继章节将围绕机理类负荷模型结构，研究并提出考虑分布式发电影响的更为合理有效的机理模型类，为负荷模型的实用化进程和分布式发电对电力系统的影响分析提供理论与方法的支持。

## 2.5 参数辨识的优化方法

模型类型与结构确定后的模型参数辨识相对来说比较容易，本质上是一个单纯的数值优化问题。针对不同的模型类型，具有不同的参数辨识优化方法。对静态负荷模型，可采用求解非线性最小二乘问题的阻尼最小二乘法、牛顿法，也可采用各种非线性优化方法，如变尺度法、最速下降法、直接法、共轭梯度法等。而对于动态负荷模型，与静态负荷模型参数辨识不同，其参数辨识包括准则和优化算法两部分。其一，常用准则有最小方差、最大似然法、最小二乘法等；其二，有了准则之后的参数辨识问题就变成求准则函数达到极值的最优化计算问题；其

三，动态负荷模型参数辨识在参数优化过程中还需要考虑动态约束<sup>[32]</sup>。

常用于总体测辨负荷建模的参数辨识优化方法可大概分为两类：传统优化方法，包括直接优化方法（如模式搜索法、非线性单纯形法等）和解析类方法（如牛顿类方法）；现代优化方法，包括进化类算法（如遗传算法、蚁群算法、粒群算法等）。近年来，在负荷建模研究中，进化类算法受到了较为广泛的重视<sup>[33]</sup>，主要是因为传统优化方法本质上属于局部寻优方法，其辨识结果与初值选取具有很大关系。一方面，初值的选取无一般规律可循，更多地依赖于经验；另一方面，不同的初值选择将增加模型参数的分散性，这是影响总体测辨法负荷建模实用化的主要因素之一。然而，进化类算法从机理上说属于随机的全局寻优算法，它基本上没有初值要求，从而有望获得比传统优化算法更好的辨识结果。其中，遗传算法（Genetic Algorithm, GA）作为一种有效的全局直接搜索方法，具有求解过程与梯度信息无关的优点和将复杂的非线性问题经过有效搜索和动态演化而达到优化状态的特性<sup>[30,31]</sup>，使得其在应用于复杂问题的优化上具有很大的优势，因此本文选择综合改进型遗传算法<sup>[34]</sup>进行模型参数的优化，参数优化流程如图 2.4 所示。

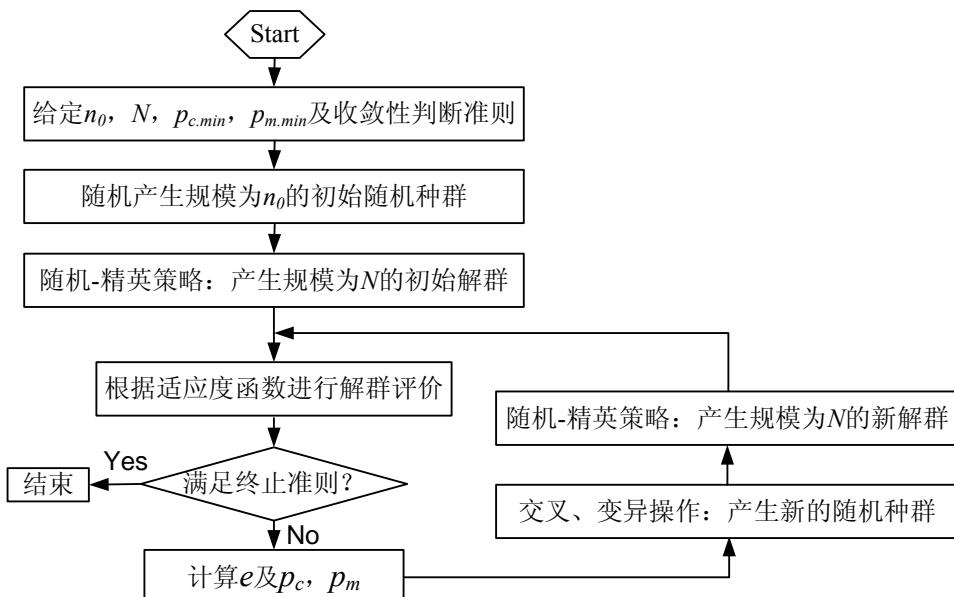


图 2.4 综合改进型遗传算法流程图

针对图 2.4 所示的综合改进型遗传算法在电力系统总体测辨负荷建模应用中的要点简要说明如下：

### (1) 初始种群的构建

种群是 GA 进化过程的基础，是 GA 能够搜索全局最优解的基本条件。设生成初始种群的区域是决策变量（本文取为待辨识负荷模型参数）的整个可行域，在其中随机生成规模为  $n_0$  的初始种群，产生规则如式 2.12 所示。

$$x_j^{(i)} = \text{Rand}() (b_j - a_j) + a_j \quad (\forall i = 1, 2, \dots, n_0; \forall j = 1, 2, \dots, d) \quad (2.12)$$

式中：函数  $\text{Rand}()$  产生均匀分布于区间(0,1)的随机数； $a_j$  和  $b_j$  分别为参数  $j$  的上、

下限，其值的选取不仅对算法的改善至关重要，而且与参数的物理意义也密不可分，需要针对不同的辨识环境适当选取。

### (2) 初始解群的构建与分析

初始种群确定后，从中挑选出规模为  $N$  的较好个体构成 GA 的初始解群，要求其各个体间存在一定的差异即具有种群的多样性，且遍及整个空间。基本 GA 通常采用轮盘赌选择法来进行初始解群的选择，其存在超强个体和封闭竞争的问题，这使得求解过程缓慢，易收敛于局部解，即产生早熟收敛。为克服这些问题，可以用解群多样性作为反映早熟程度的重要指标，用适应度分布的离散程度来表征解群内个体分布的多样性。设  $t$  代解群由个体  $x_{t,1}, x_{t,2}, \dots, x_{t,N}$  构成，适应度分别为  $f_{t,1}, f_{t,2}, \dots, f_{t,N}$ ，个体总平均适应度为  $f_{t,av}$ ，最优个体的适应度为  $f_{max}$ 。将适应度大于  $f_{t,av}$  的个体适应度再做平均得  $f_{av}$ ，定义  $f_{max}$  与  $f_{av}$  的差值  $e = f_{max} - f_{av}$ ，则指标  $e$  可用来表征解群的早熟程度： $e$  越小，表示种群中的各个体越相似，解群的多样性越差，说明此时解群发生早熟的可能性越大；相反， $e$  越大，表示解群中的个体特性越分散，解群的多样性越好，说明此时解群有较强的探测能力。

基于此，可在初始种群中随机选择  $l$  ( $l < N$ ) 个个体，将这些个体中适应度最高者保存到下一代群体中，直到保存到子代的个体数达到预设值，即解群规模  $N$ 。同时，为防止交叉和变异的破坏作用而导致当前群体的最佳个体在下一代中丢失，采用对适应度最高的个体不进行交叉和变异，而直接复制到下一代。这种选择方法既保证了子代中在解空间有较好的分散性，同时也具有较大的适应度，称之为初始解群选择的随机-精英策略。基于现场实测数据的负荷建模比较研究表明， $l$  取 2 较为合适。

### (3) 适应度函数的构建

对每个解的适应度  $f_i$  计算采用误差函数的倒数作为适应度函数，其中误差函数如式 2.13 所示。

$$E_w = \sum_{k=1}^L \sqrt{(P_{sk} - P_{mk})^2 + (Q_{sk} - Q_{mk})^2} / L \quad (2.13)$$

式中： $L$  为数据长度； $P_{sk}$  和  $Q_{sk}$  分别为负荷有功和无功功率的实测响应； $P_{mk}$  和  $Q_{mk}$  分别为模型响应。

### (4) 交叉、变异操作

综合改进型 GA 通过交叉、变异操作能产生新的随机种群，进行进一步的优化计算。在进行交叉操作时采用双点交叉方式且交叉后仅保留新染色体中适应度较大者的策略，这样能有效避免子代中出现近亲繁殖，提高了辨识精度和收敛速度。而变异操作的关键是根据自适应变异概率随机选取一部分染色体对其进行某个位置的基因变异以得到新的染色体，计算方法如式 2.14 所示。

$$x_j^{(i)'} = x_j^{(i)'} + p_{ow}(-1, h) * h' * d * x_j^{(i)'} \quad (2.14)$$

式中： $x_j^{(i)'}$  和  $x_j^{(i)}$  分别为变异前、后的染色体； $i$  表示在第  $i$  个染色体上发生变异； $j$  表示在第  $j$  个基因上发生变异； $p_{ow}(-1, h) = (-1)^h$ ； $h$  为区间(0,10)上的随机数； $h'$  为区间(0,1)上的随机数； $d$  为表示变异程度的一个变量。

#### (5) 终止准则的选取

终止准则应综合考虑最大进化代数和最大适应度，满足条件则终止运算，否则进行交叉和变异操作以产生新的随机种群。

#### (6) 关键控制参数的选择

在 GA 的运行过程中，存在着对其性能产生重大影响的参数，这些参数在初始阶段或群体进行过程中需要进行合理的选择与控制，使 GA 以最佳的搜索轨迹达到最优解。

1) 位串长度：位串长度的选择取决于待辨识对象的规模、解的精度以及编码方式。综合改进的 GA 采用实数编码，将待辨识参数表示成  $d$  维向量  $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_d]^T$ ，则位串长度为  $d$  个十进制实数；位串中的每一个十进制实数即对应一个待辨识参数  $x_j$ 。

2) 解群规模：群体规模与位串长度有关，随着位串长度的增加，群体规模需要逐渐扩大。当群体规模增大时，搜索到最优解的代数逐步减少，但是计算量随着群体规模的增大而增加。综合理论分析和大量仿真实验研究可知，对于类似本文提出的综合负荷模型十分复杂的情况，解群规模与位串长度之比保持在 1 以上为佳，取解群规模  $N=50$ 。

3) 自适应交叉和变异概率：交叉概率和变异概率对 GA 的性能具有重要影响。交叉概率控制着对父个体实施交叉操作的几率，其值越大则群体中产生新模式的机会越多，原有模式被破坏的可能性也随之增加；其值越小则可能导致搜索阻碍。变异可以保持较高的多样性，但变异概率太大则会使 GA 成为随机搜索，太小则可能使某些基因位过早丢失的信息无法恢复。综合改进型 GA 采用在进化过程中根据解群的早熟程度自动地调整交叉概率和变异概率的方法，从而增强 GA 的可控性。交叉概率和变异概率的自适应调整策略如式 2.15 和 2.16 所示。

$$p_c = \begin{cases} \frac{k_1 - k_2}{k_3 + \exp(-k_7 e)} & p_c > p_{c.\min} \\ p_{c.\min} & p_c \leq p_{c.\min} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{k_4 - k_5}{k_6 + \exp(-k_8 e)} & p_m > p_{m.\min} \\ p_{m.\min} & p_m \leq p_{m.\min} \end{cases} \quad (2.16)$$

式中： $p_c$  和  $p_m$  分别为交叉概率和变异概率； $p_{c,min}$  和  $p_{m,min}$  分别为  $p_c$  和  $p_m$  设定的最小值； $k_1 \sim k_8$  为可调参数。

上述 10 个待设定参数的选取对算法性能的改善具有一定影响，通过大量的实测建模工作并综合考虑整个进化过程中交叉和变异概率的动态调整，针对负荷建模的研究对象，选取了一组具有自适应特性的较理想的控制参数组合： $p_{c,min}=0.45$ ， $p_{m,min}=0.06$ ， $k_1=1.3$ ， $k_2=1.0$ ， $k_3=1.0$ ， $k_4=1.0$ ， $k_5=9$ ， $k_6=9$ ， $k_7=0.0001$ ， $k_8=0.0005$ 。

上述综合改进的 GA，文献[34]对其应用于综合负荷建模的性能进行了全面细致的检验，研究表明，综合改进的遗传算法通过初始种群选择、最优个体保留、自适应交叉和变异率等方面进行综合设计，有效地避免了早熟和近亲繁殖，提高了收敛速度，缩短辨识时间，同时提高了拟合精度，克服了参数的分散性，是一种适合于负荷建模参数辨识的优化算法。

值得强调的是，由于 GA 涉及很多随机因素，不同的参数选择（譬如待辨识参数的上下限）对辨识结果的影响较大，对同一样本进行参数优化的过程中，需要适当调整相关参数进行大量的计算，以期获得较为理想的辨识结果。由于本文研究的重点在于模型结构的构建及其有效性检验，且相关辨识样本繁多，因此后文列出的参数辨识结果均为进行统计数据分析的基础上，综合考虑拟合误差和参数分散性等因素，给出的最佳辨识结果。

## 2.6 实现过程

根据上述基本原理和要解决的关键问题，以机理类感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型为例，其总体测辨负荷建模的实现过程如图 2.5 所示。

针对图 2.5 所示的总体测辨负荷建模实现过程中的要点简要说明如下：

### (1) 非独立待辨识参数的确定方法

非独立待辨识参数的确定方法应在满足初始稳态条件及模型参数本身约束的情况下，由式 (2.17) 解出。

$$\begin{cases} \mathbf{f}(\mathbf{u}_0, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) = 0 \\ \mathbf{g}(\mathbf{u}_0, \mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) = 0 \\ \mathbf{h}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) = 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

式中： $\mathbf{f}$  方程为状态方程的初始稳态约束； $\mathbf{g}$  方程为输出方程的初始稳态约束； $\mathbf{h}$  方程为模型参数本身约束。

### (2) 模型动态过程仿真步骤

模型状态变量初值和模型参数确定后，即可代入模型状态方程和输出方程进行模型动态过程仿真，其仿真步骤如图 2.6 所示。

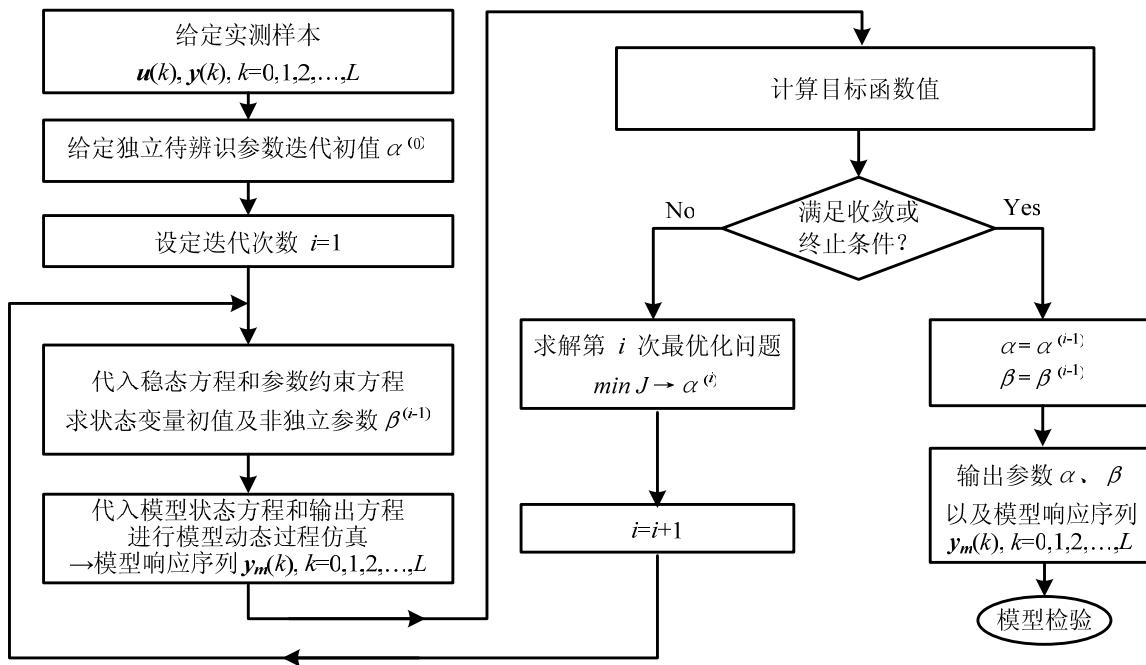


图 2.5 总体测辨负荷建模实现过程

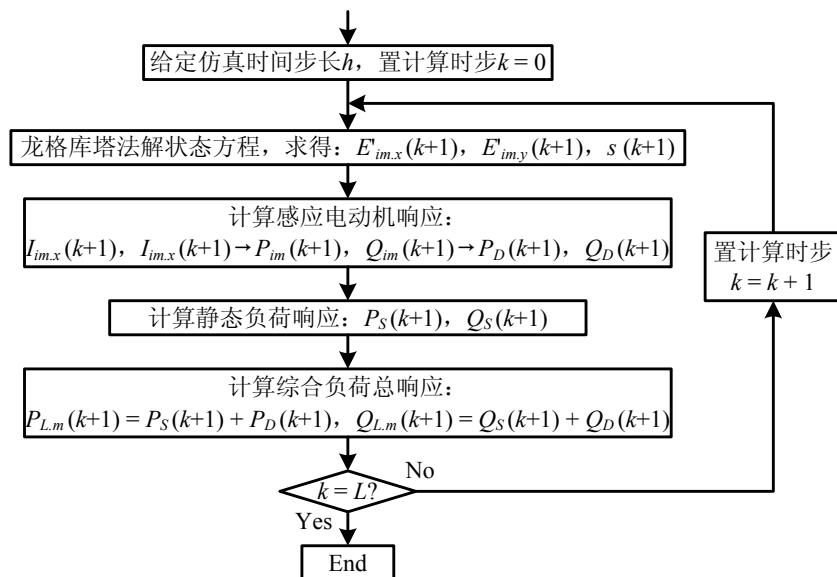


图 2.6 模型动态过程仿真步骤

### (3) 目标函数及终止准则

根据不同的计算要求和参数辨识优化方法的不同，目标函数和终止准则也不尽相同。基于本文采用的综合改进型遗传算法，其目标函数取式（2.13）误差函数倒数的适应度函数作为目标函数，相应的终止准则综合考虑最大适应度和最大进化代数。

### (4) 最优化问题求解

针对不满足终止条件的迭代值，需要对其进行第  $i$  次最优化求解，得到第  $i+1$  个迭代值，基于本文采用的综合改进型遗传算法，需要在计算早熟指标  $e$ 、交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$  的基础上，进行交叉-变异操作和随机-精英选择，以期得到更

接近最优解的迭代值。

## 2.7 本章小结

本章首先就总体测辨负荷建模方法的基本原理与待解决的关键理论问题进行了基本的阐述，然后重点对其涉及的两个关键研究问题——模型结构和参数优化方法进行了具体细致的解析描述。在此基础上，提出了本文研究的重点——将围绕机理类负荷模型结构，研究并提出考虑分布式发电影响的更为合理有效的配电网机理综合负荷模型类，为负荷模型的是实用化进程和分布式发电对电力系统的影响分析提供理论与方法的支持。最后，针对机理类感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型，总结了其总体测辨负荷建模的实现过程。

# 第3章 配电网集结等效的综合感应电动机模型及其总体测辨建模

## 3.1 引言

分布式发电设备大多接入 10kV 及以下的配电网侧(大型风电场等集中式接入主网除外),物理位置分布广泛、运行特性各异、容量比例逐步增大,从而对与之联系的现代电力系统的电源与电网规划、运行调度与控制都将产生不可忽视的影响。在作为电网规划设计与运行调度控制之基本决策依据的电力系统仿真计算中,负荷模型是对主网变电站母线(通常是 220kV 变电站的 110kV 母线)“综合负荷”特性的等值描述。这种综合负荷成份除包括一般意义上的动态负荷和静态负荷之外,自然也包括了配电网网络和分布式电源。在实际电网运行中,无论是动态负荷还是静态负荷都不可能直接由 110kV 或 220kV 母线供电,均需通过线路及变压器等配电元件供电,因此配电网势必会对综合负荷特性造成一定的影响,同时,大量分布式发电设备接入配电网后,必然会使这些影响进一步扩大。因此在开展“考虑分布式发电的配电网综合负荷建模”研究时,有必要充分考虑配电网的影响,提出含配电网(包括 110kV 及以下配电线路和变压器)的配电网综合负荷模型结构及其参数辨识方法,为考虑分布式发电的配电网综合负荷建模研究打下坚实的基础。

目前,国内外电力系统计算分析软件中,一般都是将综合负荷直接接在 110kV 或 220kV 母线上,模型结构多采用一定比例的感应电动机并联静态负荷(恒阻抗、恒电流、恒功率或其组成的 ZIP 模型)组成,且基本采用推荐的典型模型参数,称之为传统感应电动机模型。该模型间接将配电网的电抗并入感应电动机的定子电抗进行近似模拟,尽管简化了模型结构,但同时也带来了一些不足之处。基于此,近年来有学者提出了考虑配电网的综合负荷模型结构,并进行了相关研究<sup>[16~18]</sup>。文献[16]根据变电站负荷的实际构成,提出了统一模拟配电网、无功补偿和感应电动机的综合负荷模型结构,但并没有就配电网参数如何获取进行阐述;文献[17]研究了该模型的参数可辨识性问题,指出已知配电电抗或电阻、或者已知两者之比时,参数是可辨识的,但同样未对模型参数采用何种辨识策略进行研究;文献[18]针对该模型,提出采用统计综合法与总体测辨办法相结合的方法来确定该模型的参数,提出只辨识重要参数的辨识策略,但仍没有就模型解析描述和参数辨识方法进行阐述。上述文献对考虑配电网的综合负荷模型研究具有一定

的参考价值，但均未对模型的数学解析描述和模型参数辨识方法进行详细阐述，且缺乏现场实测数据的验证。

基于此，本章从总体测辨的角度出发，针对传统感应电动机综合负荷模型存在的结构缺陷，研究了考虑 220kV 变电站配电网及无功补偿影响的感应电动机综合负荷模型结构及其参数整体辨识方法。其基本思路是把配电网（包括 110kV 及以下配电线路和变压器）作为综合负荷模型的有机组成部分，用集总线路-变压器组集结等效，并计及了变压器有载调整分接头的影响，同时在静态负荷中考虑负荷暂态无功功率的补偿调整作用。在配电网集结等效的基础上，建立了“考虑配电网参数及无功补偿的综合感应电动机负荷模型”，本章简称为“综合感应电动机模型”。文中给出了详细的物理分析及数学推导过程，同时提出了模型的“递推辨识策略”。模型实现了 220kV 变电站综合负荷物理环境—模型辨识环境—仿真计算环境的统一性和一致性，更加符合电网的综合负荷实际结构。大量基于现场实测负荷特性数据的建模实践表明，本章建立的“考虑配电网集结等效的综合感应电动机模型”能有效地描述综合负荷特性，在参数稳定性、泛化能力等性能上，较传统的感应电动机模型有了一定的改进，更加符合电网仿真所要求的应用环境。

## 3.2 感应电动机模型的结构剖析

### 3.2.1 传统感应电动机模型的结构特点及其缺陷

目前电力系统仿真中广泛使用的感应电动机模型其物理结构如图 3.1 所示。

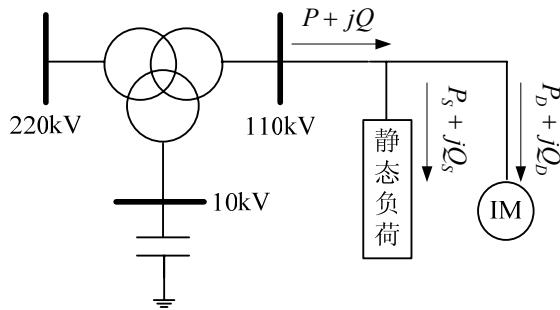


图 3.1 传统感应电动机综合负荷模型

图 3.1 所示的传统感应电动机综合负荷模型是用感应电动机并联静态负荷模型直接连接在 220kV 变电站的 110kV 母线，以模拟变电站的综合负荷特性，这是目前感应电动机模型的使用环境，也是总体测辨建模时的模型辨识环境。该模型之所以被广泛采用，在于它有 2 个显著的优点：其一，具有清晰明确的物理意义，符合人们对综合负荷特性的宏观理解，从概念上易于接受；其二，其结构简单，可以说是一种除低阶差分方程模型外的最简单的动态模型结构。但依图 3.1 之环境使用的感应电动机模型也有不可忽视的缺陷：即其仿真使用也就是模型辨识环境与电网实际物理环境不符。实际配电网的物理结构可由图 3.2 示意，将所有配电网

元件等效到图 3.1 所示的感应电动机并联静态负荷模型当中，尽管简化了模型结构，其模型参数也可由辨识确定，但是却容易造成模型参数的分散性。这是因为即使假定在不同负荷水平下的负荷构成基本不变，但配电网投入的线路及变压器等元件可能不同甚至差异较大，从而使模型参数的分散性不可避免。而模型参数的分散性则是妨碍模型实用化的瓶颈之一。事实上，无论是感应电动机负荷还是静态负荷都不可能直接由 110kV 或 220kV 母线供电，因此，为了克服图 3.1 所示的传统感应电动机模型存在结构上的固有缺陷，有必要在模型中计及配电网参数的影响。

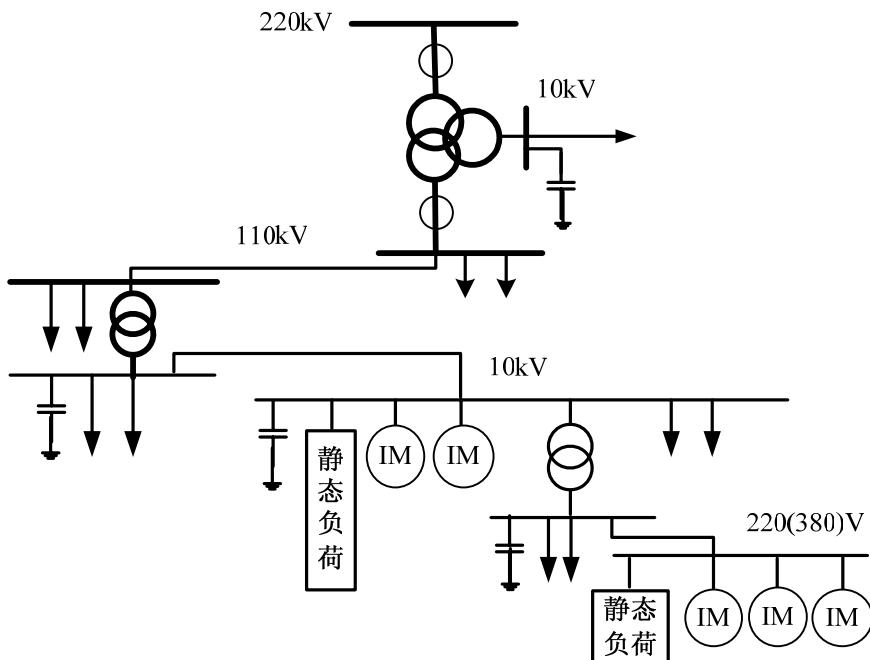


图 3.2 220kV 变电站的供配电系统

### 3.2.2 配电网集结等效的综合感应电动机模型结构

对于图 3.2 所示的供配电系统，仿真环境所使用的负荷模型是 220kV 变电站综合负荷的等效模拟，不仅涵盖所有用电设备，而且也包括了 110kV 及以下电压等级的供/配电网络。传统感应电动机模型即是将供/配电网络综合等效于感应电动机之中。为了改善感应电动机模型结构，将供/配电系统用一个“110kV 线路—变压器组”集结等效，且在末端变电站低压母线增加补偿电容以集中调整综合负荷的暂态无功。集结等效后的综合负荷系统结构如图 3.3 所示。

为简化问题的表达，本章中除时间外的所有运行参数和模型参数（即元件特性参数）均采用标么值（时间参数采用有名值）。依工程仿真惯例，假设负荷模型中感应电动机模型参数和配网集结等效模型参数之标么值具有不同基准，前者为感应电动机自身基准，后者为系统基准。为此，定义系统功率与电压基准分别为  $S_{BS}$ 、 $V_{BS}$ ；感应电动机的功率和电压基准分别为  $S_{BM}$ 、 $V_{BM}$ 。

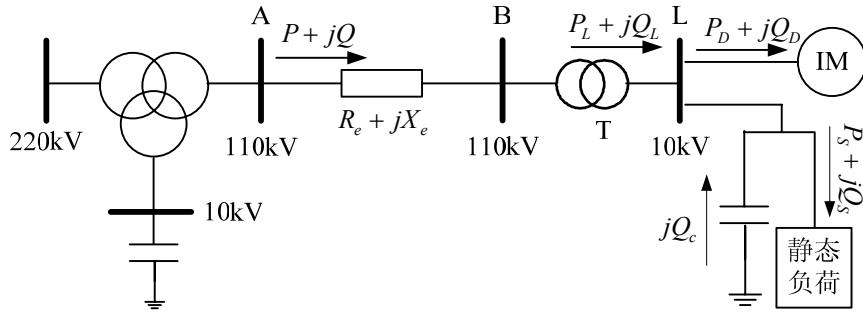


图 3.3 综合负荷系统集结等效结构示意图

基于上述定义，可得图 3.3 对应的等值电路如图 3.4。图 3.4 中，末端变压器用理想变压器和阻抗  $Z_T$  串联等值，且将后者包含于线路阻抗之中；配电网集结等值参数、静态负荷模型参数及无功补偿之参数均为系统基准，感应电动机参数为其自身基准。由于上二者参数基准不同且考虑末端变压器运行于任意分接头的可能，应当引入“基准变换”环节以实现二者的接口。

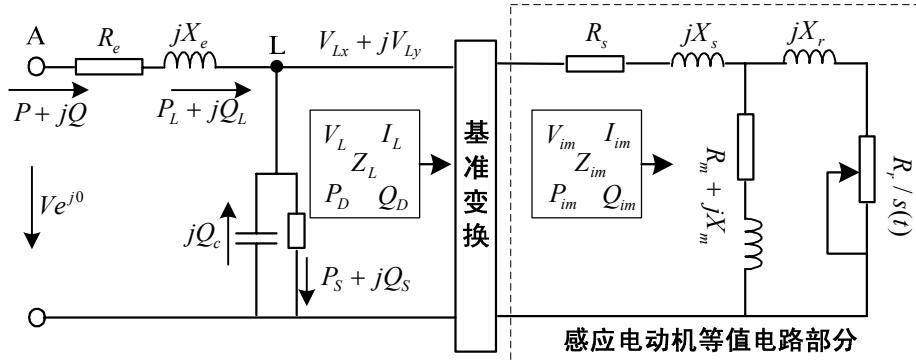


图 3.4 配电网集结等效的综合感应电动机模型的等值电路

图 3.3、3.4 即是本章所建立的“配电网集结等效的综合感应电动机模型”的完整物理结构。应当强调指出的是，图 3.4 中之  $V_{im}$ 、 $I_{im}$ 、 $Z_{im}$ 、 $P_{im}$ 、 $Q_{im}$  分别为感应电动机的电压、电流、阻抗、功率在其自身基准下的标么值； $V_L$ 、 $I_L$ 、 $Z_L$ 、 $P_D$ 、 $Q_D$  则为上述各量在系统基准下的标么值；其它物理量的意义已在图中明确表述。模型的数学描述在下节阐述。

### 3.3 综合感应电动机模型的数学描述

#### 3.3.1 电压比与基准变换关系

图 3.4 中，设感应电动机在其自身基准下的端电压、暂态内电势、从电网吸收的电流及功率、等值阻抗等物理量的标么值分别为： $V_{im}$ 、 $E'_{im}$ 、 $I_{im}$ 、 $P_{im}$ 、 $Q_{im}$ 、 $Z_{im}$ ；上述各量在系统基准下的标么值分别为： $V_L$ 、 $E'_L$ 、 $I_L$ 、 $P_D$ 、 $Q_D$ 、 $Z_L$ 。同时定义：

$$\begin{cases} k_{T*} = k_T / k_B \\ k_T = V_T^{(1)} / V_{TN}^{(2)} \\ k_B = V_{BS} / V_{BM} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$K = S_{BS} / S_{BM} \quad (3.2)$$

$$V_{BL} = V_{BS} / k_T \quad (3.3)$$

式 (3.1) ~ (3.3) 中,  $V_T^{(1)}$ 、 $V_{TN}^{(2)}$  分别为变压器高压侧实际运行分接头电压和低压侧额定电压,  $V_{BL}$  为与  $V_{BS}$  对应的变压器低压侧系统基准电压, 其它有关各量之物理意义已如 3.2.2 节所述。

设感应电动机电压基准为  $V_{BM} = V_{TN}^{(2)}$ , 则由电压等级归算及标么值换算原理, 即可推导出图 3.4 中的“基准变换”环节的变换矩阵, 如式 (3.4) 所示。式 (3.4) 中,  $K$  为系统与感应电动机之基准功率比;  $k_{T*}$  为非标准(标么)变压比。由式 (3.1) 可知, 当取  $V_{BM} = V_{TN}^{(2)}$  时,  $k_{T*} = V_T^{(1)} / V_{BS}$ 。若变压器运行于主抽头, 即  $V_{BS} = V_{TN}^{(1)}$ ; 或取各基准电压为网络平均额定电压且变压器变比为平均额定电压比, 则  $k_{T*} = 1$ 。

$$\begin{bmatrix} V_L \\ E'_L \\ I_L \\ P_D \\ Q_D \\ Z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{T*} & & & & & \mathbf{0} \\ & k_{T*} & & & & \\ & & \frac{1}{Kk_{T*}} & & & \\ & & & \frac{1}{K} & & \\ & & & & \frac{1}{K} & \\ \mathbf{0} & & & & & Kk_{T*}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{im} \\ E'_{im} \\ I_{im} \\ P_{im} \\ Q_{im} \\ Z_{im} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

应当注意, 根据电压等级归算及标么值换算原理并考虑式 (3.3) 之关系, 变压器低压侧运行电压在  $V_{BL}$  及  $V_{BS}$  基准下的标么值相等, 因此图 3.3 中的静态负荷功率及无功补偿元件的功率变换到图 3.4 等值电路后无需进行标么值变换。

### 3.3.2 线路-变压器组首末端功率与电压平衡关系

基于电网潮流计算原理, 由图 3.4 所示“配电网集结等效的综合感应电动机模型”等值电路, 可推导出配电网集结等效后的线路-变压器组首、末端功率及电压平衡关系如式 (3.5) ~ (3.7), 式 (3.7) 以综合模型之首端电压为参考相量; 变压器低压侧母线 L 的功率平衡关系如式 (3.8)。式中各物理量意义已示如图 3.4 中。

$$\begin{cases} P_L = P - (P^2 + Q^2)R_e/V^2 \\ Q_L = Q - (P^2 + Q^2)X_e/V^2 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} P = P_L + (P_L^2 + Q_L^2)R_e/V_L^2 \\ Q = Q_L + (P_L^2 + Q_L^2)X_e/V_L^2 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} V_{Lx} = V - (PR_e + QX_e)/V \\ V_{Ly} = (QR_e - PX_e)/V \end{cases} \quad (3.7)$$

$$P_L + jQ_L = (P_S + jQ_S) + (P_D + jQ_D) - jQ_C \quad (3.8)$$

### 3.3.3 无功补偿的描述

大量建模实践表明，感应电动机对综合负荷有功功率具有很强的解释能力，但大扰动后暂态过程的无功功率描述能力较差。为此可在静态负荷上并联一附加动态无功补偿元件，其目的是弥补暂态过程中感应电动机对无功功率解释能力不足的缺陷。本章构造的动态无功补偿元件的解析模型如式（3.9）所示。

$$Q_C(t) = k_q \times [V_L(t) - V_L(0)]^2 \quad (3.9)$$

式中  $k_q$  为无功补偿系数，为待辨识模型参数。

式（3.9）表明，附加的无功补偿元件对扰动前稳态无功没有贡献，只对暂态过程中的无功功率起附加的动态调整作用。事实上，模型辨识时所必须满足的稳态条件已经将稳态无功负荷综合描述于感应电动机和静态负荷之中。

### 3.3.4 静态负荷的功率描述

假设静态负荷的初始功率已知，则其功率描述与其给定模型结构有关，本节针对常用的 3 种静态负荷模型，模型结构分别阐述如下。

#### 3.3.4.1 恒阻抗静态负荷模型

最简单的负荷模型是恒定阻抗模型，设恒阻抗对应恒导纳  $Y_{S0}$ ，则其静态负荷功率可由式（3.10）确定。 $Y_{S0}$  的确定方法将在 3.6.1.2 节介绍。

$$\begin{cases} P_S(t) = \text{Re}(V_L^2(t) \times \hat{Y}_{S0}) = V_L^2(t) \times G_{S0} \\ Q_S(t) = \text{Im}(V_L^2(t) \times \hat{Y}_{S0}) = V_L^2(t) \times B_{S0} \end{cases} \quad (3.10)$$

#### 3.3.4.2 静态负荷用 ZIP 或幂函数模型描述

当静态负荷用多项式(ZIP)或幂函数模型描述时，其暂态功率分别如式(3.11)、式(3.12) 所示。

$$\begin{cases} P_S(t) = P_S(0)[A_P(k_{V_0}V_L(t))^2 + B_P(k_{V_0}V_L(t)) + C_P] \\ Q_S(t) = Q_S(0)[A_Q(k_{V_0}V_L(t))^2 + B_Q(k_{V_0}V_L(t)) + C_Q] \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} P_S(t) = P_S(0)(k_{V_0}V_L(t))^{P_v} \\ Q_S(t) = Q_S(0)(k_{V_0}V_L(t))^{Q_v} \end{cases} \quad (3.12)$$

式（3.11）、（3.12）中，模型参数满足  $A_P+B_P+C_P=1$ 、 $A_Q+B_Q+C_Q=1$ ； $k_{V_0}$  为已知的电压变换系数，定义为： $k_{V_0}=V_{BS}/\bar{V}_L(0)$ ，其中之  $\bar{V}_L(0)$  为标幺电压  $V_L(0)$  对应的电压有名值。

### 3.3.5 感应电动机的数学描述

感应电动机的数学描述分别从动态特性、功率输出方程和机械负载特性三个方面进行描述。

#### 3.3.5.1 感应电动机的动态特性描述

感应电动机动态特性采用同步坐标系统下的三阶机电暂态的动态微分方程描述。

$$\frac{de'_{im.x}}{dt} = s(1 + \omega_B)e'_{im.y} - \frac{1}{T'} \left\{ e'_{im.x} + \frac{X_s - X'}{R_s^2 + (\omega X')^2} \left[ R_s(V_{im.y} - \omega e'_{im.y}) - \omega X'(V_{im.x} - \omega e'_{im.x}) \right] \right\} \quad (3.13)$$

$$\frac{de'_{im.y}}{dt} = -s(1 + \omega_B)e'_{im.x} - \frac{1}{T'} \left\{ e'_{im.y} - \frac{X_s - X'}{R_s^2 + (\omega X')^2} \left[ R_s(V_{im.x} - \omega e'_{im.x}) + \omega X'(V_{im.y} - \omega e'_{im.y}) \right] \right\} \quad (3.14)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{T_m}{T_j} - \frac{(R_s e'_{im.y} + \omega X' e'_{im.x})(V_{im.y} - \omega e'_{im.y}) + (R_s e'_{im.x} - \omega X' e'_{im.y})(V_{im.x} - \omega e'_{im.x})}{T_j(1-s)[R_s^2 + (\omega X')^2]} \quad (3.15)$$

其中：

$$T' = \frac{X_r + X_m}{R_r}$$

$$X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$$

式中： $R_s$  为定子绕组电阻；  $X_s$  为定子绕组漏抗；  $R_r$  为转子电阻；  $X_r$  为转子漏抗；  $R_m$  为励磁电阻；  $X_m$  为励磁电抗；  $T_j$  为惯性时间常数；  $E'_{im} = e'_{im.x} + j e'_{im.y}$  和  $V_{im} = V_{im.x} + j V_{im.y}$  分别为感应电动机的暂态电势和端电压及其相应的 x 轴和 y 轴的坐标分量；  $\omega$  和  $\omega_B$  分别为系统的实际角频率和同步角频率；  $s$  为感应电动机的转差率；  $P_m$  为感应电动机的机械负载功率；  $X'$  为感应电动机暂态电抗；  $T'$  为感应电动机暂态电势衰减时间常数。

#### 3.3.5.2 感应电动机的输出方程

用电压源描述的感应电动机暂态等值电路如图 3.5 所示，其中所有物理量均为对应自身基准的标幺值。由此暂态等值电路即可求得感应电动机的电流及功率，如式 (3.16)、(3.17) 所示。其中，感应电动机暂态电动势  $E'_{im}$  由其动态微分方程解出；端电压  $V_{im}$  则在已知  $V_L$  后由式 (3.4) 确定。

$$\begin{cases} I_{im.x} = \frac{R_s(V_{im.x} - \omega e'_{im.x}) + \omega X'(V_{im.y} - \omega e'_{im.y})}{R_s^2 + (\omega X')^2} \\ I_{im.y} = \frac{R_s(V_{im.y} - \omega e'_{im.y}) - \omega X'(V_{im.x} - \omega e'_{im.x})}{R_s^2 + (\omega X')^2} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} P_{im} = V_{im.x}I_{im.x} + V_{im.y}I_{im.y} \\ Q_{im} = V_{im.y}I_{im.x} - V_{im.x}I_{im.y} \end{cases} \quad (3.17)$$

由式 (3.17) 求得感应电动机功率后，即可通过式 (3.4) 之“基准变换”与系统基准的标幺制方程接口。

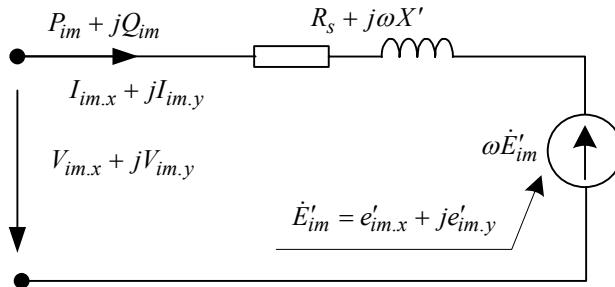


图 3.5 感应电动机暂态等值电路

### 3.3.5.3 感应电动机机械负载特性描述

机械负载特性对感应电动机特性具有重要影响，本章取为转速的二次函数如式 (3.18) 所示。

$$T_m(s) = T_0 [A(1-s)^2 + B(1-s) + C] \quad (3.18)$$

式中，特性参数满足  $A+B+C=1$ ； $T_0$  为感应电动机负载率。

## 3.4 模型的初始稳态条件

模型的初始稳态条件是其必须满足的边界条件，据此可以确定动态微分方程之状态变量初始值以及有关初始稳态功率。

### 3.4.1 感应电动机及静态负荷初始稳态有功功率

设稳态条件下系统末端综合负荷中，感应电动机动态负荷所占比例为  $K_m$ ，其定义如式 (3.19)。

$$K_m = \frac{P_D(0)}{P_L(0)} \quad (3.19)$$

由式 (3.19) 并计及式 (3.4) 之基准变换关系，可求得感应电动机初始稳态有功功率，进而根据节点功率平衡原理，即可求得静态负荷初始稳态有功功率，

见式 (3.20)。

$$\begin{cases} P_{im}(0) = K \cdot P_D(0) = K \cdot K_m \cdot P_L(0) \\ P_S(0) = P_L(0) - P_D(0) = (1 - K_m)P_L(0) \end{cases} \quad (3.20)$$

### 3.4.2 感应电动机初始转差率

由图 3.4 配电网集结等效的综合感应电动机模型的等效电路, 可知感应电动机稳态等值阻抗和导纳为:

$$\begin{cases} Z_{im}(0) = (R_s + jX_s) + \frac{(R_m + jX_m)(R_r/s(0) + jX_r)}{(R_m + jX_m) + (R_r/s(0) + jX_r)} \\ Y_{im}(0) = \frac{1}{Z_{im}(0)} = G_{im}(0) - jB_{im}(0) \end{cases} \quad (3.21)$$

由式 (3.21), 令转子初始稳态等值电阻  $R = R_r/s(0)$ , 经化简即得感应电动机的初始稳态导纳如式 (3.22)。该式以  $R$  为变量, 其他系数在已知感应电动机参数后均为常数, 如式 (3.23) ~ (3.25) 所示。

$$\begin{cases} G_{im}(0) = \frac{A_2 R^2 + B_2 R + C_2}{A_1 R^2 + B_1 R + C_1} \\ B_{im}(0) = \frac{X_{sm} R^2 + 2R_m X_s R + (R_m^2 X_{rs} + X_{rm} X_P)}{A_1 R^2 + B_1 R + C_1} \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} A_1 = (R_s + R_m)^2 + (X_s + X_m)^2 \\ B_1 = 2[R_s(R_m^2 + X_m^2) + R_m(R_s^2 + X_s^2) - R_m X_s X_m] \\ C_1 = R_s^2 R_m^2 + 2R_s R_m X_r^2 + R_m^2 X_{rs}^2 + R_s^2 X_{rm}^2 + X_P^2 \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\begin{cases} A_2 = R_s + R_m \\ B_2 = 2R_s R_m + (R_m^2 + X_m^2) \\ C_2 = R_m(R_s R_m + X_r^2) + R_s X_{rm}^2 \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\begin{cases} X_{rs} = X_r + X_s \\ X_{rm} = X_r + X_m \\ X_{sm} = X_s + X_m \\ X_P = X_r X_s + X_r X_m + X_s X_m \end{cases} \quad (3.25)$$

同时, 由式 (3.20) 及式 (3.4), 式 (3.22) 中  $G_{im}(0)$  可由式 (3.26) 确定。

$$G_{im}(0) = \frac{P_{im}(0)}{V_{im}^2(0)} = k_{T^*}^2 \frac{P_{im}(0)}{V_L^2(0)} = k_{T^*}^2 \frac{K \cdot K_m \cdot P_L(0)}{V_L^2(0)} \quad (3.26)$$

从而可得关于  $R$  的一元二次方程如式 (3.27), 其中的常数由式 (3.28) 确定。

$$A_3 R^2 + B_3 R + C_3 = 0 \quad (3.27)$$

$$\begin{cases} A_3 = A_1 G_{im}(0) - A_2 \\ B_3 = B_1 G_{im}(0) - B_2 \\ C_3 = C_1 G_{im}(0) - C_2 \end{cases} \quad (3.28)$$

求解式 (3.27) 即可得感应电动机初始转差率, 如式 (3.29)。

$$s(0) = \frac{2A_3 \cdot R_r}{-B_3 + \sqrt{B_3^2 - 4A_3C_3}} \quad (3.29)$$

应当指出, 为了保证初始转差率  $s(0)$  的物理意义合理性, 可以适当调整某些独立待辨识参数——如基准功率比  $K$  (式 (3.2)), 由此还可加速模型参数辨识过程的收敛。

### 3.4.3 感应电动机及静态负荷初始稳态无功功率

初始转差率确定后, 由感应电动机应满足的初始稳态条件并计及式 (3.4) 之基准变换关系, 系统基准下的感应电动机初始稳态无功即可解出, 如式 (3.30) 所示, 其中  $B_{im}(0)$  由式 (3.22) 给出。

$$Q_{im}(0) = V_{im}^2(0)B_{im}(0) = (V_L(0)/k_{T*})^2 B_{im}(0) \quad (3.30)$$

据此并计及式 (3.8), 即可依节点功率平衡原理唯一确定静态负荷的初始稳态无功功率如式 (3.31) 所示。

$$Q_S(0) = Q_L(0) - Q_D(0) = Q_L(0) - Q_{im}(0)/K \quad (3.31)$$

值得注意的是, 类似于对  $s(0)$  的数值考察, 必要时同样可以通过调整基准功率比  $K$  等参数, 使感应电动机初始无功, 从而初始功率因数  $\cos\varphi_{im}(0)$  在合理范围内。

### 3.4.4 感应电动机暂态电动势初始值的确定

由图 3.5 感应电动机暂态等值电路, 即可求得暂态电势初始值, 如式 (3.32) 所示。其中感应电动机初始电流依初始稳态条件确定, 如式 (3.33) 所示。

$$\begin{bmatrix} e'_{im.x}(0) \\ e'_{im.y}(0) \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_0} \left\{ \begin{bmatrix} V_{im.x}(0) \\ V_{im.y}(0) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & -\omega_0 X' \\ \omega_0 X' & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{im.x}(0) \\ I_{im.y}(0) \end{bmatrix} \right\} \quad (3.32)$$

$$\begin{cases} I_{im.x}(0) = (V_{im.x}(0)P_{im}(0) + V_{im.y}(0)Q_{im}(0))/V_{im}^2(0) \\ I_{im.y}(0) = (V_{im.y}(0)P_{im}(0) - V_{im.x}(0)Q_{im}(0))/V_{im}^2(0) \end{cases} \quad (3.33)$$

### 3.4.5 感应电动机机械负载率的确定

感应电动机的机械负载率  $T_0$  取决于其初始稳态功率平衡条件。由式 (3.18) 并考虑感应电动机功率转换原理, 即可推得  $T_0$  计算式如式 (3.34) 所示。

$$T_0 = \frac{[P_{im}(0) - I_{im}^2(0) \cdot R_s] / [1 - s(0)]}{A[1 - s(0)]^2 + B[1 - s(0)] + C} \quad (3.34)$$

其中：

$$I_{im}^2(0) = I_{im,x}^2(0) + I_{im,y}^2(0)$$

## 3.5 综合感应电动机模型的辨识

本章所建立的“配电网集结等效的综合感应电动机模型”的参数辨识原理和方法与传统感应电动机模型并无原则性区别，但由于模型中计及了配电网的集结等效描述，因而其辨识方法也有值得注意的特点。

### 3.5.1 模型的待辨识参数

模型的待辨识参数可分为独立辨识参数和非独立参数。独立辨识参数是必须由辨识确定的模型的最小参数集，用  $\alpha$  表示；非独立参数则是在独立辨识参数已知后，由模型所必须满足的稳态条件和参数本身的约束条件所决定的模型参数集，用  $\beta$  表示。

#### 3.5.1.1 独立辨识参数

根据“综合感应电动机模型”的完整等值电路图 3.4，独立辨识参数由下述 5 个参数矢量构成。

(1) 配电网集结等效参数  $\alpha_1$

$$\alpha_1 = [R_e \ X_e]^T$$

(2) 静态负荷特性参数矢量  $\alpha_2$

$$\alpha_2 = [A_P \ B_P \ A_Q \ B_Q \ k_q]^T \text{——ZIP 模型;} \quad$$

$$\text{或 } \alpha_2 = [P_v \ Q_v \ k_q]^T \text{——幂函数模型。}$$

(3) 基准变换参数矢量  $\alpha_3$

$$\alpha_3 = [K \ K_m \ k_{T^*}]^T$$

(4) 感应电动机电气特性参数矢量  $\alpha_4$

$$\alpha_4 = [R_s \ X_s \ R_r \ X_r \ R_m \ X_m]^T$$

(5) 感应电动机机械负载特性参数矢量  $\alpha_5$

$$\alpha_5 = [T_J \ A \ B]^T$$

应当注意，在上述独立辨识参数中，当静态负荷用恒阻抗描述时， $\alpha_2$  为空集；

在  $\alpha_3$  中，3 个参数分别对应于感应电动机基准（额定）容量  $S_{BM}$  ( $K$ )、感应电动机动态负荷比例 ( $K_m$ )、变压器分接头  $V_T^{(1)}$  ( $k_{T*}$ ) 的辨识。

### 3.5.1.2 非独立参数

在独立辨识参数一定后，非独立参数应当根据初始稳态条件及参数本身约束解出，而且它们将根据静态负荷模型及感应电动机机械负载特性选取的不同而有所区别。一般而言，非独立参数的构成及其物理意义如下所述。

#### (1) 静态负荷恒定导纳 $Y_{S0}$

由式 (3.20)、式 (3.31) 求得静态负荷初始稳态功率后，其对应导纳值即可计算如式 (3.35)。

$$Y_{S0} = \frac{1}{Z_S(0)} = \frac{P_S(0) - jQ_S(0)}{V_L^2(0)} = G_{S0} - jB_{S0} \quad (3.35)$$

#### (2) 静态负荷结构参数 $C_P$ 、 $C_Q$ ，即静态负荷中的恒功率成份比例，其值为：

$$C_P = 1 - (A_P + B_P); \quad C_Q = 1 - (A_Q + B_Q)$$

#### (3) 感应电动机负载率 $T_0$ ，由式 (3.34) 计算。

(4) 感应电动机机械负载特性参数  $C$ ，即机械负载中的恒转矩成份比例，其值为：  $C = 1 - (A + B)$

### 3.5.2 模型的辨识准则与目标函数

以各采样时刻系统实测响应与模型响应之差的平方和作为目标函数，见式 (3.36)，辨识准则综合考虑使目标函数最小和迭代次数限制。

$$\min J[x(t), u(t), \alpha, \beta] = \min \sum_{k=1}^L \left\{ [y(k) - y_m(k)]^T [y(k) - y_m(k)] \right\} \quad (3.36)$$

式中： $L$  为实测数据记录长度； $k$  为采样时刻； $x(t)$  为系统状态向量，由状态方程确定； $u(t)$  为系统输入向量； $y$  为系统实测的输出向量， $y_m$  是与  $y$  相对应的模型输出响应向量； $\alpha$  是独立待辨识参数； $\beta$  是非独立待辨识参数。

### 3.5.3 模型的递推辨识策略

传统感应电动机模型的电压激励是感应电动机端电压，模型响应即为感应电动机与静态负荷的功率之和。本章所建立的“综合感应电动机模型”则与此完全不同——其激励及响应为配电网集结等效线路首端电压与功率，如图 3.4 所示。这一特点决定了必须有不同于传统感应电动机模型的辨识策略方可实现“综合感应电动机模型”的总体测辨建模。基于此，提出如图 3.6 所示的“综合感应电动机模型”的“递推辨识”策略。

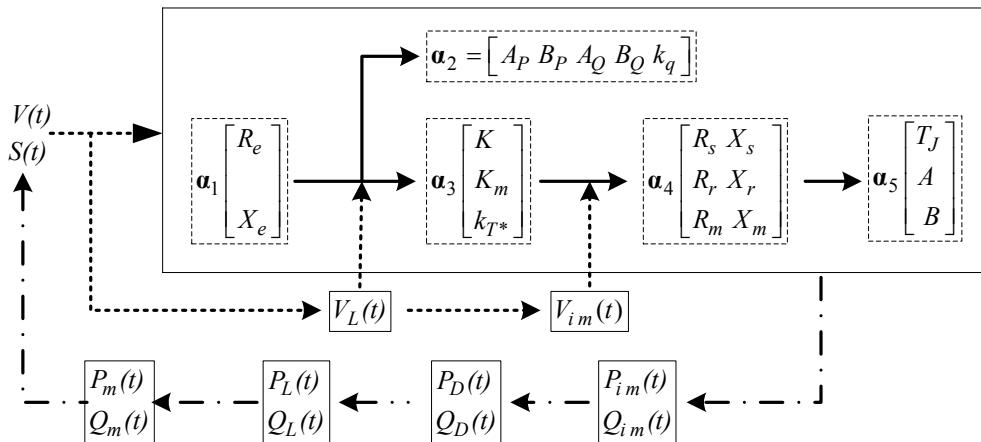


图 3.6 综合感应电动机模型“递推辨识”策略示意图

图 3.6 中箭实线表示模型由激励产生响应的物理作用过程；箭虚线表示电压激励递推过程；箭点画线表示模型响应递推过程。针对图 3.6 所示的综合感应电动机模型“递推辨识”策略的基本思想和关键要点简要说明如下：

1) 对于任意时刻点，由集结等效线路首端实测电压激励  $V(t)$  和等效线路参数，递推出末端激励  $V_L(t)$ ，即为感应电动机动态负荷在系统基准下的端电压激励和静态负荷端电压激励；进而经“基准变换”获得感应电动机机端电压激励  $V_{im}(t)$ ，即为感应电动机在其自身基准下的端电压激励。

2) 对于任意时刻点，通过上述递推得到的模型电压激励和模型结构与参数，即可求得综合感应电动机模型的功率响应。从末端感应电动机的动态响应开始，由感应电动机机端电压激励  $V_{im}(t)$  和感应电动机参数即可求得感应电动机在其自身基准下的功率响应  $P_{im}(t)$  和  $Q_{im}(t)$ ，经过“基准变换”可获得感应电动机动态负荷在系统基准下的动态负荷功率响应  $P_D(t)$  和  $Q_D(t)$ ；将此动态负荷功率响应与静态负荷电压激励  $V_L(t)$  和静态负荷参数产生的静态负荷功率响应  $P_S(t)$  和  $Q_S(t)$  求和，即可得到集结等效线路末端的功率响应  $P_L(t)$  和  $Q_L(t)$ ；进而通过集结等效线路的等效参数，即可求得综合感应电动机模型的等效线路首端的功率响应  $P_m(t)$  和  $Q_m(t)$ ，将此模型功率响应与实测功率  $P(t)$  和  $Q(t)$  进行目标函数计算，作为参数优化准则的判断依据。

3) 对于每一次迭代过程，由实测样本和独立待辨识参数  $\alpha^{(i-1)}$  求得模型状态变量的初值和非独立待辨识参数  $\beta^{(i-1)}$ ；基于此，通过 1) 和 2) 的计算求得模型功率响应，以此来和实测功率进行目标函数的计算，来判断是否满足终止准则；对满足要求的输出其结果  $\alpha^{(i-1)}$  和模型响应拟合曲线，否则，进行遗传进化优化，得到新的独立待辨识参数  $\alpha^{(i)}$ ，重复上述迭代过程，直至得到满足终止准则的参数。

上述递推辨识过程所必须的基本解析描述已在上文（3.2~3.4 节）给出，其具体辨识流程如图 3.7 所示。

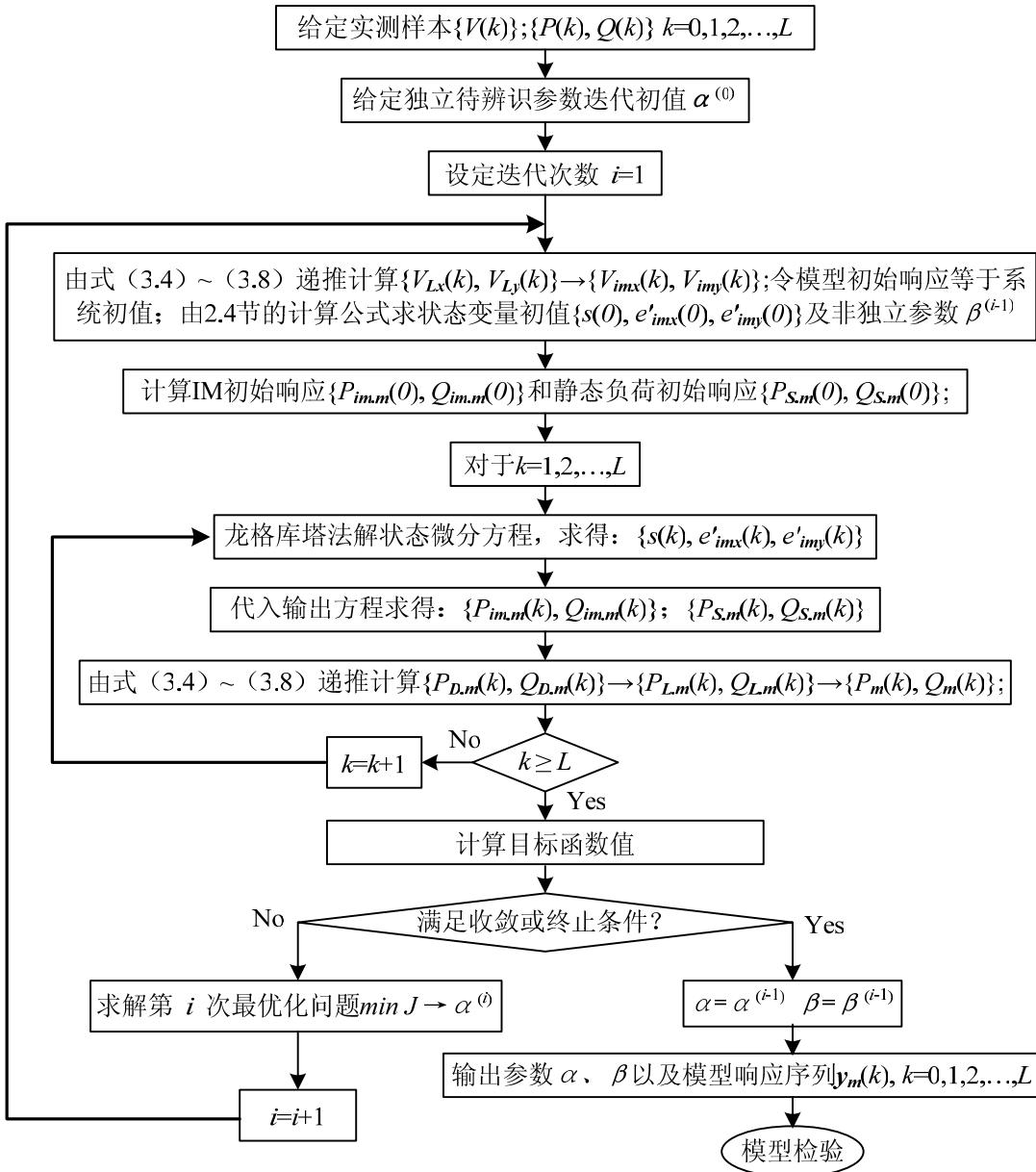


图 3.7 综合感应电动机模型辨识流程图

## 3.6 实例研究

### 3.6.1 实测数据来源及辨识模型选择

为检验本章提出的“综合感应电动机模型”的整体性能，取湖南电网某 220kV 变电站 110kV 侧的 22 个实测记录样本进行总体测辨建模。采用文献[37]之分类方法分为 4 组，其基本特征如表 3.1 所示。

本文采用 2.5 节介绍的综合改进型遗传算法<sup>[34]</sup>进行模型参数的优化，选取两种负荷模型，对表 3.1 所列 22 个样本进行模型参数辨识。综合改进的遗传算法通过初始种群选择、最优个体保留、自适应交叉和变异率等方面进行综合设计，有效地避免了早熟和近亲繁殖，提高了收敛速度，缩短辨识时间，同时提高了拟合

精度，克服了参数的分散性，是一种适合于负荷建模参数辨识的优化算法。

模型 I：传统感应电动机模型<sup>[77]</sup>。模型共 8 个独立辨识参数，其物理意义参见文献[77]。独立辨识参数矢量为：

$$\boldsymbol{\alpha} = [G_{S0} \ B_{S0} \ R_S \ X' \ T'_0 \ n \ T_J \ a]^T$$

模型 II：本章建立的“配电网集结等效的综合感应电动机模型”，静态负荷设为恒阻抗特性，且设  $k_{T^*}=1$ 。模型共 14 个独立参数。独立辨识参数矢量为：

$$\boldsymbol{\alpha} = [R_e \ X_e \ k_q \ K \ K_m \ R_s \ X_s \ R_r \ X_r \ R_m \ X_m \ T_j \ A \ B]^T$$

表 3.1 变电站实测负荷数据特征

序号	编号	记录时间	$V_0/\text{kV}$	$P_0/\text{MW}$	$\Delta V(\%)$
1	1-1	2003.08.21.04:43:35pm	122	42	-7.2
2	1-2	2003.08.21.04:58:12pm	122	41.8	-6.5
3	1-3	2003.09.12.02:09:09pm	122	34.65	-11.7
4	1-4	2003.10.12.05:58:39pm	124.3	37.3	-17.2
5	1-5	2003.08.11.02:20:17pm	112	70	-2.7
6	1-6	2003.08.21.05:41:53pm	122	41.58	-12.6
7	1-7	2003.09.01.08:56:03pm	122	39	-4.5
8	1-8	2004.12.25.02:30:24pm	111	35	-13.7
9	1-9	2004.12.26.05:03:22am	122	13	-10
10	1-10	2005.02.07.01:06:13pm	122	33	-2.7
11	1-11	2005.02.11.08:33:34am	122	14	-7.2
12	2-1	2004.12.25.05:19:18pm	122	31	-16
13	2-2	2005.01.14.11:29:53am	122	10.7	-17
14	2-3	2004.12.28.11:56:58am	122	84	-16
15	2-4	2004.12.28.12:52:57pm	122	7	-11.8
16	2-5	2005.01.07.12:02:56pm	122	58	-12
17	2-6	2005.02.10.12:41:28pm	127	63	-8.7
18	3-1	2005.02.12.03:50:12pm	122	28	-11
19	3-2	2005.02.12.04:36:26pm	122	28	-6.3
20	3-3	2005.02.12.05:12:39pm	122	28	-13.6
21	4-1	2005.02.12.06:22:13pm	122	32	-8.1
22	4-2	2005.02.12.06:40:22pm	122	32	-10.1

### 3.6.2 辨识结果

为反映模型响应曲线对样本实测曲线拟合的优劣，定义如式（3.37）的拟合残差，其大小即可反映拟合的效果。

$$E = \sum_{k=1}^L \sqrt{[P(k) - P_m(k)]^2 + [Q(k) - Q_m(k)]^2} / L \quad (3.37)$$

式中  $L$  为实测数据记录长度； $k$  为采样时刻； $P(k)$  和  $Q(k)$  分别为系统实测有功和无功； $P_m(k)$  和  $Q_m(k)$  分别为与  $P(k)$  和  $Q(k)$  对应的模型响应有功和无功。

本节给出部分“综合感应电动机模型”及传统感应电动机模型的响应曲线以便说明模型性能。图 3.8 为对应于样本 1-1 的响应曲线，其中“measured”为实测响应，“8model”为传统感应电动机模型响应，“14model”为配电网集结等效的综合感应电动机模型响应（下同）。限于篇幅，其它响应曲线从略。各样本对应的两种模型的辨识所得模型参数见表 3.2、表 3.3 所示。

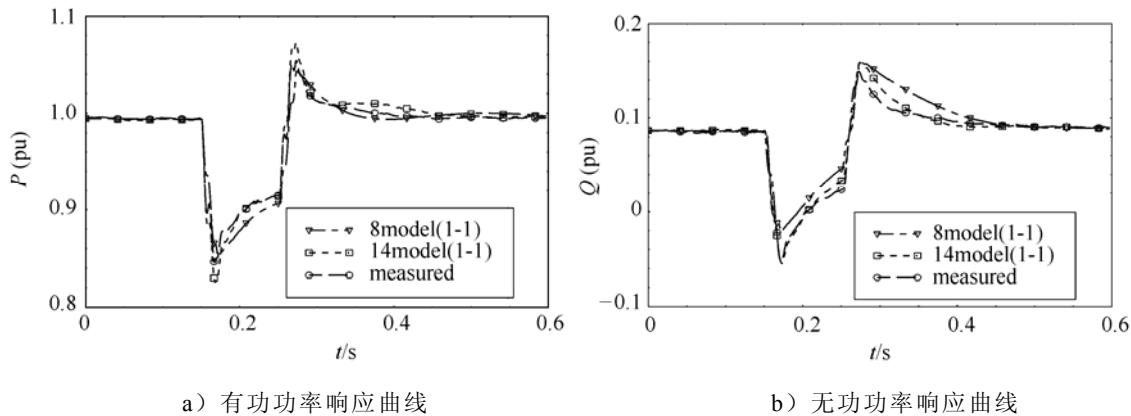


图 3.8 样本 1-1 的实测与模型响应

表 3.2 8 参数传统感应电动机模型参数辨识结果

序号	编号	$G_{S0}$	$B_{S0}$	$R_S$	$X'$	$T_0'$	$n$	$T_J$	$a$	残差
1	1-1	0.427	0.142	0.0231	0.415	0.592	2.512	2.752	0.058	0.155
2	1-2	0.513	0.035	0.0205	0.483	1.520	1.892	2.069	0.168	0.127
3	1-3	0.228	0.586	0.0162	0.284	0.196	5.593	1.684	0.872	0.254
4	1-4	0.132	1.241	0.0273	0.261	0.059	0.531	0.621	0.764	0.176
5	1-5	0.432	0.407	0.0140	0.395	0.316	0.236	0.543	2.492	0.097
6	1-6	0.502	0.071	0.0250	0.487	1.257	2.292	2.660	0.876	0.078
7	1-7	0.496	-0.04	0.0214	0.391	1.899	3.596	3.538	1.412	0.120
8	1-8	0.483	0.655	0.0272	0.328	0.086	2.944	0.277	2.711	0.190
9	1-9	0.687	0.687	0.0282	0.481	0.309	3.291	4.835	2.848	0.157
10	1-10	0.240	0.585	0.0440	0.307	0.685	2.490	0.145	0.461	0.100
11	1-11	0.675	-0.05	0.0031	1.060	2.223	2.484	7.716	1.422	0.113
12	2-1	0.428	0.606	0.0323	0.393	0.043	2.513	0.042	1.920	0.160
13	2-2	0.496	0.065	0.0385	0.570	1.154	2.888	3.031	0.245	0.120
14	2-3	0.592	0.100	0.0283	0.544	0.779	0.674	0.310	4.109	0.120
15	2-4	0.535	0.150	0.0267	0.383	0.587	3.600	2.873	0.361	0.230
16	2-5	0.602	0.078	0.0281	0.582	1.019	4.624	1.813	0.014	0.150
17	2-6	0.516	0.452	0.0323	0.375	0.114	1.347	0.577	3.471	0.170
18	3-1	0.603	0.115	0.0436	0.534	0.400	3.193	1.388	2.468	0.140
19	3-2	0.382	0.599	0.0344	0.315	0.066	6.965	0.282	1.250	0.129
20	3-3	0.499	0.679	0.0219	0.346	0.053	0.865	0.167	0.746	0.140
21	4-1	0.527	0.252	0.0343	0.422	0.190	3.104	0.581	0.417	0.158
22	4-2	0.505	0.249	0.0509	0.632	0.206	1.820	4.185	1.435	0.176

表 3.3 14 参数综合感应电动机模型参数辨识结果

序号	编号	$R_s$	$X_s$	$R_r$	$X_r$	$R_m$	$X_m$	$T_j$	$A$	$B$	$K$	$K_m$	$R_e$	$X_e$	$k_q$	残差
1	1-1	0.0354	0.231	0.019	0.126	0.021	1.863	5.551	0.224	0.315	2.345	0.566	0.041	0.016	4.104	0.012
2	1-2	0.0406	0.295	0.030	0.213	0.018	1.994	4.944	0.186	0.289	1.702	0.731	0.032	0.014	4.112	0.014
3	1-3	0.0386	0.306	0.016	0.135	0.016	1.625	6.193	0.242	0.243	1.517	0.614	0.046	0.015	3.843	0.031
4	1-4	0.0382	0.301	0.027	0.208	0.023	1.675	4.833	0.215	0.265	1.957	0.742	0.039	0.012	3.747	0.024
5	1-5	0.0361	0.272	0.016	0.143	0.025	2.135	4.405	0.193	0.346	2.711	0.579	0.042	0.021	3.671	0.015
6	1-6	0.0381	0.299	0.018	0.155	0.028	2.301	5.104	0.201	0.298	1.615	0.598	0.040	0.015	3.459	0.024
7	1-7	0.0346	0.227	0.031	0.214	0.031	2.435	4.899	0.215	0.325	2.145	0.624	0.44	0.024	3.584	0.043
8	1-8	0.0328	0.319	0.023	0.198	0.028	2.684	4.466	0.193	0.265	1.689	0.456	0.035	0.022	3.256	0.035
9	1-9	0.0406	0.286	0.021	0.221	0.023	2.145	5.214	0.201	0.323	2.445	0.566	0.053	0.018	4.112	0.015
10	1-10	0.0331	0.253	0.026	0.218	0.031	1.984	5.356	0.215	0.245	1.865	0.626	0.041	0.020	3.577	0.031
11	1-11	0.0348	0.305	0.027	0.196	0.29	2.245	5.211	0.193	0.265	1.997	0.579	0.036	0.019	4.245	0.063
12	2-1	0.0307	0.246	0.031	0.139	0.275	2.639	3.523	0.158	0.754	3.880	0.424	0.061	0.022	1.378	0.076
13	2-2	0.0304	0.277	0.019	0.124	0.182	1.861	2.634	0.175	0.759	4.166	0.396	0.062	0.039	1.053	0.045
14	2-3	0.0254	0.212	0.022	0.104	0.306	2.627	3.355	0.261	0.638	3.967	0.385	0.095	0.045	1.732	0.062
15	2-4	0.0274	0.277	0.024	0.106	0.323	2.246	3.239	0.150	0.749	3.409	0.261	0.090	0.047	1.040	0.033
16	2-5	0.0234	0.208	0.027	0.117	0.177	2.572	2.817	0.198	0.691	4.521	0.277	0.058	0.039	1.079	0.086
17	2-6	0.0278	0.239	0.019	0.177	0.272	3.036	2.849	0.224	0.654	4.335	0.202	0.057	0.033	1.056	0.052
18	3-1	0.0268	0.196	0.012	0.116	0.038	0.966	7.261	0.180	0.055	3.803	0.474	0.010	0.012	2.470	0.075
19	3-2	0.0311	0.225	0.020	0.072	0.032	1.635	3.045	0.043	0.097	2.206	0.391	0.006	0.007	1.745	0.064
20	3-3	0.0264	0.154	0.014	0.064	0.031	1.863	5.621	0.056	0.053	2.57	0.340	0.107	0.041	1.079	0.036
21	4-1	0.0126	0.112	0.009	0.031	0.112	1.970	3.392	0.086	0.160	19.04	0.354	0.022	0.010	2.631	0.080
22	4-2	0.0153	0.099	0.008	0.034	0.169	1.416	3.161	0.074	0.215	20.35	0.176	0.010	0.013	1.880	0.034

### 3.6.3 模型有效性检验

基于上述建模结果，现就本章所提出的“配电网集结等效的综合感应电动机模型”的描述能力、泛化能力、参数分散性和辨识效率等问题简要讨论如下。

#### 3.6.3.1 模型的自描述能力

图 3.8 直观表明，“综合感应电动机模型”对建模样本的逼近效果优于传统感应电动机模型；图 3.9 则展示了对表 1 所列的所有 22 个样本的拟合残差比较，由图可知，“综合感应电动机模型”对所有样本的最大残差为 0.086，最小残差为 0.012，平均拟合残差为 0.043，仅为传统感应电动机的 29.3%。上述结果充分说明，“综合感应电动机模型”有较强的自描述能力，且较传统感应电动机模型有了一定的提高。

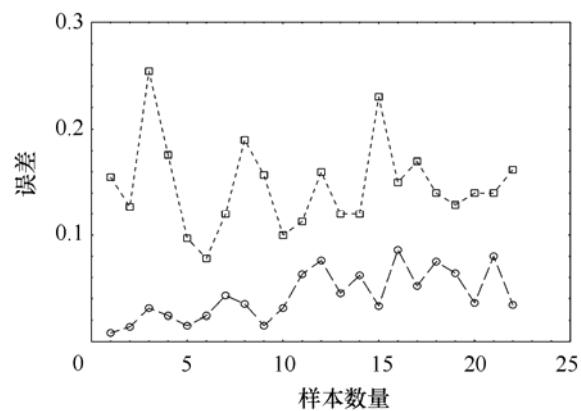


图 3.9 8 参数模型和 14 参数模型的拟合残差比较

#### 3.6.3.2 模型的泛化能力

图 3.10 为由样本 1-1 辨识所得 8 参数及 14 参数模型在样本 1-5 之激励作用下的模型响应曲线。由于样本 1-1 之建模激励幅度为  $\Delta V_{1-1} = -7.2\%$ ，样本 1-5 之激励幅度为  $\Delta V_{1-5} = -2.7\%$ ，所以上述模型响应为样本 1-1 模型之内插响应。

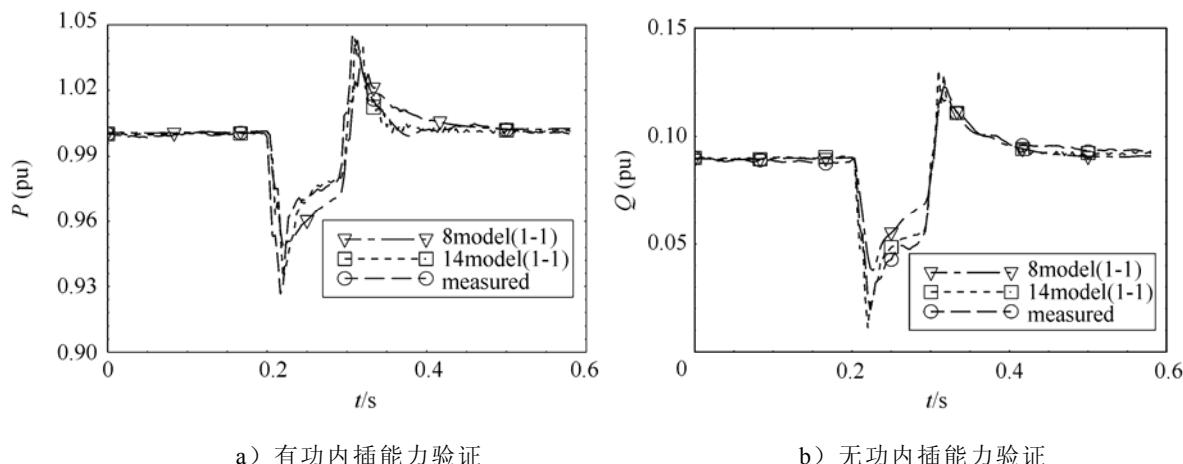


图 3.10 样本 1-1 对样本 1-5 的内插响应

图 3.11 为由样本 1-1 辨识所得 8 参数模型及 14 参数模型在样本 1-8 之激励作用下的模型响应曲线。由于样本 1-8 之激励幅度为  $\Delta V_{1-8} = -13.7\%$ , 所以上述模型响应为样本 1-1 模型之外推响应。

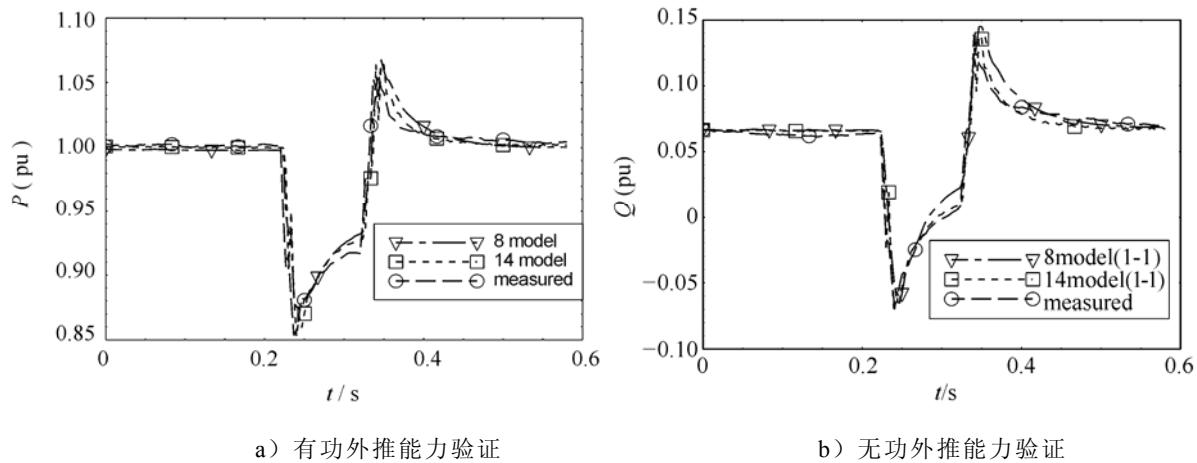


图 3.11 样本 1-1 对样本 1-8 的外推响应

图 3.10、图 3.11 给出的内插外推检验样本与建模样本之电压激励幅度相差悬殊,  $|\Delta V_{1-5}|=37.5\%|\Delta V_{1-1}|$ ,  $|\Delta V_{1-8}|=190\%|\Delta V_{1-1}|$ , 但“综合感应电动机模型”对内插、外推样本的实测响应均能很好地拟合。由表 3.4 可知, “综合感应电动机模型”对所展示样本的有功拟合残差分别只有传统感应电动机模型的 15% (内插) 和 21% (外推); 无功拟合残差分别为 26% (内插) 和 27% (外推)。上述结果充分说明, “综合感应电动机模型”的泛化能力优于传统感应电动机模型。

表 3.4 内插外推测试响应残差比较

模型	有功/无功	内插响应残差	外推响应残差
8 参数模型	有功 $P$	0.134	0.128
	无功 $Q$	0.159	0.132
14 参数模型	有功 $P$	0.034	0.027
	无功 $Q$	0.042	0.036

### 3.6.3.3 模型的参数稳定性

模型对同类负荷样本辨识所得参数的分散程度在一定程度上, 能有效的检验模型的参数稳定性, 即“模型可辨识性”<sup>[78]</sup>。只有参数稳定性好的模型才具有真正的实用化意义。为此, 本章定义如式 (3.38) 所示的模型参数分散度指标。

$$\left\{ \begin{array}{l} b^j = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n x_i^j - \left( \sum_{i=1}^n x_i^j \right)^2}{n(n-1)}} \Bigg/ \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i^j}{n} \right)} \\ c = \sum_{j=1}^k b^j / k \end{array} \right. \quad (3.38)$$

式中,  $x_i^j$  为每组数据的第  $i$  个样本的第  $j$  个辨识参数;  $n$  为每组样本的个数;  $b^j$  为每组样本的第  $j$  个参数的分散度;  $k$  为参数个数 (本章为  $k = 8$  和  $k = 14$ );  $c$  为同组参数的平均分散度。

根据两种模型对表 3.1 所列所有样本辨识所得的模型参数, 可由式 (3.38) 获得相应的同组模型参数分散度如表 3.5 所示。

由表 3.5 可知, “综合感应电动机模型”的平均分散度只有传统感应电动机模型的 50% 左右。这充分说明, “综合感应电动机模型”的参数稳定性好且优于传统感应电动机模型。

表 3.5 8 参数模型和 14 参数模型的分散性结果比较

组别	各参数平均分散度	
	8 参数模型	14 参数模型
1	0.7250	0.385
2	0.5356	0.284
3	0.5282	0.231
4	0.2547	0.113

### 3.6.3.4 模型的辨识效率

图 3.12 给出了在相同拟合精度下, “综合感应电动机模型”与传统感应电动机模型对所有样本的收敛速度比较。由此充分说明“综合感应电动机模型”具有更高的辨识效率。

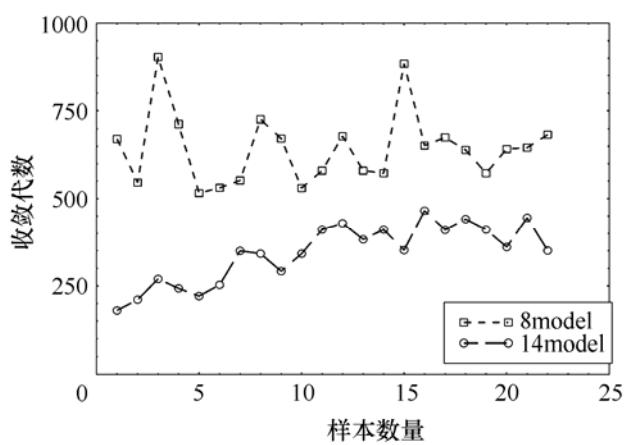


图 3.12 8 参数模型和 14 参数模型的收敛代数比较

## 3.7 本章小结

本章基于电网工程仿真计算的综合负荷模型应用环境, 从总体测辨的角度, 提出了配电网集结等效的“综合感应电动机模型”。该模型不仅计及了配网参数, 而且增加了无功调整元件, 增强了模型对综合负荷暂态无功的描述能力; 模型能

够自动辨识变压器有载调节分接头（OLTC）以及感应电动机容量，增强了模型对负荷水平变化的适应能力；模型结构更加符合工程仿真计算所模拟综合负荷的实际情况。大量基于现场实测数据的建模实践表明，本章提出的“考虑配电网集结等效的综合感应电动机模型”对综合负荷的描述能力和泛化能力、参数稳定性、辨识效率等综合性能较目前普遍使用的传统感应电动机模型有一定的改进，具有良好的实用性。本章建立的含配电网（包括 110kV 及以下配电线路和变压器）的配电网综合负荷模型结构及其参数确定方法，为考虑分布式发电影响的配电网综合负荷建模提供了有效的广义综合负荷模型结构体系基础。

# 第4章 考虑风力发电的配电网综合负荷建模方法和模型结构研究

## 4.1 引言

### 4.1.1 世界各国风力发电的发展

可再生能源特别是风能的开发利用已得到世界各国的高度重视。20世纪70年代的石油危机，使美国、西欧等发达国家为寻求替代化石燃料的能源，投入大量经费研制现代风力发电机组，开创了风能利用的新时代<sup>[79]</sup>。

世界风力发电（Wind Power Generation, WG）的第一次浪潮起源于上世纪80年代的美国加利福尼亚州，1978年颁布的“公共事业管理法”（Public Utility Regulatory Policies Act, PURPA）在美国引发了一场发电革命，它消弱了集中化发电方式，为无数的小型企业进入发电领域提供了机会，使小型发电商可以接入电网，致使风力发电繁荣一时。但伴随而来的大量的低劣风力发电设备和声名狼藉的财政计划也给80年代的加州风电工业打上了深深的烙印。先行者难免要走弯路，风电就是在这种苦苦挣扎的技术和失败的投资当中诞生的<sup>[80]</sup>。

本世纪初，德国政府迫于其国内CO<sub>2</sub>排放量的限制和化石燃料的短缺，出台的“可再生能源法”（Renewable Energy Sources Act, RESA），使风力发电得以快速发展，一举超过美国，成为世界风力发电的第一大国<sup>[81]</sup>。在德国风电快速发展过程中，当地居民的参与扮演了关键角色。当地风电项目发起者通常会组建一个项目公司，并邀请当地居民按照有限合伙人加入到该投资项目，合伙人一起成立一个有限责任公司，开发、拥有、运行一个当地居民拥有的风电场<sup>[82]</sup>。

与此同时，丹麦、西班牙、印度等国也开展了不同程度的风力发电研究。丹麦通过大力发展风力发电设备制造业，几乎占据了世界风轮机市场的半壁江山，成为丹麦国民经济的支柱产业，被视为风电行业成功的典范<sup>[83]</sup>；西班牙的风电装机容量也于2007年底攀升到15145MW，接近美国<sup>[84]</sup>；印度也在巨大的能源压力下，至2007年底风电装机容量达8000MW，跻身世界前5位，成为发展中国家风电发展的“领头羊”<sup>[85]</sup>。

中国在上世纪70年代也开始了风电开发，主要目的是为电网未到达的偏远地区提供电力，如牧区和孤岛<sup>[86]</sup>。近年来，随着风力发电技术的快速发展和国家在政策上对可再生能源发电的重视，我国风力发电建设已进入了一个快速发展的时

期<sup>[87]</sup>。2006 年我国累计装机容量增长率为 105%，净增 1337MW，新增风电装机容量比 2006 年以前的总装机容量还要大，增幅居世界第一。2007 年增长速度更快，累计装机容量增长率达 226%，从 2006 年底的 2559MW 增加到 2007 年底的 6050MW。至 2007 年底，中国累计装机容量已上升至世界第 5 位<sup>[88]</sup>。中国有丰富的风电资源，既可大规模开发以满足快速增长的能源需求（如“风电三峡”），又可以满足 7200 万生活在没有传统电力供应的农村居民生活需要，并且在国家大力开发可再生能源和节能减排的政策指导下，全民参与的分布式能源（风能、太阳能等）的开发与利用也将成为大势所趋，风能的开发和利用更是首当其冲。

#### 4.1.2 风力发电对电力系统的影响

随着世界各国风力发电装机容量的不断增加，WG 的接入对电力系统的影响一直是研究的热点<sup>[89~91]</sup>。这些研究包括：风电穿透功率极限计算<sup>[92~94]</sup>；含 WG 的电力系统潮流计算<sup>[95]</sup>；含 WG 的系统电压稳定分析<sup>[96~98]</sup>；含 WG 的电力系统暂态稳定分析<sup>[99~101]</sup>；WG 的接入对电力系统继电保护的影响<sup>[102,103]</sup>；WG 的接入对电能质量的影响<sup>[104]</sup>；WG 的接入对系统短路容量<sup>[105]</sup>、系统备用<sup>[106]</sup>、频率调整<sup>[107]</sup>的影响等。通过国内外专家学者开展的广泛而深入的研究，均取得了不同程度的阶段性成果，相关研究成果也已逐步应用到实际电力系统生产运行中。

从负荷建模的研究角度出发，风力发电作为一种典型的分布式电源，当其作为配电网综合负荷的一部分时，其接入势必会对综合负荷模型及参数的确定造成一定程度的影响，进而会影响电力系统仿真计算的准确性。实践表明，传统的感应电动机并联静态负荷模型对于配网侧不含电源的综合负荷有很强的描述能力。但是当配网侧有风力发电、小水电等地方小电源接入后，传统的负荷模型已不能很好的描述区域负荷特性。基于此，近年来有学者提出了广义电力负荷模型的概念并进行了相关研究。文献[21]针对配网侧的小电源用同步发电机来等效，提出了感应电动机、同步发电机和静态负荷三者并联的广义负荷模型结构和参数确定策略；文献[22]提出用异步发电机来等效配网侧接入的电源，进而提出了异步机并联静态负荷模型的广义综合负荷模型，可以很好地描述配网侧接入电源的影响。这些文献对含风力发电的负荷建模有着很好的借鉴和指导意义，但尚未从风力发电本身的结构和特性上进行研究，在获得模型辨识所需的负荷特性数据样本仿真时，均用同步发电机等效配网侧小电源；同时也未全面地考虑不同的负荷比例组合，未研究不同影响因素下风力发电对配电网综合负荷建模的影响。

#### 4.1.3 建模方法与思路

研究考虑风力发电的配电网综合负荷建模，根据 1.3.4 节的分析可知，总体测辨办法是较适合现阶段研究的一种重要方法。基于总体测辨办法的负荷建模研究，需要大量的现场实测系统运行数据，就现阶段而言，受实验设备、电网安全等限制，

虽然这些数据还无法从电力系统实测采集，但可以结合现有的计算机仿真方法进行相关电力系统仿真计算的重要研究手段，来获取负荷特性数据，以此来替代现场实测数据。因此，进行考虑 WG 的配电网综合负荷建模研究的首要工作，就是构建含 WG 的配电网仿真系统，进行电力系统暂态仿真，获取模型辨识所需的数据样本；其次，通过对 WG 运行特性的分析，研究作为广义上的负荷，WG 是等效为静态负荷还是动态负荷？等效模型又如何？基于此，提出适合描述含 WG 的配电网综合负荷特性的广义综合负荷模型结构及其参数辨识方法；最后，在上述研究的基础上，对所提出的模型进行综合适应性能力检验。

基于此，本章基于 MATLAB 仿真工具，用定桨距的鼠笼式感应发电机组接入配电网仿真系统进行电力系统暂态仿真，以此获取辨识建模所需的负荷特性数据样本；当把 WG 看作一个功率消耗为负的广义动态负荷时，可以用异步发电机来等效描述，进而指出含 WG 的配电网综合负荷可以用异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型来等效描述；为准确反映不同运行方式下，风力发电出力对配电网综合负荷特性的影响，模型中的动态负荷所占比例（动静比例）的取值范围必须扩大到任意实数；通过 3 种典型运行方式的建模，验证本章提出的任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型的综合适应性能力。

## 4.2 仿真系统与方法

### 4.2.1 配电网仿真系统结构

本章采用如图 4.1 所示的配电网仿真系统，虚线框部分为风力发电机组、感应电动机动态负荷和 ZIP 静态负荷共同组成的配网侧广义综合负荷。G1 代表无穷大系统，基于总体测辨建模所需的综合负荷特性数据在母线 B2 处测得。

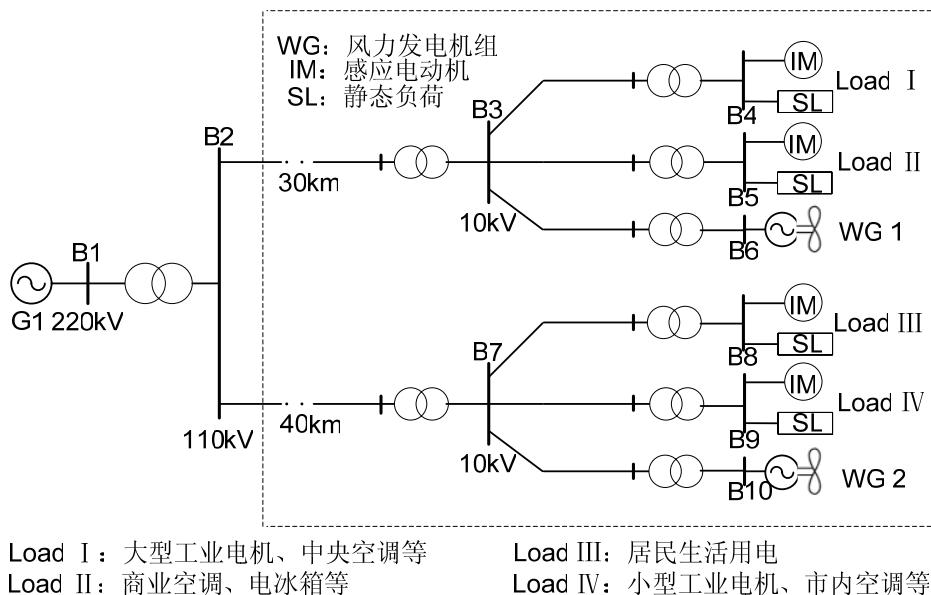


图 4.1 配电网仿真系统

## 4.2.2 采用的负荷模型及其参数

如图 4.1 所示的配电网仿真系统中采用的负荷模型为感应电动机动态负荷并联静态负荷的综合负荷，其中基于 MATLAB 构建的感应电动机动态负荷采用极坐标系下的 3 阶机电暂态微分方程描述，其中机械负载特性取为转速的 2 次函数，如式 (4.1)、(4.2) 所示。

$$\begin{cases} \frac{dE_d'}{dt} = -\frac{1}{T'} [E_d' + (X - X') I_q] - (\omega - 1) E_q' \\ \frac{dE_q'}{dt} = -\frac{1}{T'} [E_q' - (X - X') I_d] + (\omega - 1) E_d' \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C) T_0 - (E_d' I_d + E_q' I_q)] \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s (U_d - E_d') + X' (U_q - E_q')] \\ I_q = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s (U_q - E_q') - X' (U_d - E_d')] \end{cases} \quad (4.2)$$

其中：

$$\begin{aligned} T' &= (X_r + X_m) / R_r \\ X &= X_s + X_m \\ X' &= X_s + X_m X_r / (X_m + X_r) \\ A + B + C &= 1 \end{aligned}$$

式中： $R_s$  为定子绕组电阻； $X_s$  为定子绕组漏抗； $X_m$  为励磁电抗； $R_r$  为转子电阻； $X_r$  为转子漏抗； $H$  为转子惯性常数； $A$  为与转速的平方成比例的转矩系数； $B$  为与转速成比例的转矩系数； $C$  为恒定转矩系数； $\omega$  为感应电动机同步角速度； $T_0$  为感应电动机机械负载率； $I_d$  和  $I_q$  分别为感应电动机定子电流的  $d$  轴和  $q$  轴分量； $U_d$  和  $U_q$  分别为感应电动机端电压的  $d$  轴和  $q$  轴分量； $E_d'$  和  $E_q'$  分别为感应电动机暂态电势的  $d$  轴和  $q$  轴分量； $T'$  为感应电动机暂态电势衰减时间常数； $X'$  为感应电动机暂态电抗。

基于 MATLAB 构建的静态负荷采用多项式表示的 ZIP 模型，它是由恒阻抗 ( $Z$ )、恒电流 ( $I$ ) 和恒功率 ( $P$ ) 构成，其表达如式 (4.3) 所示。

$$\begin{cases} P_L = P_{L0} (a_p V_{L^*}^2 + b_p V_{L^*} + c_p) \\ Q_L = Q_{L0} (a_Q V_{L^*}^2 + b_Q V_{L^*} + c_Q) \end{cases} \quad (4.3)$$

其中：

$$V_{L^*} = V_L / V_{L0}$$

式中： $P_{L0}$ 、 $Q_{L0}$ 和 $V_{L0}$ 分别为系统稳态运行下的有功、无功和电压初始值； $a_P$ 、 $b_P$ 和 $c_P$ 分别为对应恒阻抗、恒电流和恒功率的有功功率系数； $a_Q$ 、 $b_Q$ 和 $c_Q$ 分别为对应恒阻抗、恒电流和恒功率的无功功率系数。

图 4.1 所示的仿真系统中，感应电动机动态负荷和 ZIP 静态负荷采用的主要参数见表 4.1 所示。

表 4.1 仿真系统感应电动机和静态负荷主要参数

参数	Load I	Load II	Load III	Load IV
$R_s$	0.031	0.053	0.035	0.031
$X_s$	0.067	0.083	0.094	0.100
$X_m$	3.800	1.900	2.800	3.200
$R_r$	0.009	0.036	0.048	0.018
$X_r$	0.170	0.068	0.163	0.180
$H$	1.500	0.800	0.750	0.750
$A$	1.000	0.200	1.000	1.000
$B$	0	0	0	0
$C$	0	0.800	0	0
$a_P$	0.500	0.670	0.600	0.500
$b_P$	0.250	0.170	0.200	0.250
$c_P$	0.250	0.160	0.200	0.250
$a_Q$	0.500	0.670	0.600	0.500
$b_Q$	0.2500	0.170	0.200	0.250
$c_Q$	0.2500	0.160	0.200	0.250

### 4.2.3 风力发电系统模型

根据发电方式的不同，风力发电系统一般采用恒速恒频（Constant Speed Constant Frequency, CSCF）和变速恒频（Variable Speed Constant Frequency, VSCF）两种发电方式<sup>[108]</sup>。

CSCF 风力发电在额定转速附近运行，滑差变化范围较小，从而发电机输出频率变化也较小，根据其采用的风机类型不同，分为定桨距和变桨距两类机型。CSCF 定桨距机型由于结构简单、维护方便和成本较低，在风电发展初期被广泛采用，在现有电网中也运行着大量这类风电机组。其主要由一个定桨距的风机、一个普通感应式发电机（鼠笼式）和一组用于无功补偿的并联电容器直接并网运行，风机和发电机的轴系通过齿轮箱连接。其优点是调节和控制简单，缺点在于叶片、轮毂、塔架等主要部件受力较大，而且风力超过额定风速后风机出力反而下降。CSCF 变桨距机型与定桨距机型类似，也是直接与电网相连，但其可以通过调节桨

叶的迎风角度，在风速高于额定值时保证风电机的出力维持在额定值附近，从而减小风机主要部件的机械损耗。其采用的发电机也是感应发电机，但有时为实现有限范围内的变速运行，通常在感应发电机的转子绕组中串接一个可控电阻，通过调整该电阻值可以达到调整风机转速的目的。该机型也存在制造成本高、结构复杂、不易维护等缺点。

VSCF 风力发电由于近年来随着大规模电力电子技术的日趋成熟，同时为了在各种风速下实现最大风能捕获，而成为大容量风力发电设备的主要选择方向。VSCF 风力发电有多种方案，尤以变桨距风机+双馈式感应发电机和变桨距风机+直驱式同步发电机两种方式应用较为广泛。变桨距风机+双馈感应发电机是一种采用脉宽调制技术的新型风力发电机组，与普通感应发电机采用鼠笼式转子不同，其采用绕线式转子绕组。这种发电机的定子绕组与电网有电气连接，转子绕组通过变频器（一般由转子侧整流器、直流电容和电网侧逆变器组成）与电网相连。风速较低时，为维持发电机机械转矩和电磁转矩的平衡，转子绕组从电网吸收一定数量的功率再通过定子绕组送回电网；风速较高时，一部分功率直接通过转子绕组送入电网。由于该类型机组与电网存在功率交换，因此在风速波动较大时，其对系统稳定存在一定的影响。变桨距风机+直驱式同步发电机不直接与电网相连，而是通过功率变频器与电网间接相连，以防止风电功率波动对主电网的电能质量造成不良影响。与双馈风力发电系统相比，这种风电机组需要配备 100% 容量的变频器，因此造价较高，损耗也比较大。

通过上述分析，四种机组存在各自的优缺点，如表 4.2 所示。从分布式发电应用的角度来看，一般采用小规模、小容量的风力发电机组较为合适，且要求维护方便、成本较低为宜。定桨距+鼠笼式感应发电机自诞生以来以其结构简单、适合高速运行、可靠性高、成本低等优点被广泛应用于多个领域，是国内外与电网并网运行的风力发电机组中广泛采用的发电机。同时，从电网现有运行的风力发电机组来看，也具有一定的代表性。因此，本章采用此类型的风力发电系统作为研究对象。

表 4.2 四种典型风力发电系统性能比较

发电方式	机组类型	结构	成本	维护	发电效率	适用场合
CSCF	定桨距+鼠笼式感应发电机	简单	低	方便	低	小规模、小容量
	变桨距+可变电阻感应发电机	复杂	高	不易	高	小规模、小容量
VSCF	变桨距+双馈式感应发电机	复杂	高	不易	高	大规模、大容量
	变桨距+直驱式同步发电机	复杂	很高	不易	很高	大规模、大容量

定桨距+鼠笼式感应发电机系统结构如图 4.2 所示<sup>[109]</sup>，主要由定桨距的风机、齿轮箱、鼠笼式异步发电机和一组用于无功补偿的并联电容器以及控制系统组成。鼠笼式感应发电机的定子绕组频率等于电网频率，其正常工作在超同步状态，转差率为负值，其绝对值一般取值为 2~5%，且变化范围较小，因而称之为“恒速”型风力发电系统。定桨距+鼠笼式感应发电机系统动态模型主要包括风速模型、风力机模型、机械传动部分模型和发电机模型等。

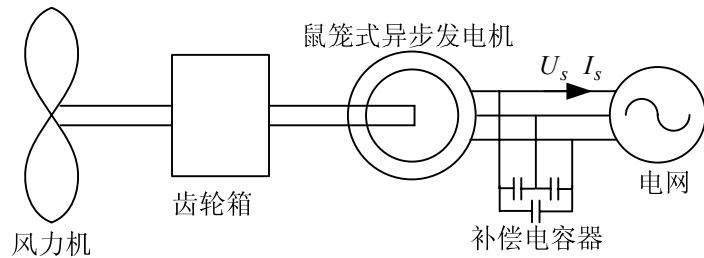


图 4.2 鼠笼式异步风力发电机系统

#### 4.2.3.1 风速模型

风力发电最大的特点之一就是风速具有极强的不确定性，是一个典型的随机变量，这导致风力发电系统的出力水平具有随机性和波动性。但就负荷建模而言，当用于电力系统暂态仿真研究时，其关注的重点往往是在很短的暂态过程（一般数秒的时段）中所表征的负荷特性。因此，当风力发电作为广义综合负荷的组成部分时，在所研究的暂态过程时段内，从宏观的角度（短期可预测范围内）来看，风速的这种随机性和波动性还是具有一定的规律性的。基于此，本章假设所研究时段内，风速不变 ( $v_w = \text{constant}$ )，从而风力发电机出力恒定。

#### 4.2.3.2 风力机模型

风力机捕获的风能与风速的立方成比例关系，同时还与风力机叶片的转速及结构参数、空气密度等有关，可用式 (4.4) 来描述<sup>[110, 111]</sup>。

$$P_w = \frac{1}{2} \rho c_p(\lambda, \beta) A_R v_w^3 \quad (4.4)$$

其中：

$$c_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5.0 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}}$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}}$$

式中： $P_w$  为风力机捕获的风能； $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $c_p$  为风力机的风能转换效率系数； $A_R$  为风轮所覆盖的面积 ( $=\pi R^2$ ,  $R$  为风轮半径)； $v_w$  为风速； $\lambda$  为叶尖速

比； $\beta$  为叶片桨距角。

#### 4.2.3.3 机械传动部分模型

从轮毂到发电机转子之间的机械传动部分，可以近似地用一阶惯性环节来描述，如式（4.5）所示<sup>[112]</sup>。

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{T_d}(T_w - T_m) \quad (4.5)$$

其中：

$$T_w = P_w / \omega_w$$

式中： $T_d$  为机械传动部分的时间常数； $T_m$  为异步发电机转子轴上的机械转矩； $T_w$  为风力机末端轴上的机械转矩，即风力机输出转矩； $\omega_w$  为风力机转子转速。

#### 4.2.3.4 发电机模型

感应发电机和感应电动机是感应电机的两种运行状态，也称异步电机。采用电动机惯例，当转差率  $s (=1-\omega) > 0$  时，异步电机工作在电动机状态；当  $s < 0$  时，异步电机工作在发电机状态。在数学描述模型上，异步发电机和异步电动机的描述是相同的，当采用 3 阶暂态微分方程来描述时，均可用式（4.1）、式（4.2）来描述。

#### 4.2.4 仿真方法

基于 MATLAB 搭建如图 4.1 所示的配电网仿真系统，由于异步发电机的功率因素一般较低，为了提高功率因素，通常在异步发电机出口处接有无功补偿设备。本章采用并联电容器补偿装置，利用开关在风电运行的过程中，按照一定的顺序进行分组投入或切除，从而保证接入系统的每台风力发电机在额定电压时，功率因素不小于 0.98。

在图 4.1 所示的仿真系统中设置故障，假设 110kV 母线 B2 发生三相短路（短路时间 0.2s），电压降低 20%左右，进行电力系统暂态仿真，可获得扰动下系统侧传输到配网侧负荷母线的有功功率、无功功率和电压的动态特性数据，以此作为基于总体测辨法的配电网综合负荷建模参数辨识所需要的实测数据。根据这些仿真数据辨识负荷模型的等值参数，然后再计算综合负荷模型的动态响应，与原始测量的数据进行比较分析。

### 4.3 模型结构与参数辨识

#### 4.3.1 传统综合负荷模型结构

应用较为广泛的传统综合负荷模型采用感应电动机动态负荷并联静态负荷的

模型结构, 如图 4.3 所示, 其等效电路如图 4.4 所示, 为分析动静比例的方便, 图中仅标注有功参考方向, 无功参考方向类似, 下同。

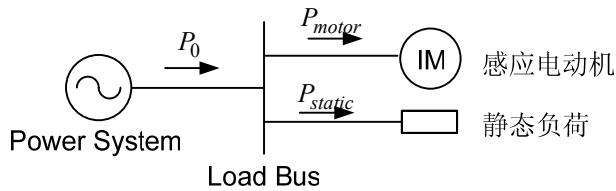


图 4.3 传统综合负荷模型结构

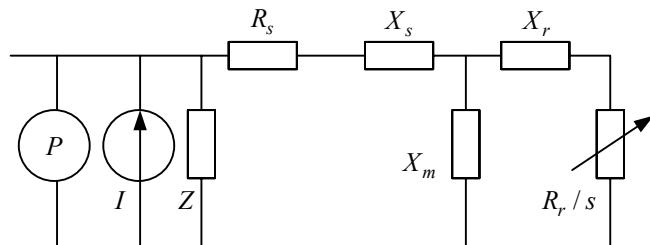


图 4.4 传统综合负荷模型等效电路

图 4.4 中,  $Z$ 、 $I$  和  $P$  分别代表静态负荷的恒阻抗、恒电流和恒功率分量;  $R_s$  为定子绕组电阻;  $X_s$  为定子绕组漏抗;  $X_m$  为励磁电抗;  $R_r$  为转子电阻;  $X_r$  为转子漏抗;  $s$  为转差率。传统综合负荷模型详细描述参见文献[42]所示。

图 4.3 所示的传统综合负荷模型中, 影响综合负荷动态特性的一个重要参数就是感应电动机动态负荷所占比例  $K_m$ , 定义如式 (4.6) 所示, 式中各量均表示对应的初始稳态量, 为表述的方便, 均直接用变量表述 (下同)。

$$K_m = \frac{P_{motor}}{P_0} = \frac{P_{motor}}{P_{motor} + P_{static}} \quad (4.6)$$

式中:  $P_0$  为扰动前综合负荷的初始稳态有功功率;  $P_{motor}$  和  $P_{static}$  分别为感应电动机和静态负荷初始有功功率。

传统综合负荷模型中,  $P_{motor} \geq 0$ ,  $P_{static} \geq 0$ , 即  $0 \leq P_{motor} \leq P_0$ , 则  $K_m$  的取值范围为  $[0, 1]$ 。

### 4.3.2 广义综合负荷模型结构

通过对风力发电系统的结构分析, 可以用异步发电机来等效描述风力发电机组, 而异步发电机和感应电动机的数学模型结构一致, 统称为异步电机。因此, 当把风力发电看作一个功率消耗为负的动态负荷时, 可以用异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型结构来描述含风力发电的配电网综合负荷特性, 模型结构如图 4.5 所示。

图 4.5 所示的广义综合负荷模型中, 影响综合负荷特性的重要参数即为等效动态负荷 (包括感应电动机和异步发电机) 所占比例 (也称动静比例)  $K_m'$ , 采用如图 4.5 所示的功率流动方向为参考正方向, 定义如式 (4.7) 所示。

$$K_m' = \frac{P_{dynamic}}{P_0} = \frac{P_{motor} - P_{generator}}{P_{motor} + P_{static} - P_{generator}} \quad (4.7)$$

式中： $P_0$  为扰动前综合负荷的初始稳态有功功率； $P_{motor}$ 、 $P_{static}$  和  $P_{generator}$  分别为感应电动机、静态负荷和异步发电机的初始有功功率。

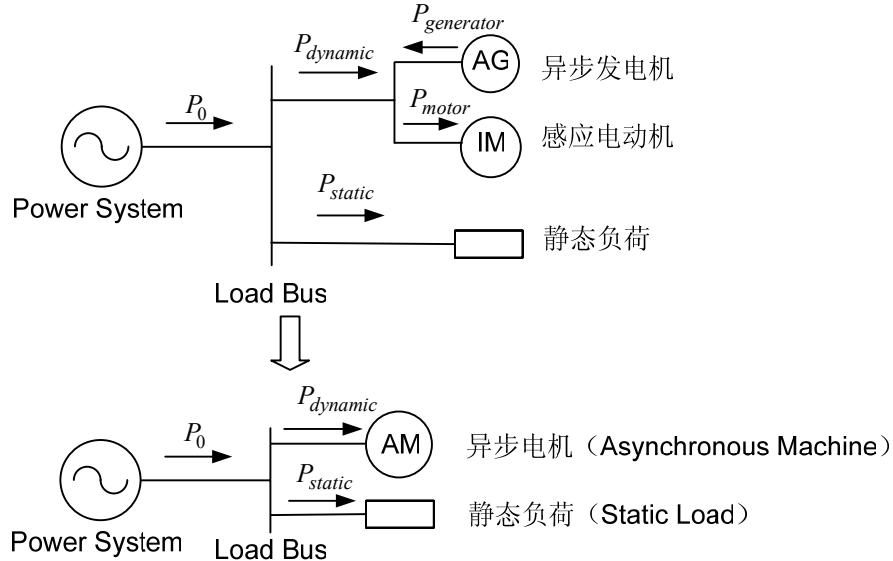


图 4.5 考虑风力发电的广义综合负荷模型结构

广义综合负荷模型中， $K_m'$ 的取值范围不再限定在[0, 1]的范围，根据运行方式的不同主要分三种情况：

1)  $P_{generator} < P_{motor}$ ，即风力发电的出力不足以供给感应电动机动态负荷，此时异步电机运行在电动机状态， $0 < P_{dynamic} \leq P_0$ ，则有  $0 < K_m' \leq 1$ ；

2)  $P_{motor} \leq P_{generator} < P_{motor} + P_{static}$ ，即风力发电出力足以供给感应电动机动态负荷但不足以供给总负荷，此时异步电机运行在发电机状态， $P_{dynamic} \leq 0$ ， $P_0 > 0$ ，则有  $K_m' \leq 0$ ；

3)  $P_{generator} \geq P_{motor} + P_{static}$ ，即风力发电出力足以供给总负荷并可向系统输送功率，此时异步电机运行在发电机状态， $P_{dynamic} < 0$ ， $P_0 \leq 0$ ，则有  $K_m' > 1$ 。

因此，为区分风力发电出力占系统总负荷的比例，广义综合负荷模型中动静比例  $K_m'$  的取值范围必须扩大到任意实数范围。

### 4.3.3 参数辨识

通过对传统综合负荷模型结构和广义综合负荷模型结构的比较分析可知，两种模型在数学表达式描述上是一致的，待辨识模型参数也是一致的，最主要的区别在于动态负荷所占比例（动静比例）的含义和取值范围不同，以此来描述风力发电对配电网综合负荷特性的影响。因此，当静态负荷用恒阻抗模型来描述时，两种负荷模型的独立待辨识参数分别为：

1) 传统综合负荷模型

$$\boldsymbol{\alpha} = [R_s \ X_s \ X_m \ R_r \ X_r \ H \ A \ B \ K_m]^T, \text{ 且 } K_m \in [0, 1]$$

## 2) 广义综合负荷模型

$$\boldsymbol{\alpha}' = [R_s \ X_s \ X_m \ R_r \ X_r \ H \ A \ B \ K_m']^T, \text{ 且 } K_m' \in (-\infty, +\infty)$$

除上述 9 个独立待辨识参数外，还有两个重要的非独立辨识参数（异步电机初始转差率  $s_0$  和机械负载率  $T_0$ ）根据前面的独立辨识参数计算求得，用来判断异步电机是工作在电动机状态还是发电机状态。当  $T_0 > 0, s_0 > 0$  时，异步电机运行在电动机状态；当  $T_0 < 0, s_0 < 0$  时，异步电机作为发电机运行。

基于此，本章采用第二章介绍的总体测辨负荷建模方法进行含风力发电的配电网综合负荷建模研究。

## 4.4 风力发电系统的等效检验

为研究广义综合负荷模型对含风力发电的配电网综合负荷特性的描述能力，有必要首先验证本章提出的用异步电机来等效描述风力发电系统的可行性，因此可用广义综合负荷模型对独立的风力发电系统进行建模研究。对图 4.1 所示的仿真系统，通过故障扰动获取风力发电系统的出口电压、有功功率和无功功率（采用电动机惯例），以此作为总体测辨建模所需的仿真数据。模型响应拟合曲线如图 4.6 所示，模型辨识参数如表 4.3 所示。

为反映模型响应曲线对样本实测曲线拟合的优劣，定义如式（4.8）的相对拟合误差，其大小即可直观定量地反映拟合的效果。

$$E_r = \frac{\sum_{k=1}^N \sqrt{(P_{Sk} - P_{Ik})^2 + (Q_{Sk} - Q_{Ik})^2}}{N} \quad (4.8)$$

式中  $N$  为仿真数据记录长度； $k$  为采样记录点； $P_{Sk}$  和  $Q_{Sk}$  分别为系统实测有功和无功； $P_{Ik}$  和  $Q_{Ik}$  分别为与  $P_{Sk}$  和  $Q_{Sk}$  对应的模型响应有功和无功。

表 4.3 独立风力发电系统拟合参数

参数	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$H$	$A$	$B$	$K_m'$	$E_r$
仿真值	0.0048	0.1248	6.77	0.0044	0.1791	5.04	/	/	1.000	/
辨识值	0.0100	0.1893	5.81	0.0025	0.1900	4.75	0.048	0	0.992	0.0008

同时，另外两个非独立辨识参数  $s_0 = -0.022$ ,  $T_0 = -0.429$ ，说明异步电机工作在发电机状态，这与风力发电系统采用异步发电机是一致的。

上述辨识结果表明，异步电机模型能很好的拟合风力发电系统的动态特性，不同之处在于，转差率  $s_0$  和机械负载率  $T_0$  在以电动机惯例的情况下为负值，说明异步机运行在发电机状态。所以接在配网侧的风力发电机可以看作功率消耗为负

的广义上的感应电动机负荷。以上分析充分表明，含风力发电的配电网综合负荷可采用异步电机并联静态负荷的广义综合模型结构来描述。

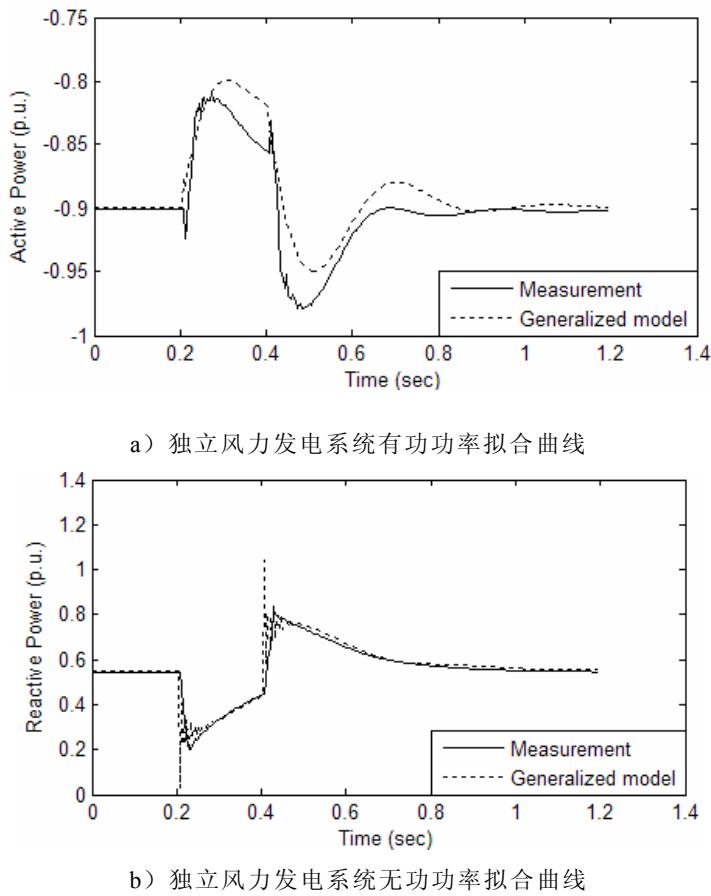


图 4.6 独立风力发电系统拟合曲线

## 4.5 广义综合负荷模型适应性检验

对于含风力发电的配电网综合负荷而言，当风力发电看作一个功率消耗为负的动态负荷时，可以将其与感应电动机负荷统一称为等效动态负荷，用异步电机来等效描述。但根据 4.3.2 的分析可知，在采用异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型进行参数辨识的过程中，动静比例  $K_m'$  的取值范围必须扩大到任意实数范围，其大小取决于风力发电占整个负荷的比例和负荷中感应电动机负荷和静态负荷的比例。

下面通过 3 种不同风力发电出力和负荷水平的总体测辨建模研究，来分析  $K_m'$  的取值大小变化和进行异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型适应性检验。

### 4.5.1 仿真实验与建模结果

在电压扰动  $\Delta V\% = -20\%$  的条件下，对表 4.4 所列的 3 种负荷水平组合按图 4.1 所示仿真系统进行仿真实验以获取仿真数据样本，用第 4.3 节所提出的模型进行辨识建模。辨识结果简述如下。

表 4.4 仿真实验的 3 种负荷组合 (MW)

参数	Case 1	Case 2	Case 3
$P_{WG1}$	6	12	9
$P_{WG2}$	3	6	9
$P_{motor1}$	9	5	2
$P_{motor2}$	3	2	2
$P_{motor3}$	2	1	1
$P_{motor4}$	5	2	3
$P_{static1}$	0	2	0
$P_{static2}$	3	3	2
$P_{static3}$	5	4	3
$P_{static4}$	2	3	1
$P_{generator}$	9	18	18
$P_{motor}$	19	10	8
$P_{static}$	10	12	6
$P_{dynamic}$	10	-8	-10
$P_0$	20	4	-4

#### 4.5.1.1 第 1 种负荷水平: $P_{generator} < P_{motor}$

配电网的等效动态负荷和静态负荷都由外部系统供给, 异步电机运行在电动机状态,  $K_m'$  的理论值为 0.5, 曲线拟合效果如图 4.7 所示, 辨识所得的模型参数如表 4.5 第 4 行所列。

#### 4.5.1.2 第 2 种负荷水平: $P_{motor} \leq P_{generator} < P_{motor} + P_{static}$

风力发电出力能完全满足感应电动机动态负荷吸收的功率, 但不能完全满足总的负荷吸收的功率, 异步电机工作在发电机状态,  $K_m'$  的理论值为 -2, 曲线拟合效果如图 4.8 所示, 辨识所得的模型参数如表 4.5 第 9 行所列。

#### 4.5.1.3 第 3 种负荷水平: $P_{generator} \geq P_{motor} + P_{static}$

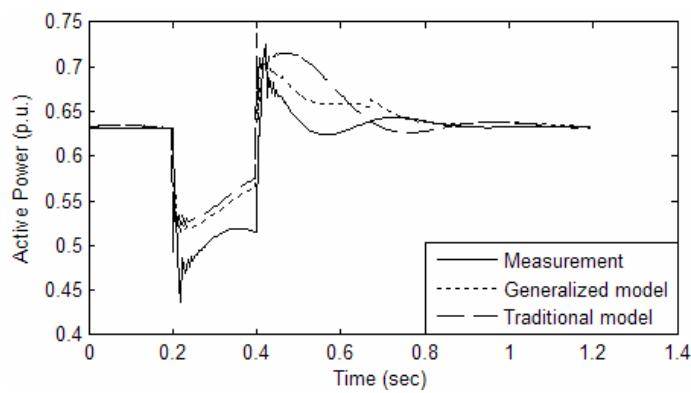
风力发电出力能完全满足总的负荷吸收的功率, 异步电机工作在发电机状态,  $K_m'$  的理论值为 2.5, 曲线拟合效果如图 4.9 所示, 辨识所得的模型参数如表 4.5 第 14 行所列。

### 4.5.2 模型适应性检验

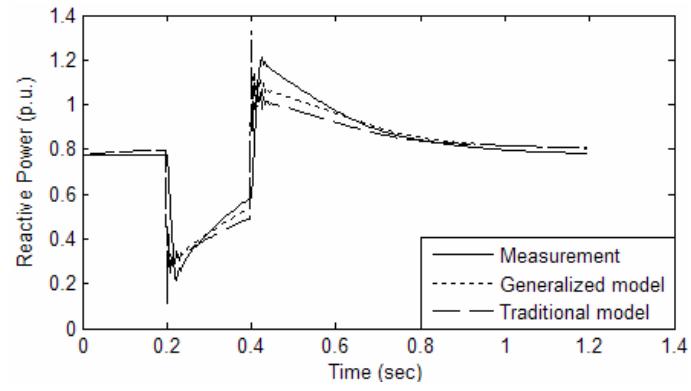
基于上述建模结果, 现就本章所提出的“任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型”的描述能力、泛化能力、参数稳定性、模型实用性等问题简要讨论如下。

表 4.5 广义综合负荷模型参数辨识结果

类型	电压降	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$H$	$A$	$B$	$K_m'$	$T_0$	$s_0$	$E_r$
1	10%	0.0011	0.4998	5.8000	0.0298	0.3989	0.7902	0.9500	2.7e-3	0.5536	0.3029	0.0102	0.001361
	15%	0.0012	0.4982	5.7023	0.0284	0.3757	0.7996	1.0000	0	0.5928	0.3243	0.0105	0.002005
	20%	0.0013	0.4949	5.8000	0.0315	0.3990	0.7500	1.0000	0	0.6195	0.3411	0.0123	0.002613
	25%	0.0012	0.4963	5.8000	0.0286	0.3800	0.7500	1.0000	0	0.6726	0.3696	0.0123	0.003212
	30%	0.0014	0.4800	5.8000	0.0342	0.3800	0.6704	1.0000	0	0.7000	0.4229	0.0171	0.004050
2	10%	0.0278	0.4987	5.8000	0.0272	0.3990	0.8298	0.1984	5.2e-5	-2.0851	-0.3119	-0.0099	0.001717
	15%	0.0285	0.4971	5.9768	0.0289	0.3905	0.8910	0.0350	0	-2.4089	-0.3885	-0.0111	0.002643
	20%	0.0293	0.4800	5.4608	0.0268	0.3800	0.7875	0.0451	0	-2.3100	-0.3728	-0.0105	0.003412
	25%	0.0275	0.4953	5.8000	0.0353	0.3985	0.7500	0.0500	0	-2.5371	-0.4104	-0.0156	0.004130
	30%	0.0297	0.3750	5.9589	0.0259	0.3800	0.8979	0.0475	0	-2.6635	-0.4737	-0.0137	0.004837
3	10%	0.0170	0.4961	5.9687	0.0268	0.2567	0.6956	0.7160	3.6e-3	2.7359	-0.4150	-0.0115	0.001784
	15%	0.0148	0.4839	5.9666	0.0279	0.2697	0.7500	0.5089	0	2.8524	-0.4693	-0.0141	0.002534
	20%	0.0165	0.4800	5.9362	0.0288	0.2772	0.7125	0.5317	0	2.9022	-0.4779	-0.0151	0.003250
	25%	0.0140	0.4800	5.8000	0.0277	0.2502	0.7860	0.5536	0	3.2655	-0.5185	-0.0148	0.004090
	30%	0.0181	0.4800	5.8000	0.0243	0.2214	0.7500	0.5854	0	3.4200	-0.5317	-0.0134	0.004764

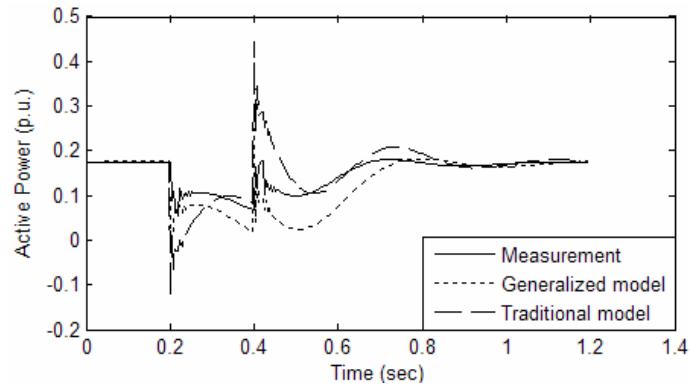


a) 有功功率拟合曲线

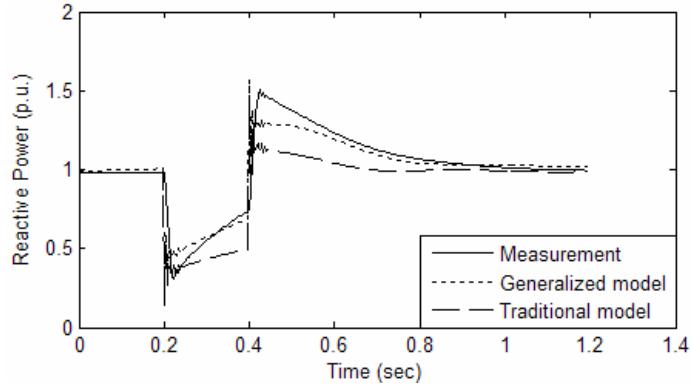


b) 无功功率拟合曲线

图 4.7  $K_m'$ 的理论值为 0.5 时曲线拟合效果

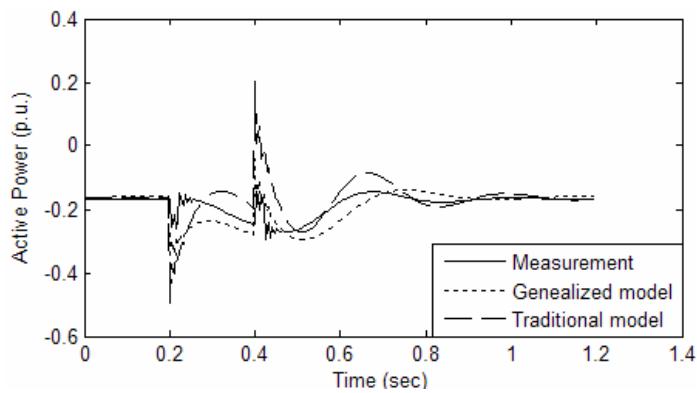


a) 有功功率拟合曲线

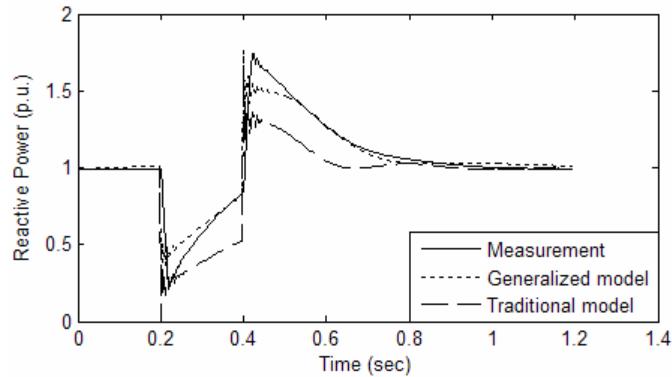


b) 无功功率拟合曲线

图 4.8  $K_m'$ 的理论值为 -2 时曲线拟合效果



a) 有功功率拟合曲线



b) 无功功率拟合曲线

图 4.9  $K_m'$ 的理论值为 2.5 时曲线拟合效果

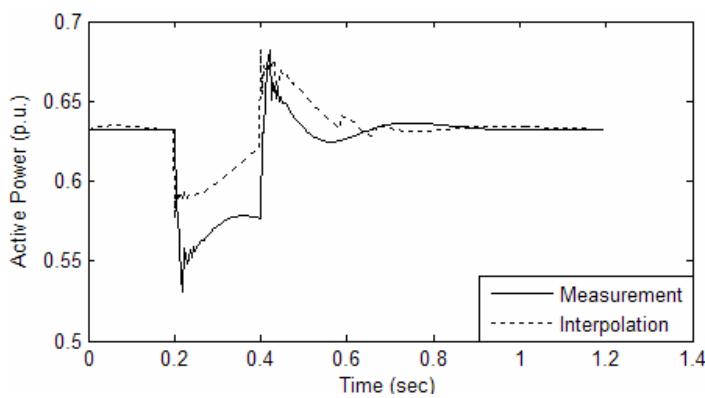
#### 4.5.2.1 模型的自描述能力

图 4.7~4.9 直观拟合效果与表 4.5 中的相对拟合误差数据表明，该模型对数据样本的逼近效果较传统综合负荷模型有了一定的提高，尤其在动态过程变化趋势方面，广义综合负荷模型明显比传统综合负荷模型更符合实际动态特性变化趋势，具有较强的自描述能力。

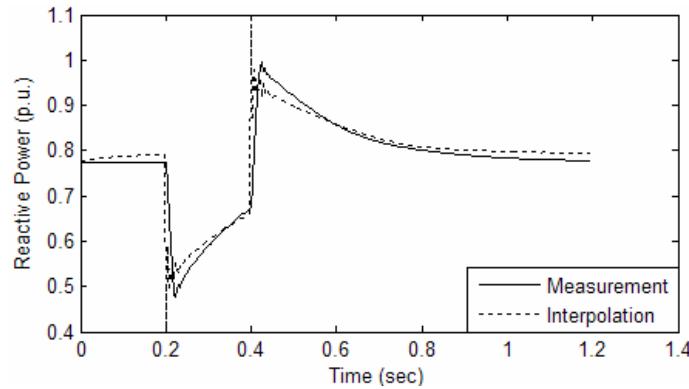
#### 4.5.2.2 模型的泛化能力

针对 3 种典型的运行方式，在设置故障仿真时使图 4.1 所示的仿真系统中母线 B2 的电压分别下降 10%、15%、20%、25%、30% 进行电力系统暂态仿真，获取模型辨识所需的负荷特性数据样本。分别作对样本 20% 下辨识所得的参数模型在样本 10% 之激励作用下的模型响应曲线（内插能力验证）和对样本 20% 下辨识所得的参数样本在 30% 之激励作用下的模型响应曲线（外推能力验证）。图 4.10 和图 4.11 分别给出了第 1 种负荷水平下的内插和外推能力验证。

从曲线拟合效果来看，虽然内插外推检验样本与建模样本之电压激励幅度相差悬殊， $|\Delta V_{10\%}|=50\%|\Delta V_{20\%}|$ ， $|\Delta V_{30\%}|=150\%|\Delta V_{20\%}|$ ，但该模型对内插、外推样本的实测响应均能很好地拟合。同时，表 4.6 列出了不同情况下的内插外推响应相对拟合误差数据，充分表明该综合负荷模型有较好的泛化能力。

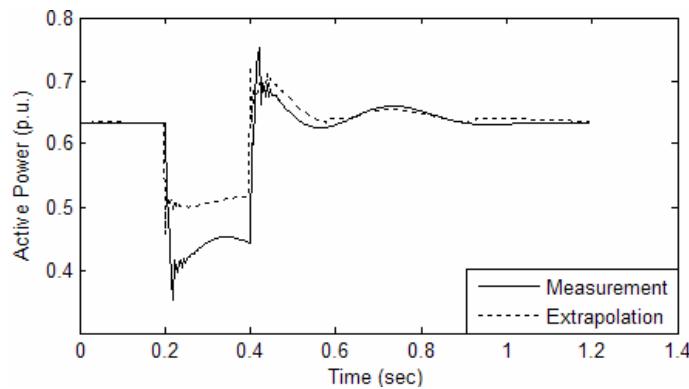


a) 第 1 种负荷水平下有功内插能力验证

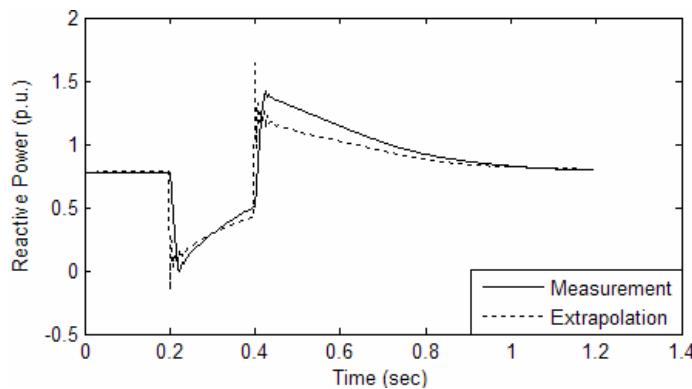


b) 第 1 种负荷水平下无功内插能力验证

图 4.10 第 1 种负荷水平下内插能力验证



a) 第 1 种负荷水平下有功外推能力验证



b) 第 1 种负荷水平下无功外推能力验证

图 4.11 第 1 种负荷水平下外推能力验证

表 4.6 内插、外推验证相对拟合误差

负荷水平	误差			
	内插 10%	内插 15%	外推 25%	外推 30%
1	0.001424	0.002007	0.003271	0.004012
2	0.001899	0.002635	0.004243	0.005199
3	0.001830	0.002609	0.004267	0.005262

#### 4.5.2.3 模型的参数稳定性

模型对同类负荷样本辨识所得的参数的分散度在一定程度上能有效的检验模型的参数稳定性，即“模型可辨识性”。只有参数稳定性好的模型才具有真正的实用化意义。表 4.5 列出了所有 3 种典型运行方式在不同扰动下辨识所得参数和相对拟合误差，从表中可知，在同样的负荷水平结构下，5 种不同程度的扰动下辨识所得的参数基本上是一致的，仅在 10% 扰动下的参数稍有偏差，因为当扰动不够的情况下，综合负荷的特性没有得到足够的激发，因此参数还不够稳定，但是当扰动达到一定的程度后，参数趋于稳定。由此可知，本章提出的综合负荷模型有较好的参数稳定性。

#### 4.5.2.4 模型的实用性

为检验任意动静比例的广义综合负荷模型对现场实测数据样本的描述能力，取某 220kV 变电站 110kV 母线的实测数据样本进行总体测辨建模，验证模型实用能力。曲线拟合效果如图 4.12 所示，辨识所得的模型参数如表 4.7 所示。

从图 4.12 的曲线拟合效果来看，本章提出的任意动静比例的广义综合负荷模型对变电站配网侧综合负荷的动态特性具有较好的描述能力，能准确地拟合综合负荷在暂态过程中的变化趋势。

表 4.7 模型的实用性检验辨识参数

参数	16:43:35 Aug. 21, 2003	17:58:39 Oct. 12, 2003	14:30:24 Dec. 25, 2004	11:56:58 Dec. 28, 2004
$R_s$	0.0279	0.0383	0.0268	0.0289
$X_s$	0.4975	0.2906	0.4987	0.4799
$X_m$	1.0999	0.8065	1.4502	1.1804
$R_r$	0.0339	0.0668	0.0659	0.0763
$X_r$	0.0679	0.3960	0.3836	0.2096
$H$	0.5075	0.7500	0.5307	0.5615
$A$	0.0004	0.0081	1.0000	1.0000
$B$	0.0011	0.0032	0.0000	0.0000
$K_m'$	0.5751	0.6322	0.3030	0.2965
$s_0$	0.0089	0.0064	0.0065	0.0051
$E_r$	0.000715	0.001994	0.001540	0.001149

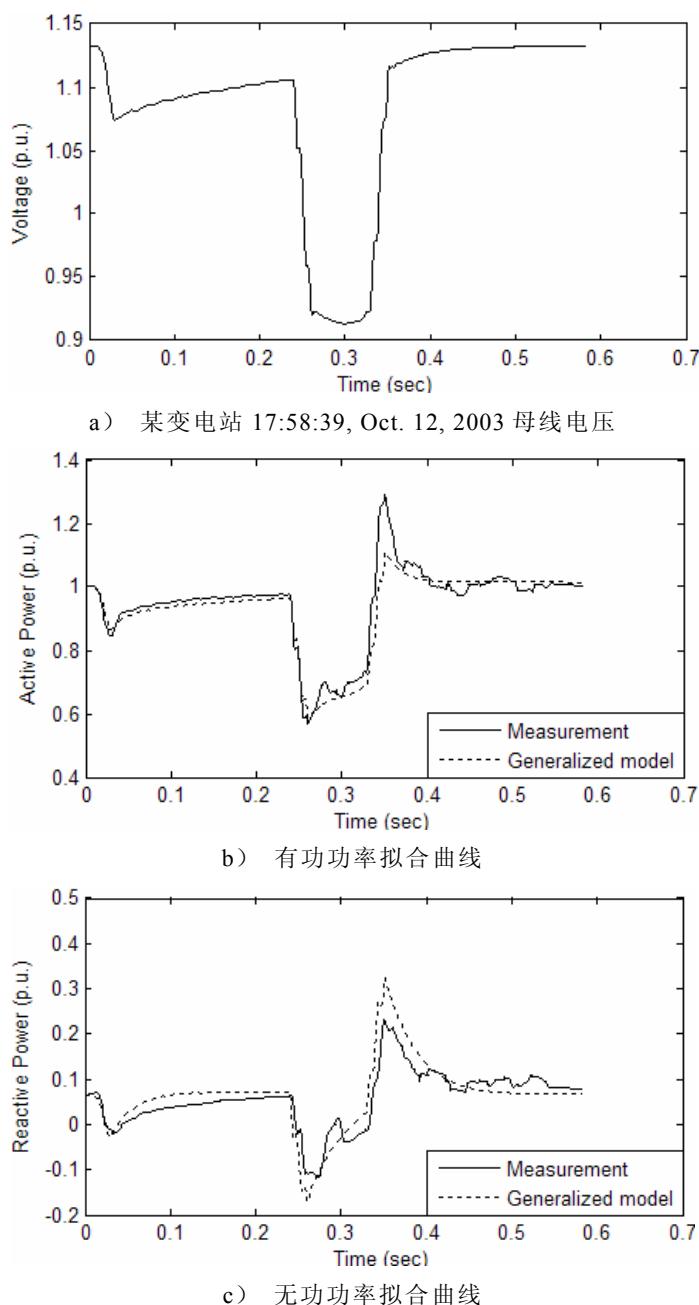


图 4.12 模型的实用性检验

同时，从表 4.7 的辨识参数来看，所研究的四组数据分别取自同一变电站同一母线的三个时间段：夏季（Aug. 21, 2003）、秋季（Oct. 12, 2003）和冬季（Dec. 25, 2004 和 Dec. 28, 2004）。通过对这四组数据的辨识建模，可以明显的看出，不同时间段，辨识所得的模型参数是不同的；而同一时间段（冬季），辨识所得的参数总体上是一致的。这充分说明，即使是同一变电站，在不同的时间段所表征出来的综合负荷特性是不同的，如果一个变电站采用一套固定的综合负荷模型参数，进行电力系统暂态仿真，显然对仿真结果会产生较大的影响，这也正好说明基于总体测辨办法的负荷建模工作研究更加符合系统的实际需要，可通过采集变电站不同时间段的不同扰动数据，通过辨识建模比较分析，针对每个时间段推荐一套参数，

用于电力系统仿真计算，这样更能体现实际电网的动态特性，也较统计综合法等其它方法更容易实现，具有较高的实用价值。

#### 4.5.3 讨论

以上数据分析与拟合效果表明，当风力发电机组作为大型的独立风电场接入系统时，采用异步发电机的模型能很好地拟合其动态特性；当其作为小型的风力发电机组接入配电网时，采用任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型结构能很好地拟合其动态特性，且该模型具有较好的自描述能力和泛化能力，参数稳定性较好，整体适应度较高。通过  $s_0$ 、 $T_0$  和  $K_m'$  的取值范围，即可判断异步电机的运行状态和区分风力发电所占系统容量的比例：当辨识出的  $s_0 > 0$ 、 $T_0 > 0$  且  $K_m'$  值在  $[0,1]$  之间，说明风力发电的出力不足以供给感应电动机动态负荷，此时配电网综合负荷中异步电机运行在电动机状态；当辨识出的  $s_0 < 0$ 、 $T_0 < 0$  且  $K_m' \leq 0$ ，说明风力发电出力足以供给感应电动机动态负荷但不足以供给总负荷，此时配电网综合负荷中异步电机运行在发电机状态；当辨识出的  $s_0 < 0$ 、 $T_0 < 0$  但  $K_m' > 1$ ，说明风力发电出力足以供给总负荷并可向系统输送功率，此时配电网综合负荷中异步电机运行在发电机状态，对于外部大系统而言，此时含风力发电的配电网作为电源向系统输送功率。

### 4.6 本章小结

本章基于总体测辨负荷建模方法，利用 MATLAB 仿真工具，构建了含风力发电的配电网仿真系统，通过电力系统暂态仿真，获取了模型参数辨识所需的数据样本；在分析风力发电系统运行特性的基础上，提出当把风力发电看作一个功率消耗为负的广义动态负荷时，可以用异步发电机来等效描述，并对独立风力发电系统的等效描述进行了验证；基于此，提出异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型结构来等效描述含风力发电的配电网综合负荷特性，但为准确反映风力发电出力对配电网综合负荷特性的影响，模型中的动态负荷所占比例（动静比例）的取值范围必须扩大到任意实数；通过 3 种典型风力发电出力和负荷水平的运行方式，检验了本章提出的任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型的描述能力、泛化能力、参数稳定性、实用性等综合适应性能力。

# 第 5 章 风力发电对配电网综合负荷特性的影响

## 5.1 引言

分布式电源大多接入电网 10kV 及以下配网侧，而作为电网规划设计与运行调度控制之基本决策依据的电力系统仿真计算中，负荷模型是对主网变电站母线“综合负荷”特性的等值描述，这种综合负荷成份自然也包括了分布式电源。配电网接入分布式电源后，综合负荷特性的复杂性和影响因素大大增加。这些影响因素既包括分布式电源接入的不同容量比例、不同地理位置、不同物理特性和不同接入方式，又包括配电网本身的负荷构成与负荷水平。应当充分研究这些因素的影响规律及其相互作用机理，把握关键影响因素；深入研究这些影响因素综合作用下，综合负荷特性所表现出的特点和关键特征，掌握其统计规律性。在此基础上，提出具有较强的描述能力、适应性强的配电网广义综合负荷模型结构，建立能够描述不同影响因素组合条件下的广义综合负荷模型。

对于含风力发电（Wind Power Generation, WG）的配电网综合负荷而言，WG 接入的容量比例、接入的地理位置、接入的方式（集中或分散）等都是影响其综合负荷特性的重要因素。应当充分研究这些因素的影响规律及其相互作用机理；深入研究这些影响因素作用下，综合负荷特性所表现出的特点和关键特征，掌握其统计规律性；在此基础上，提出适应性好的配电网广义综合负荷模型来描述含 WG 的配电网综合负荷特性。

基于此，本章在构建典型配电系统的基础上，研究不同容量比例和不同地理位置的集中和分散 WG 接入对配电网综合负荷特性的影响规律，并进行统计规律性分析；在此基础上，针对上述综合负荷特性影响因素，从模型的拟合效果、平均拟合误差和辨识参数 3 个方面，对第 4 章提出的广义综合负荷模型进行检验；同时，通过比较分析三种典型机理负荷模型的综合描述能力，提出较适合描述含风力发电的配电网综合负荷特性的广义综合负荷模型。

## 5.2 配电网仿真系统

### 5.2.1 典型配电网结构与参数

采用 IEEE 推荐的 14 节点典型配电网，该配电网具有三条支路 A、B、C，总负荷为  $28.7+j7.75$  (MVA)，其结构示意图如图 5.1 所示，节点功率和线路参数分别如表 5.1 和表 5.2 所示。

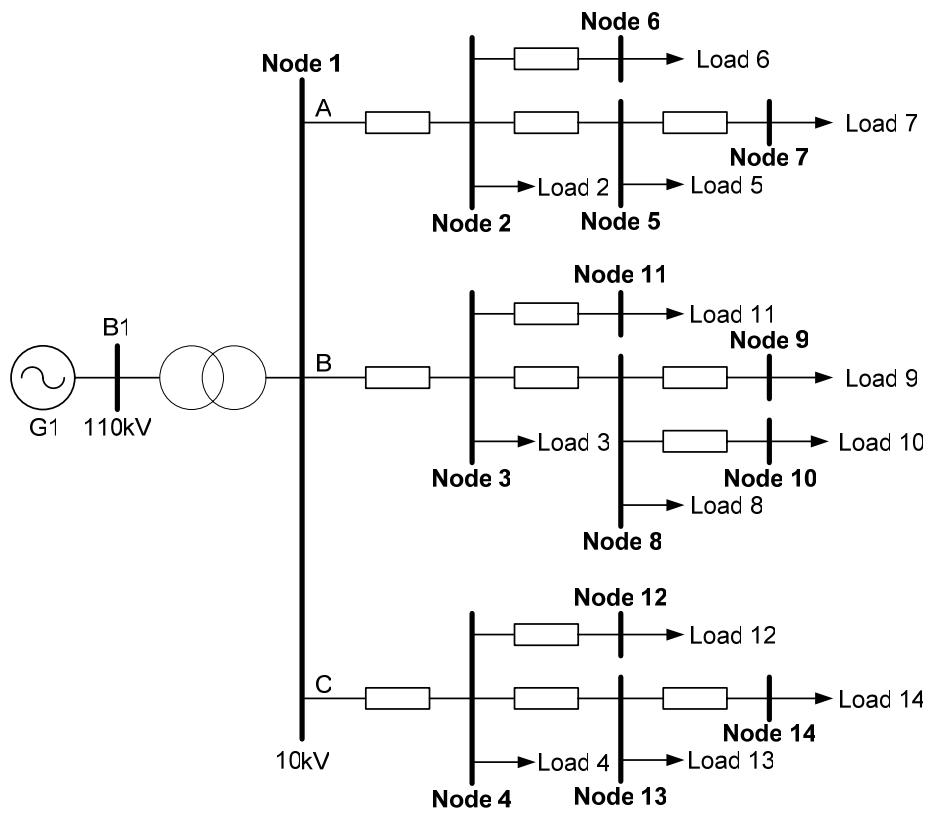


图 5.1 IEEE 14 节点配电网结构示意图

表 5.1 IEEE 14 节点配电网节点功率

节点 编号	有功 $P$ (MW)	无功 $Q$ (MVAR)	补偿 $C$ (MVAR)	节点 编号	有功 $P$ (MW)	无功 $Q$ (MVAR)	补偿 $C$ (MVAR)
1	0	0	0	8	5.0	3.0	1.2
2	2.0	1.6	0	9	4.5	2.0	3.7
3	4.0	2.7	0	10	0.6	0.1	0.6
4	1.0	0.9	0	11	1.0	0.9	1.8
5	2.0	0.8	0.25	12	1.0	0.7	0
6	3.0	1.5	0.2	13	1.0	0.9	0
7	1.5	1.2	0	14	2.1	1.0	1.8

表 5.2 IEEE 14 节点配电网线路参数

线路 编号	起始 节点	末端 节点	$R$ (pu)	$X$ (pu)	线路 编号	起始 节点	末端 节点	$R$ (pu)	$X$ (pu)
1	1	2	0.075	0.1	9	8	10	0.11	0.11
2	1	3	0.11	0.11	10	3	11	0.11	0.11
3	1	4	0.11	0.11	11	4	12	0.09	0.12
4	2	5	0.09	0.18	12	4	13	0.08	0.11
5	2	6	0.08	0.11	13	13	14	0.04	0.04
6	5	7	0.04	0.04	14	6	10	0.04	0.04
7	3	8	0.08	0.11	15	11	12	0.04	0.04
8	8	9	0.08	0.11	16	7	14	0.09	0.12

## 5.2.2 各元件模型

### 5.2.2.1 负荷模型

配电网各节点功率采用感应电动机动态负荷并联 ZIP 静态负荷的综合负荷来等效描述，假设支路 A 为商业负荷，感应电动机负荷占 60%，静态负荷占 40%，主要参数对应表 4.1 的 Load II；支路 B 为工业负荷，感应电动机负荷占 70%，静态负荷占 30%，主要参数对应表 4.1 的 Load I；支路 C 为居民生活负荷，感应电动机负荷占 50%，静态负荷占 50%，主要参数对应表 4.1 的 Load III。

### 5.2.2.2 风力发电机组模型

为研究不同影响因素下风力发电对配电网综合负荷特性的影响和几种典型机理负荷模型对含风力发电的配电网综合负荷动特性描述能力的比较，将风力发电接入如图 5.1 的仿真系统进行电力系统暂态仿真，获取相关数据样本进行总体测辨建模比较分析。本章采用与 4.2.3 节相同的定桨距风机+鼠笼式异步发电机的风力发电系统，假设在所研究的暂态过程中，风速保持恒定。

## 5.3 不同容量比例的风力发电接入配电网

基于 MATLAB 搭建如图 5.1 所示的配电网络仿真系统，为充分激发负荷特性的本质，达到真实反映含风力发电的配电网综合负荷特性的目的，扰动激励在可接受的范围内越大越好。基于此，本节假设在 110kV 母线 B1 处发生三相短路故障（持续时间 0.2s 恢复），采用集中与分散两种风力发电接入方式，进行电力系统暂态仿真，获取不同容量比例的风力发电接入下负荷母线 B1 的电压、有功及无功的动态特性，进行统计规律性分析和总体测辨建模。

### 5.3.1 集中接入对配电网综合负荷特性的影响

分别设置接入的风力发电容量为总负荷的 30%、40%、50%、60%、70%、80%，将风力发电接到 Node 5，进行电力系统暂态仿真，研究不同容量比例的集中风力发电对配电网综合负荷静态特性和动态特性的影响。

#### 5.3.1.1 综合负荷母线电压的变化规律

稳态情况下，当集中接入的风力发电容量较小时，风力发电不足以供给所接支路 A 上全部负荷，对于系统而言风力发电相当于接入配电网末端的电源点，起到了抬高电压的作用；随着风力发电容量的增加，网络损耗增加，负荷母线 B1 初始稳态电压随之下降，当风机容量为 60%~80% 时，风机除供给所在支路全部负荷外，还通过节点 2 向其他支路传输功率，致使支路 A 无功需求增加，网络损耗增加，电压进一步下降，已低于未接风力发电时负荷母线初始稳态电压，对系统电

压没有支撑作用，具体数值见表 5.3 所示。

暂态过程中，随着风力发电接入容量的增加，系统暂态电压降落幅度减少，但故障切除后系统电压波动明显，电压恢复稳定时间增加。变化规律如图 5.2 所示，为清晰观察暂态过程电压变化幅度，基准电压取为其自身的初始稳态值。

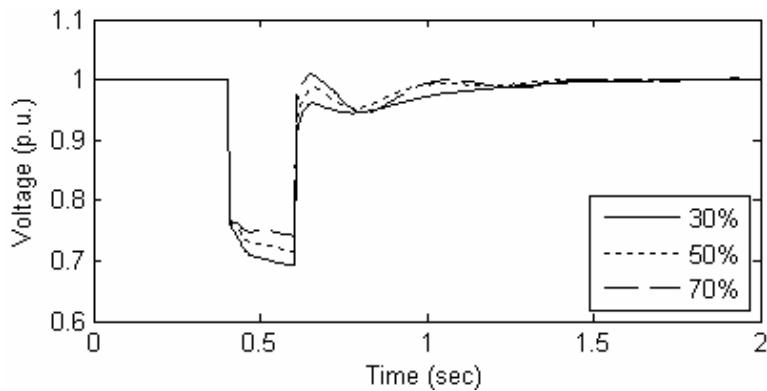


图 5.2 不同容量比例的集中风力发电接入时负荷母线电压变化规律

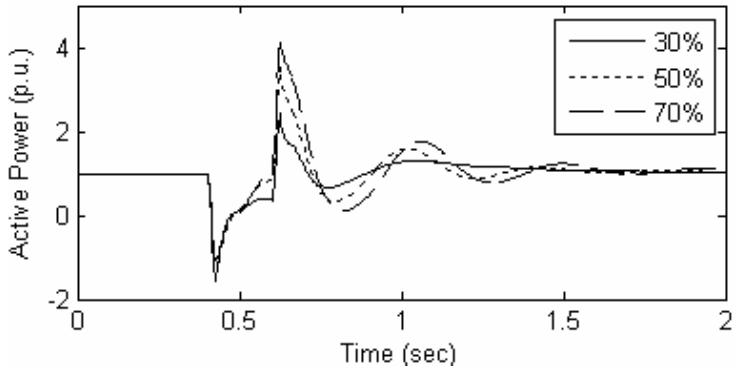
### 5.3.1.2 配电网吸收的有功和无功功率的变化规律

稳态情况下，随着集中风力发电机接入容量的增加，配电网传输有功功率相应的下降，传输无功功率增加，系统功率因数下降。风力发电容量上升 3MW，配电网平均输送有功减少 3MW，平均输送无功增加 1Mvar，相关数值见表 5.3 所示。

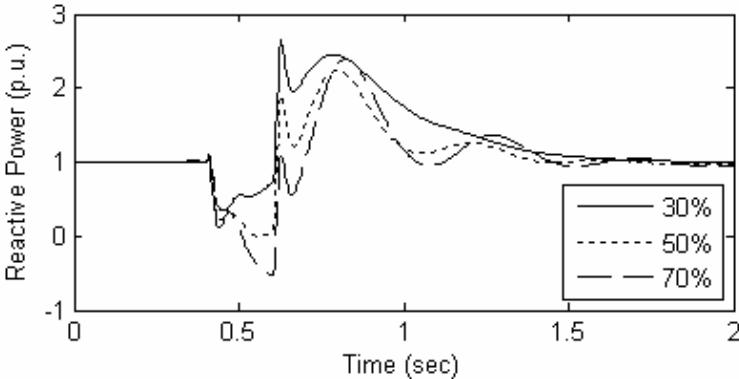
表 5.3 不同容量比例的集中风力发电接入影响规律

风机接 入比例	风机 出力	负荷母 线电压	从系统吸 收有功	从系统吸 收无功	暂态电压 变化量	网络 损耗	功率 因素
30%	8.97	1.1059	23.356	11.088	0.0763	3.982	0.9034
40%	11.96	1.1010	20.537	12.687	0.0675	4.317	0.8508
50%	14.95	1.0976	17.900	13.822	0.0680	4.779	0.7915
60%	17.94	1.0933	15.374	15.187	0.0637	5.373	0.7114
70%	20.93	1.0859	12.925	17.331	0.0563	6.196	0.5978
80%	23.92	1.0800	10.633	19.013	0.0504	7.123	0.4881

暂态过程中，随着集中风力发电机接入容量的增加，有功恢复加快，故障切除后有功波动幅度增加，恢复时间变长；无功波动幅度增加，且随故障时间增加而增大，故障结束后恢复时间增加。风机接入容量小于 40% 情况下系统恢复时间约为 1S 左右，接入容量大于 40% 的情况下系统恢复时间约为 2S 左右。变化规律如图 5.3 所示，为清晰观察暂态过程功率变化幅度，基准容量取为其自身的初始稳态值。



a) 有功功率变化规律



b) 无功功率变化规律

图 5.3 不同容量比例的集中风力发电接入时配电网吸收功率变化规律

综上所述，随着集中风力发电接入容量的增加，稳态情况下，当接入容量比例较小时（小于 30%），配电网综合负荷母线电压较未接风力发电有所升高，但当接入比例进一步增大（大于 30%）后，由于网络损耗的增加，稳态电压有所下降，要低于未接风力发电时的值；从系统吸收的有功功率随着接入风力发电容量的逐步增大而减少，但吸收的无功功率逐步增加，网络损耗随之增大，因此功率因素随之降低。暂态过程中，综合负荷母线电压随着接入容量的增大而降落幅度减小，但故障切除后系统电压恢复稳定时间增加；故障期间有功变化幅度增加，故障切除后波动增大，且恢复时间变长；故障期间无功变化明显且迅速下降，故障切除后恢复稳定时间也明显增加。

### 5.3.2 分散接入对配电网综合负荷特性的影响

分别设置风力发电容量为总负荷容量的 30%、40%、50%、60%、70%、80%，将风力发电平均接到 Node 5、Node 8 和 Node 13，进行电力系统暂态仿真，研究不同容量比例的分散风力发电对配电网综合负荷静态特性和动态特性的影响。

#### 5.3.2.1 综合负荷母线电压的变化规律

稳态情况下，分散风力发电的接入等效于在负荷端接入电源点，直接降低系统网络损耗，抬高系统电压，在 80% 容量下各处风机均不能完全供给相应支路负

荷，不存在向其他支路输送功率情况，所以风机接入容量为系统负荷 30%-80%下，系统电压均高于未加风机下系统电压，具体数值详见表 5.4 所示。

暂态过程中，随着风力发电接入容量的增加，故障期间电压下降幅度减少，但故障切除后电压波动增加，恢复时间稍有增加，变化规律与集中风力发电接入基本一致。变化规律如图 5.4 所示，为清晰观察暂态过程电压变化幅度，基准电压取为其自身的初始稳态值。

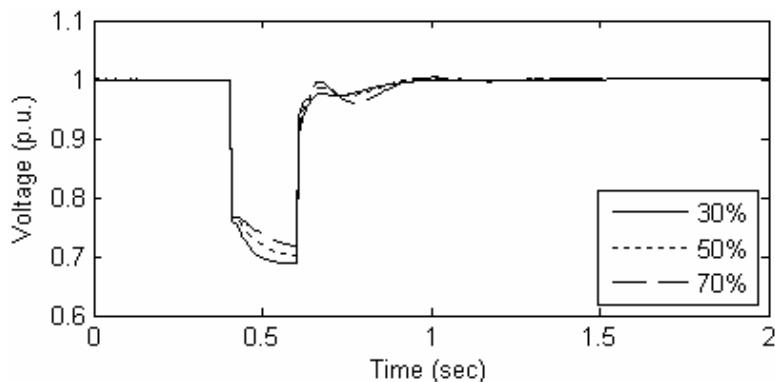


图 5.4 不同容量比例的分散风力发电接入时负荷母线电压变化规律

### 5.3.2.2 配电网吸收的有功和无功功率的变化规律

稳态情况下，随着分散风力发电机接入容量的增加，使三条支路从系统吸收的有功功率同时减少，但从系统吸收无功功率随之增加，导致配电网综合功率因数随之下降，具体数值详见表 5.4 所示。

表 5.4 不同容量比例的分散风力发电接入影响规律

风机接 入比例	风机 出力	负荷母 线电压	从系统吸 收有功	从系统吸 收无功	暂态电压 变化量	网络 损耗	功率 因素
30%	8.97	1.1192	23.586	7.380	0.0896	3.171	0.9544
40%	11.96	1.1183	20.631	7.908	0.0887	3.169	0.9338
50%	14.95	1.1182	17.228	8.234	0.0886	2.572	0.9022
60%	17.94	1.1166	14.316	8.887	0.087	2.636	0.8496
70%	20.93	1.1149	11.492	9.548	0.0853	2.779	0.7692
80%	23.92	1.1138	8.277	10.037	0.0842	2.396	0.6362

暂态过程中，随着分散风力发电机接入容量的增加，有功波动幅度随之增大，在故障切除之后，有功恢复稳定的时间也越长；无功波动变化明显，故障切除后恢复时间也增加，这是由于风机在故障期间对系统无功的需求的加剧，导致系统暂态稳定性也相应下降。变化规律与集中风力发电接入基本一致，变化规律如图 5.5 所示，为清晰观察暂态过程功率变化幅度，基准容量取为其自身的初始稳态值。

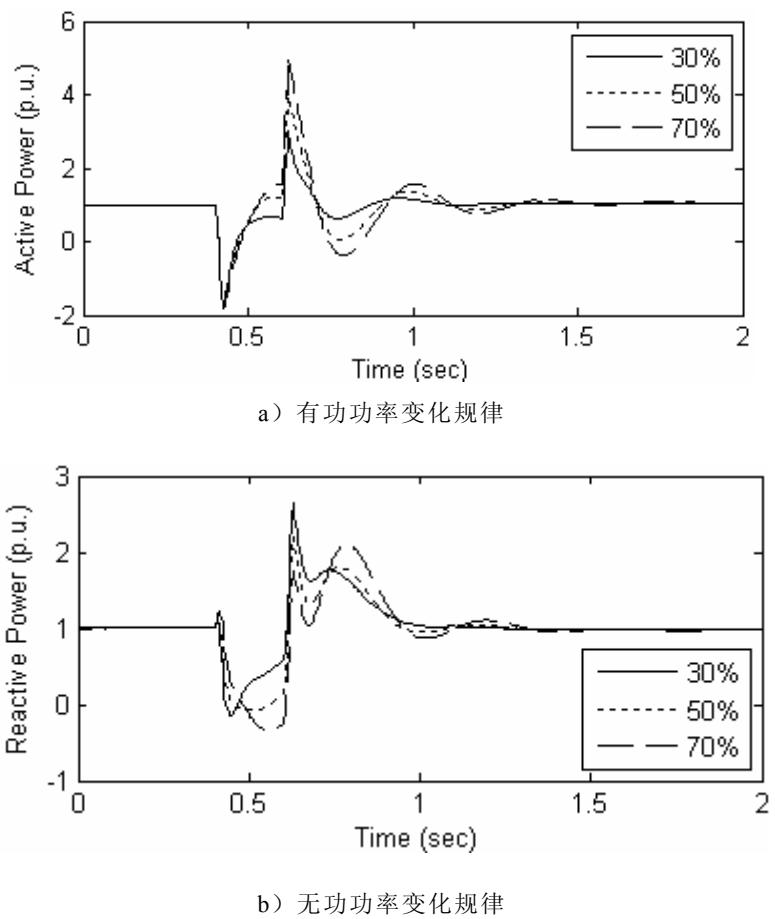


图 5.5 不同容量比例的分散风力发电接入时配电网吸收功率变化规律

综上所述，随着分散风力发电接入容量的增加，稳态情况下，配电网综合负荷母线电压小幅降低，且变化不明显，但均较未接入风力发电时要高，这主要是由系统网络损耗并未增加而造成；从系统吸收的有功功率随着接入风力发电容量的逐步增大而减少，但吸收的无功功率逐步增加，因此功率因素随之降低。暂态过程中，负荷母线电压故障期间下降幅度减少，故障切除后波动明显且恢复时间增加；有功功率在故障期间下降幅度及故障切除后波动均增大，且故障切除后恢复稳定时间增加；故障期间负荷无功缺额迅速增加，造成负荷母线无功在故障期间迅速下降，故障切除后无功波动幅度及恢复稳定时间也明显增加。

### 5.3.3 同一容量比例下集中与分散接入比较

在 5.3.1 节和 5.3.2 节研究的基础上，比较分析同一容量比例下，集中与分散风力发电接入对配电网综合负荷静态特性和动态特性的影响。

#### 5.3.3.1 综合负荷母线电压的变化规律

稳态情况下，根据 5.3.1 节分析可知，30% 比例下集中风力发电等效于系统在负荷末端接入电源，从而抬高系统电压；根据 5.3.2 节分析知，30% 比例下分散风力发电也起到抬高系统电压的作用。从表 5.3 和表 5.4 的比较分析可知，由于集中

风力发电网络损耗大于分散风力发电的网络损耗,30%分散风力发电下综合负荷母线电压略比 30%集中风力发电下电压高 1.2%。当集中风力发电容量为 40%~80% 时, 系统电压下降, 而分散风力发电则一直起抬高系统电压的作用, 系统电压保持在 11kV 左右。

暂态过程中, 分散风力发电接入相比集中接入的电压下降幅度稍大, 但故障切除后电压波动相对较小, 且恢复时间有所减少, 但基本保持一致。

### 5.3.3.2 配电网吸收的有功和无功功率的变化规律

根据上面的分析可知, 当风力发电容量接入比例不大时(小于 30%), 分散风力发电下系统电压略大于集中风力发电下系统电压, 则此时配电网吸收的有功功率略大于集中风力发电时吸收的有功, 且分散风力发电故障期间有功恢复较快, 故障结束后恢复时间较短。随着风力发电容量接入比例的增大(大于 30%), 集中风力发电会从 2 节点向支路 B 和支路 C 输送有功, 迅速加大了网络损耗, 电压下降且略低于未加风机时系统电压; 以此同时, 而分散风力发电仅供给各自支路上负荷, 网络损耗远小于同容量集中风力发电的网络损耗, 由电压升高引起的有功需求增长很小; 因此, 采用分散风力发电时配电网吸收的有功功率将小于采用集中风力发电吸收的有功功率, 且故障期间有功恢复较快, 故障结束后恢复时间较短。

从配电网吸收的无功功率来看, 采用分散风力发电的系统电压大于采用集中风力发电的系统电压, 线路电压降落也小于采用集中风力发电时线路电压降落, 从而网络的无功损耗也小于采用集中风力发电时的网络无功损耗。在风机与负荷无功需求不变情况下, 配电网总的无功需求也小于采用集中发电时系统总的无功需求, 暂态故障期间, 集中风机发电时配电网吸收的无功下降幅度小于分散风力发电, 但故障结束后波动明显剧烈, 且恢复时间增加。

下面以接入容量比例 70%为例, 展示了集中与分散风力发电接入后负荷特性的变化规律, 如图 5.6 所示。

综上所述, 在同一容量比例下, 分散风力发电相比于集中风力发电, 稳态情况下, 配电网综合负荷母线电压要高, 且随着容量比例的增大, 差值也越大; 从系统吸收的有功功率略高, 基本保持一致, 但吸收的无功功率和网络损耗明显要小, 因此功率因素要明显高于集中风力发电。暂态过程中, 电压波动幅度稍大, 有功变化幅度稍有增加, 无功变化幅度明显减少, 故障结束后电压、有功及无功恢复时间均较小, 且随风力发电容量增加趋势越明显。

### 5.3.4 统计规律性总结

通过上面的分析可知, 不论集中还是分散接入方式, WG 对配电网综合负荷特性的影响均随着接入容量比例的增大, 而受影响程度越大。尤其在暂态过程中,

随着接入容量的增加，故障期间有功和无功的变化幅度均明显增加，故障切除后的波动也明显加剧，且恢复稳定的时间越长。

同时，相同容量比例下分散风力发电接入对配电网综合负荷特性影响要明显小于集中风力发电，且随风力发电容量增加趋势越显著。这正好从另外一个方面说明，当风力发电作为分布式电源分散接入配电网时，相比集中式接入电网而言，对电力系统的动态稳定性影响要小，有利于系统的安全稳定运行。因此，风力发电作为一种典型的分布式电源，将在今后的分布式发电和智能电网的发展过程中起到不容忽视的作用。

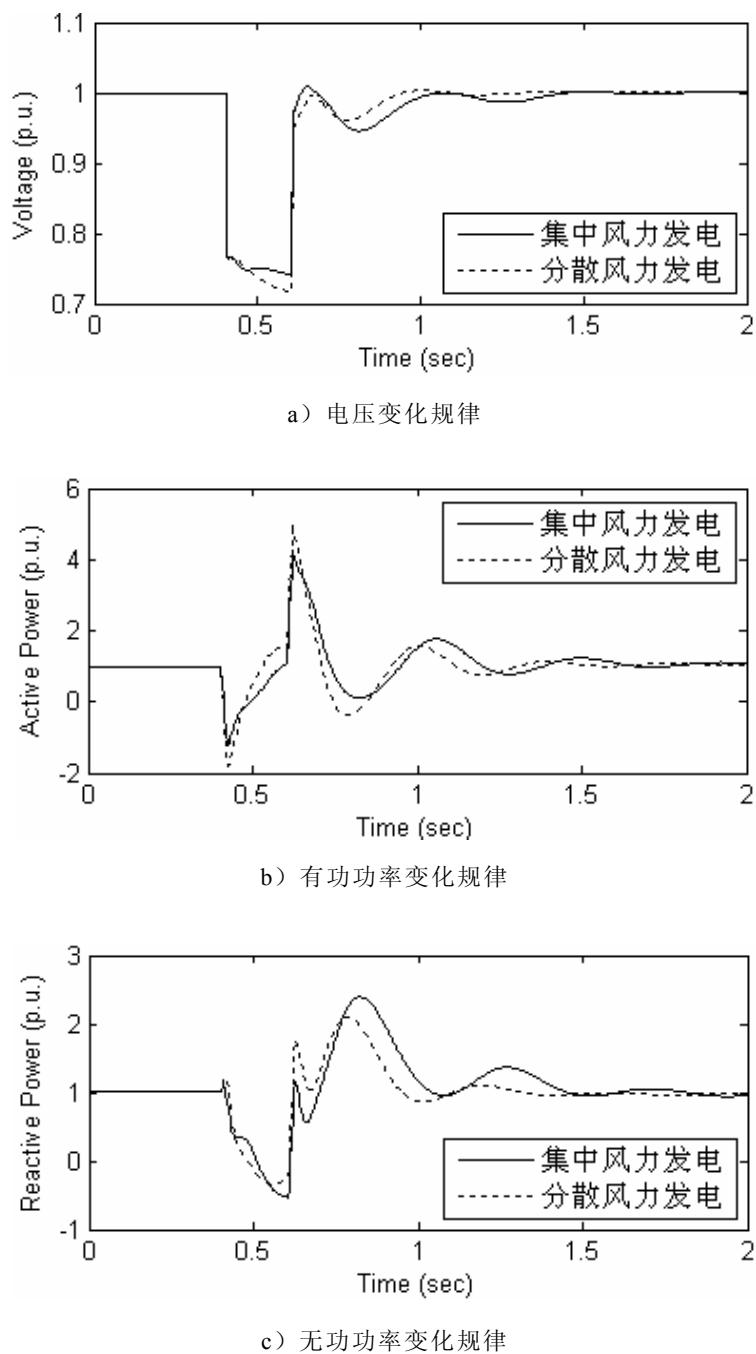


图 5.6 70% 的容量比例下集中与分散风力发电接入对综合负荷特性的影响

## 5.4 不同地理位置的风力发电接入配电网

基于 MATLAB 搭建如图 5.1 所示的配电网仿真系统，为充分激发负荷特性的本质，达到真实反映含风力发电的配电网综合负荷特性的目的，扰动激励在可接受的范围内越大越好。基于此，本节假设在 110kV 母线 B1 处发生三相短路故障（持续时间 0.2s 恢复），风力发电接入容量假定为总负荷的 40%，采用集中与分散两种风力发电接入方式，进行电力系统暂态仿真，获取不同地理位置的风力发电接入下负荷母线 B1 的电压、有功及无功的动态特性，进行统计规律性分析和总体测辨建模。

根据地理位置的不同，将风力发电接入节点进行分类，共分为 3 类：支路首端节点（Node 2、3、4），支路分支节点（Node 5、6、11、12）和支路末端节点（7、9、10、14）。进行不同地理位置风力发电接入对配电网综合负荷特性影响分析时，先分析不同支路相同类型节点，再分析同一支路不同类型节点。

### 5.4.1 集中接入对配电网综合负荷特性的影响

将集中风力发电接到节点 2、3、4、5、6、11、12、7、9、14，进行电力系统暂态仿真，研究不同地理位置的集中风力发电对配电网综合负荷静态特性和动态特性的影响。

#### 5.4.1.1 接入不同支路相同类型节点的影响

风力发电接入不同支路相同类型节点对综合负荷特性的影响与其所接入支路的负荷比重有关，支路 B 负荷  $(15.1+j1.4\text{MVA}) >$  支路 A 负荷  $(8.5+j4.65\text{MVA}) >$  支路 C 负荷  $(5.1+j1.7\text{MVA})$ 。下面以集中风力发电接入首端节点 2、3、4 为例，简要分析其对综合负荷特性的影响。

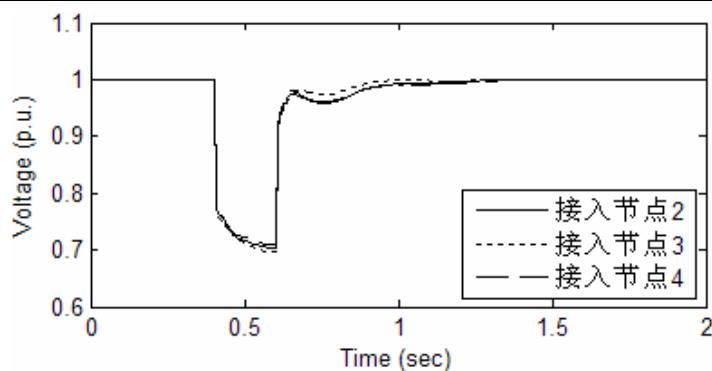
稳态情况下，由于风力发电接入支路负荷比重越大，根据 5.3.1 节的分析，风力发电对系统电压支撑越好，因此稳态电压也越高，即  $U_3 > U_2 > U_4$ ；同时，当系统电压升高时，网络损耗减少，配电网从系统吸收的有功和无功功率相应减少，即  $P_4 > P_2 > P_3$ 、 $Q_4 > Q_2 > Q_3$ ，相关数值见表 5.5 所示。

暂态过程中，由于风力发电接入容量相同，负荷母线电压变化幅度很小；而有功和无功变化随接入支路比重越大，波动幅度越小，故障后恢复稳态时间也越小，负荷动特性受影响也越小，如图 5.7 所示。

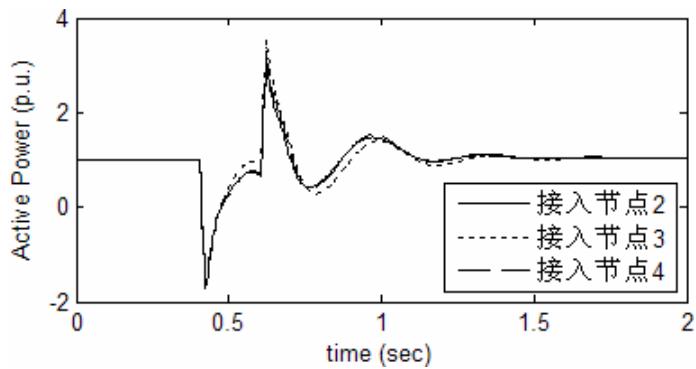
综合上述，由于各支路负荷的不同，集中风力发电接入不同支路上相同类型节点时，对系统影响能力是不同的；接入支路的负荷比重愈大，稳态电压越高，网络损耗越小，相应的从系统吸收的有功和无功功率也越小；同时，故障期间有功与无功变化幅度越小，即风机接入后对配电网综合负荷动态特性影响越小。

表 5.5 不同地理位置的集中风力发电接入影响规律

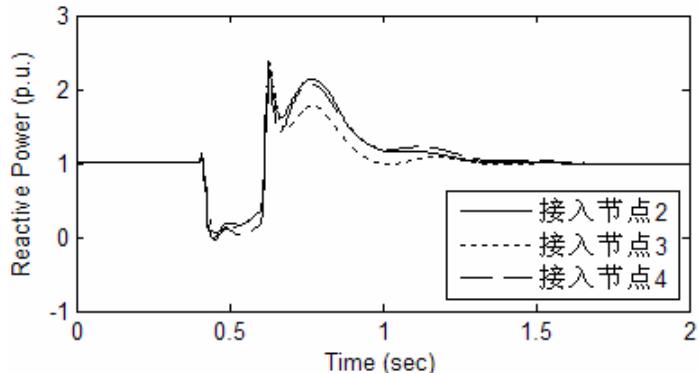
风机接 入位置	风机 出力	负荷母 线电压	从系统吸 收有功	从系统吸 收无功	网络 损耗	功率 因素
2	11.96	1.1050	20.275	11.646	3.964	0.86713
3	11.96	1.1141	19.910	9.164	2.482	0.90885
4	11.96	1.0979	20.295	13.564	4.355	0.831407
5	11.96	1.1010	20.537	12.687	4.317	0.850754
6	11.96	1.1002	20.487	12.909	4.334	0.846051
7	11.96	1.0984	20.690	13.381	4.597	0.839693
9	11.96	1.1085	20.029	10.694	3.153	0.882136
11	11.96	1.1125	19.967	9.604	2.666	0.900688
12	11.96	1.0911	20.660	15.331	5.025	0.803049
14	11.96	1.0910	20.640	15.372	4.938	0.80201



a) 电压变化规律



b) 有功功率变化规律



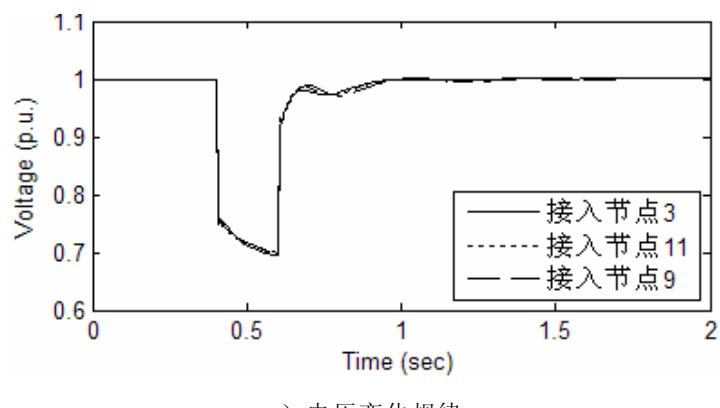
c) 无功功率变化规律

图 5.7 集中风力发电接入不同支路相同类型节点下对综合负荷特性的影响

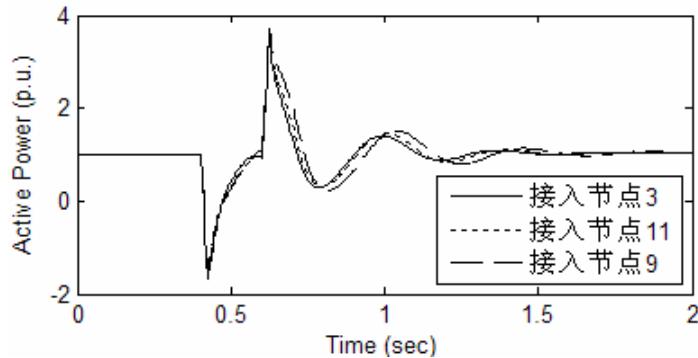
#### 5.4.1.2 接入相同支路不同类型节点的影响

风力发电接入相同支路不同类型节点对综合负荷特性的影响与其所接入节点与无穷大系统的电气距离有关。下面以集中风力发电接入 B 支路 3、11、9 节点为例，简要分析其对综合负荷特性的影响。

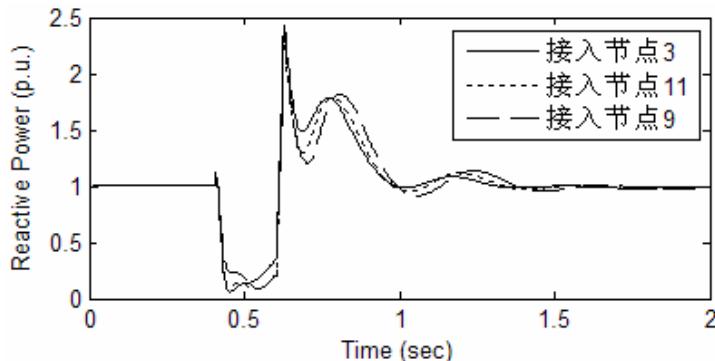
稳态情况下，集中风力发电的接入越靠近无穷大系统，对系统电压的支撑作用越明显，既有  $U_3 > U_{11} > U_9$ ；同时，当系统电压升高时，网络损耗减少，配电网从系统吸收的有功和无功功率相应减少，即  $P_9 > P_{11} > P_3$ 、 $Q_9 > Q_{11} > Q_3$ ，相关数值见表 5.5 所示。暂态过程中，由于风力发电接入容量相同，负荷母线电压变化幅度很小；而有功和无功变化随接入节点越靠近无穷大系统，波动幅度越小，故障后恢复稳态时间也越小，负荷动特性受影响也越小，如图 5.8 所示。



a) 电压变化规律



b) 有功功率变化规律



c) 无功功率变化规律

图 5.8 集中风力发电接入相同支路不同类型节点下对综合负荷特性的影响

综合上述，由于各节点与无穷大系统的电气距离不同，集中风力发电接入相同支路上不同类型节点时，对系统影响能力是不同的。接入点越接近无穷大系统，稳态电压越高，网络损耗越小，相应的从系统吸收的有功和无功功率也越小；同时，故障期间有功与无功变化幅度越小，即风机接入后对配电网综合负荷动态特性影响越小。

#### 5.4.2 分散接入对配电网综合负荷特性的影响

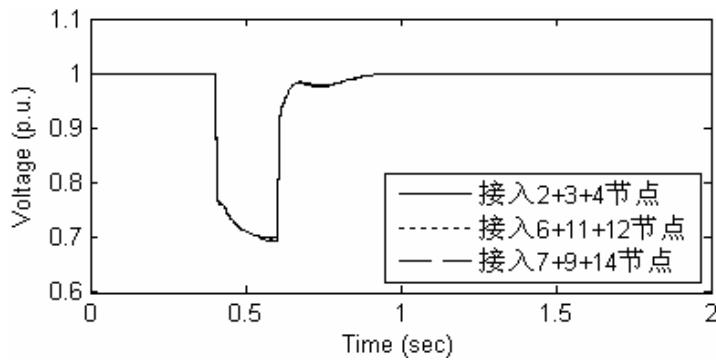
将风力发电分散地接入配电网不同地理位置，进行电力系统暂态仿真，采集相关数据进行比较分析。通过大量的仿真数据进行统计规律性分析可知，不同地理位置的分散风力发电接入对配电网的综合负荷静态特性和动态特性影响均不明显，仅存在细微的差别，这些细微的差别是由于分散风力发电接入的支路负荷比重和节点类型（离无穷大系统的电气距离）的不同造成的，但造成这些差别的因素由于风力发电的分散接入而具有很大的分散性，综合之后的整体影响就微乎其微。下面以风力发电分散的接入 2+3+4 节点、6+11+12 节点、7+9+14 节点为例，说明不同地理位置的分散风力发电接入对配电网综合负荷特性的影响，如图 5.9 和表 5.6 所示。

从表 5.6 的数据比较分析和图 5.9 的曲线直观来看，配电网综合负荷的静态特性和动态特性在不同地理位置的分散风力发电接入后，影响微乎其微，分散的风力发电接入对配电网综合负荷特性的影响要明显的小于集中的风力发电接入，更加有利于系统的安全稳定运行。

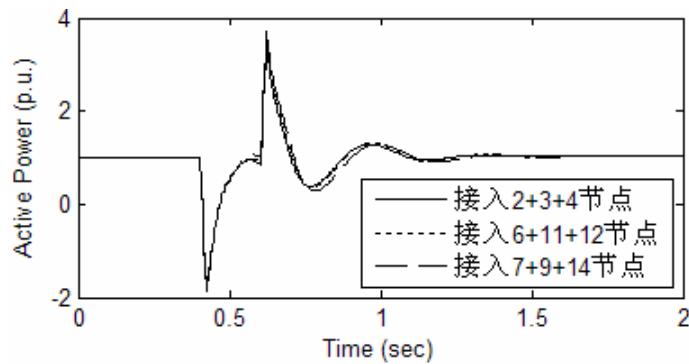
#### 5.4.3 统计规律性总结

通过上面的分析可知，不同地理位置的集中 WG 接入与接入节点类型和所在支路负荷比重有直接关系，接入节点越靠近配电网末端，所在支路负荷比重越小，对综合负荷特性影响也就越大。尤其值得指出的是，不同地理位置的分散 WG 接入对配电网综合负荷特性影响相对较小，这进一步说明，分散的风力发电接入对配电网综合负荷特性的影响要明显的小于集中的风力发电接入，更加有利于系统的安全稳定运行。因此，从系统运行稳定的角度出发，风力发电更适合作为分布式电源接入配电网运行，来为本地负荷提供有效的电力补充，提高供电可靠性。

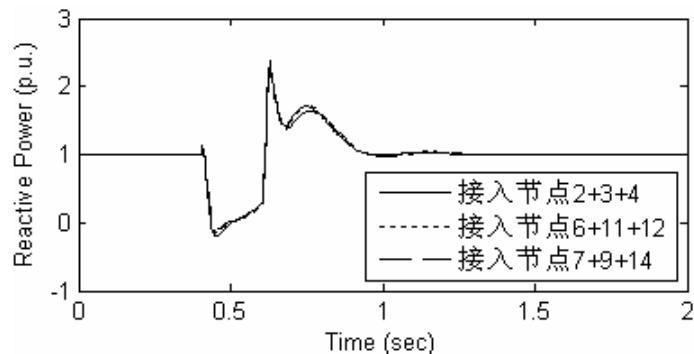
同时，通过综合比较 WG 不同容量比例和不同地理位置接入对配电网综合负荷特性影响来看，容量比例的影响要明显大于地理位置的影响。因此，在考虑风力发电的配电网综合负荷建模研究中，容量比例的影响起关键作用，即第 3.5 节通过三种典型运行方式（以 WG 接入的容量比例为主要因素）的建模研究是可行的，也从另一个角度说明了第 3 章提出的广义综合负荷模型结构是有效的。接下来，通过不同影响因素下的广义综合负荷模型的建模进一步检验该模型。



a) 电压变化规律



b) 有功功率变化规律



c) 无功功率变化规律

图 5.9 不同地理位置的分散风力发电接入对综合负荷特性的影响

表 5.6 不同地理位置的分散风力发电接入影响规律

风机接入位置	风机出力	负荷母线电压	从系统吸收有功	从系统吸收无功	网络损耗	功率因素
2+3+4	11.96	1.1152	19.868	8.878	2.724	0.9129
6+11+12	11.96	1.1141	19.928	9.074	2.055	0.9103
7+9+14	11.96	1.1182	19.897	8.944	2.250	0.9187

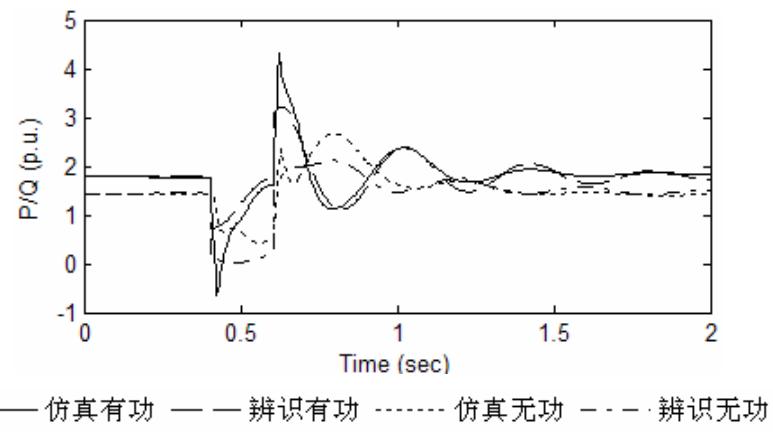
## 5.5 不同影响因素下广义综合负荷模型建模检验

利用 5.3 和 5.4 节研究采集的风力发电不同接入方式下的仿真数据，采用第 3 章提出的任意动静比例的广义综合负荷模型进行总体测辨建模，从模型的响应曲线、辨识参数和相对拟合误差等方面进行模型的检验分析。

## 5.5.1 不同容量比例影响下的模型辨识

### 5.5.1.1 集中风力发电接入

利用 5.3.1 节仿真采集的数据，采用第 3 章提出的任意动静比例的广义综合负荷模型进行总体测辨建模，辨识结果见表 5.7 所示。限于篇幅，仅给出 50% 比例下的模型响应曲线，如图 5.10 所示。其中“实线”为仿真有功，“虚线”为辨识有功，“点线”为仿真无功，“点划线”为辨识无功（下同）。



### 5.5.1.2 分散风力发电接入

利用 5.3.2 节仿真采集的数据，采用第 3 章提出的任意动静比例的广义综合负荷模型进行总体测辨建模，辨识结果见表 5.8 所示。限于篇幅，仅给出 50% 比例下的模型响应曲线，如图 5.11 所示。

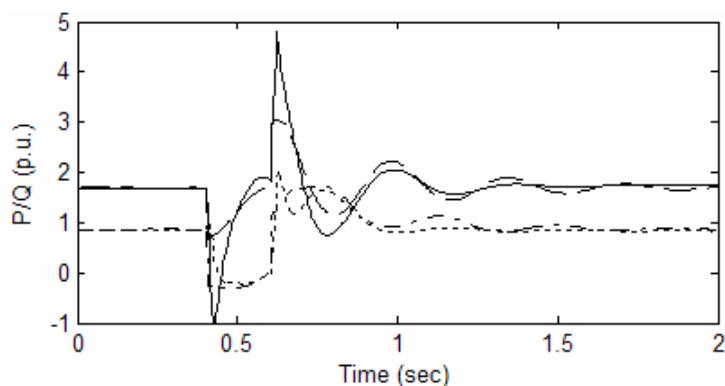


图 5.11 50%容量比例下分散风力发电模型响应曲线拟合效果

### 5.5.1.3 讨论小结

通过对不同容量比例的集中和分散风力发电接入方式下的配电网综合负荷建模研究，图 5.10 和 5.11 的模型响应曲线拟合效果直观表明，用任意动静比例的广义综合负荷模型能较好地等效描述含风力发电的配电网综合负荷特性；从表 5.7 和 5.8 的模型辨识参数来看，影响综合负荷特性的关键参数——动静比例 ( $K_m'$ )

随着风力发电接入容量比例的不断增大，而逐渐减小，当风力发电接入容量比例达到 70% 以上时，辨识所得的  $K_m'$  值为负数，表示风力发电出力已能完全供给感应电动机负荷，此时广义综合负荷模型中的异步电机运行在发电机状态，模型辨识参数  $s_0$  和  $T_0$  为负值也验证了这一点；其它模型辨识参数，由于风力发电接入容量的不同而不存在稳定一致性，但相对拟合误差基本一致，均处于合理可接受的范围之内，仅随着风力发电接入容量比例的增大有扩大的趋势，这是由于风力发电容量越大，对配电网综合负荷特性影响越大，辨识拟合效果相对越差。

### 5.5.2 不同地理位置影响下的模型辨识

#### 5.5.2.1 集中风力发电接入

利用 5.4.1 节仿真采集的数据，采用第 3 章提出的任意动静比例的广义综合负荷模型进行总体测辨建模，辨识结果见表 5.9 所示。限于篇幅，仅给出风力发电集中接入 Node 9 的模型响应曲线，如图 5.12 所示。

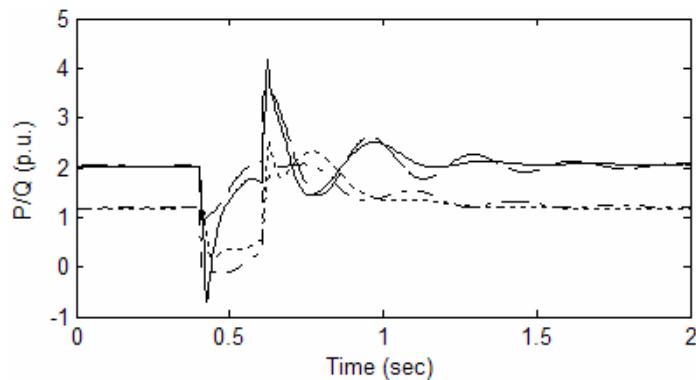


图 5.12 风力发电集中接入 Node 9 的模型响应曲线拟合效果

#### 5.5.2.2 分散风力发电接入

利用 5.4.2 节仿真采集的数据，采用第 3 章提出的任意动静比例的广义综合负荷模型进行总体测辨建模，辨识结果见表 5.10 所示。限于篇幅，仅给出风力发电集中接入 Node 7+9+14 的模型响应曲线，如图 5.13 所示。

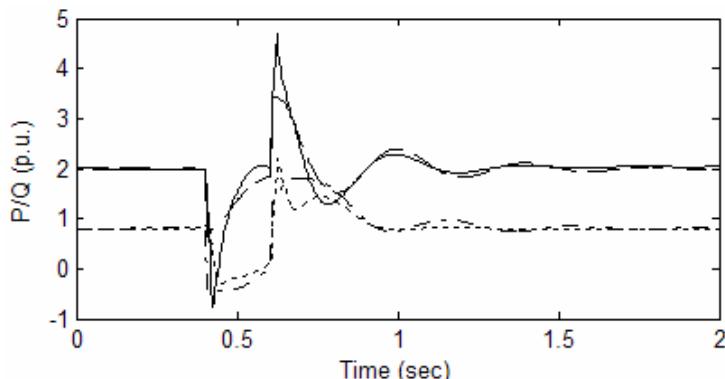


图 5.13 风力发电分散接入 Node 7+9+14 的模型响应曲线拟合效果

表 5.7 不同容量比例的集中风力发电接入的模型辨识结果

比例	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$H$	$A$	$B$	$K_m'$	$T_0$	$s_0$	$E_r$
30%	0.0238	0.4800	2.5765	0.0080	0.1000	0.75	0.04	0	0.4266	0.6751	0.0101	0.00269
40%	0.0297	0.0500	2.4586	0.0084	0.1000	0.90	0.0499	0	0.2329	0.4400	0.0069	0.00207
50%	0.0364	0.0475	1.8050	0.0080	0.3800	1.12	0.6500	0.35	0.1340	0.3648	0.0033	0.00225
60%	0.0445	0.0475	1.1319	0.0080	0.3610	1.41	0.0417	0	0.0812	0.2612	0.0011	0.00254
70%	0.0576	0.0500	1.9000	0.0056	0.3800	2.25	0.0500	0.95	-0.1302	-0.1114	-0.0017	0.00268
80%	0.0621	0.0475	2.1594	0.0056	0.2275	2.25	1.0000	0	-0.5693	-0.1834	-0.0045	0.00304

表 5.8 不同容量比例的分散风力发电接入的模型辨识结果

比例	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$H$	$A$	$B$	$K_m'$	$T_0$	$s_0$	$E_r$
30%	0.0237	0.0500	1.9000	0.0130	0.3610	0.75	1.0000	0	0.4030	0.6925	0.0068	0.00188
40%	0.0345	0.1196	1.9950	0.0091	0.1888	1.23	0.9500	0	0.2445	0.4631	0.0036	0.00204
50%	0.0478	0.1859	2.5872	0.0080	0.1000	1.65	0.0500	0	0.2447	0.4555	0.0021	0.00225
60%	0.0589	0.1361	2.6394	0.0080	0.1000	2.25	0.0475	0	0.0663	0.2643	0.0005	0.00245
70%	0.0675	0.0474	2.4567	0.0075	0.2383	1.75	0.0475	0	-0.2374	-0.2598	-0.0018	0.00273
80%	0.0735	0.0500	2.1236	0.0080	0.1963	2.25	0.0451	0	-0.6909	-0.3335	-0.0052	0.00330

表 5.9 不同地理位置的集中风力发电接入的模型辨识结果

节点	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$H$	$A$	$B$	$K_m'$	$T_0$	$s_0$	$E_r$
2	0.0367	0.1133	1.805	0.0076	0.2092	1.325	1.0000	0	0.2294	0.4885	0.0023	0.002142
3	0.0373	0.1858	2.365	0.0080	0.2087	1.065	0.9500	0.05	0.2891	0.4468	0.0030	0.002044
4	0.0397	0.2116	1.900	0.0080	0.1000	1.189	0.9500	0.05	0.2945	0.4190	0.0041	0.002102
5	0.0318	0.1574	1.804	0.0080	0.3800	1.438	1.0000	0	0.2329	0.4400	0.0039	0.002078
6	0.0336	0.1598	2.986	0.0084	0.2728	1.332	1.0000	0	0.2500	0.4645	0.0042	0.002165
7	0.0345	0.1544	1.805	0.0076	0.3800	1.176	1.0000	0	0.2306	0.4681	0.0029	0.002141
9	0.0367	0.1525	2.100	0.0080	0.3428	1.396	0.9500	0	0.3027	0.4185	0.0034	0.002172
11	0.0329	0.1534	2.678	0.0079	0.3237	1.408	1.0000	0	0.2743	0.4484	0.0018	0.002076
12	0.0355	0.1527	2.927	0.0068	0.3800	1.205	0.9607	0	0.2924	0.4753	0.0019	0.002260
14	0.0391	0.1549	2.634	0.0061	0.3591	1.127	1.0000	0	0.2367	0.4568	0.0031	0.002195

表 5.10 不同地理位置的分散风力发电接入的模型辨识结果

节点	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$H$	$A$	$B$	$K_m'$	$T_0$	$s_0$	$E_r$
2+3+4	0.0391	0.1956	2.348	0.008	0.2159	1.325	1.0000	0	0.3027	0.4211	0.0030	0.002058
7+9+14	0.0387	0.1956	2.945	0.008	0.1788	1.015	1.0000	0	0.2725	0.3962	0.0036	0.002095
6+11+12	0.0397	0.1859	2.882	0.008	0.2100	1.663	1.0000	0	0.2551	0.4347	0.0031	0.002067

### 5.5.2.3 讨论小结

通过对不同地理位置的集中和分散风力发电接入方式下的配电网综合负荷建模研究，图 5.12 和 5.13 的模型响应曲线拟合效果直观表明，用任意动静比例的广义综合负荷模型能较好地等效描述含风力发电的配电网综合负荷特性；从表 5.9 和 5.10 的模型辨识参数来看，影响综合负荷特性的关键参数——动静比例 ( $K_m'$ ) 辨识所得为正值，表示风力发电出力还不能完全供给感应电动机负荷，此时广义综合负荷模型中的异步电机运行在电动机状态，模型辨识参数  $s_0$  和  $T_0$  为正值也验证了这一点；同时，由于风力发电接入容量比例固定为 40%，因此所有模型辨识参数基本维持在一定范围内，尤其是风力发电分散的接入不同地理位置时，通过 5.4.2 的分析，其本身对综合负荷特性的影响差别不大，因此辨识所得的参数也保持较高的稳定一致性，同时相对拟合误差也控制在较小的合理范围内。

## 5.6 几种典型机理负荷模型的描述能力比较

为建立能准确描述含风力发电的配电网综合负荷特性的负荷模型，在前面几章研究工作的基础上，有必要针对提出的不同机理类负荷模型，对含风力发电的配电网综合负荷特性的描述能力进行细致的比较分析，提出最合适的负荷模型。基于此，本节通过四种典型运行方式下的仿真、建模，从模型自描述能力和泛化能力等方面，比较分析了传统感应电动机模型、第 3 章提出的配电网集结等效的综合感应电动机模型、结合第 3 章和第 4 章提出的配电网集结等效的任意动静比例的广义综合负荷模型这三种机理负荷模型，对含风力发电的配电网综合负荷特性的综合描述能力。

### 5.6.1 仿真实验

基于 MATLAB 搭建如图 5.1 所示的配电网络仿真系统，假设在无穷大系统侧发生故障，导致 110kV 母线 B1 处电压下降 20%左右，持续 0.2s 恢复，采用表 5.11 的四种典型风力发电接入方式进行电力系统暂态仿真，获取负荷母线 B1 的电压、有功及无功的动态特性，作为总体测辨建模所需的数据样本。

表 5.11 仿真实验的 4 种典型风力发电接入方式

类型	风机接入节点 (Node)	节点接入风机 容量 (MW)	总风机接入容 量 (MW)	风力发电容量 占总负荷比例
样本①	5, 8	3	6	20.9%
样本②	4, 12, 14	3	9	31.4%
样本③	2, 7, 3, 9	3	12	41.8%
样本④	7, 9, 14	6	18	62.7%

## 5.6.2 三种典型机理负荷模型结构与待辨识参数

本小节研究比较的三种典型机理负荷模型包括：

- 1) 传统感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型，模型结构如图 3.1 所示；
- 2) 第 3 章提出的考虑配网参数的配电网集结等效的感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型，模型结构如图 3.3 所示；
- 3) 由于第 4 章已就提出的任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型与第一种传统综合负荷模型进行了综合性能比较，这里不再比较分析，而是在此基础上，结合第 3 章考虑配网参数的影响，综合提出配电网集结等效的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型这第三种负荷模型，模型结构如图 5.14 所示。

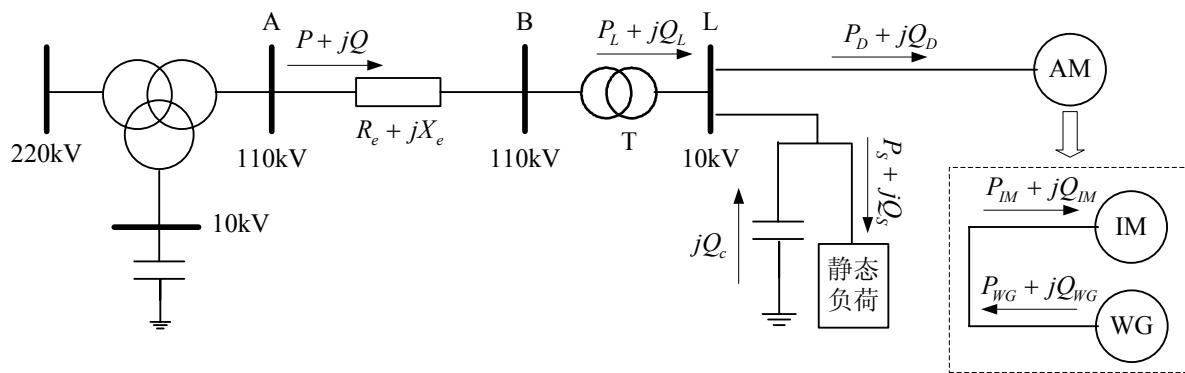


图 5.14 配电网集结等效的广义综合负荷模型结构

上述三种典型机理负荷模型的独立待辨识参数分别为：

模型 I：传统感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型，静态负荷设为恒阻抗特性。模型共 9 个独立待辨识参数，独立辨识参数矢量为：

$$\alpha_1 = [R_s \ X_s \ X_m \ R_r \ X_r \ H \ A \ B \ K_m]^T, \text{ 且 } K_m \in [0, 1]$$

模型 II：配电网集结等效的感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型，静态负荷设为恒阻抗特性，且设  $R_m = 0$ ,  $k_{T^*} = 1$ 。模型共 13 个独立待辨识参数，独立辨识参数矢量为：

$$\alpha_2 = [R_e \ X_e \ k_q \ R_s \ X_s \ X_m \ R_r \ X_r \ T_j \ A \ B \ K \ K_m]^T, \text{ 且 } K_m \in [0, 1]$$

模型 III：配电网集结等效的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型，为丰富静态负荷模型类，静态负荷设为 ZIP 特性，且设  $R_m = 0$ ,  $k_{T^*} = 1$ 。模型共 17 个独立待辨识参数，独立辨识参数矢量为：

$$\alpha_3 = [R_e \ X_e \ k_q \ R_s \ X_s \ X_m \ R_r \ X_r \ T_j \ A \ B \ a_p \ b_p \ a_q \ b_q \ K \ K_m']^T, \text{ 且 } K_m' \in (-\infty, +\infty)$$

### 5.6.3 总体测辨建模结果

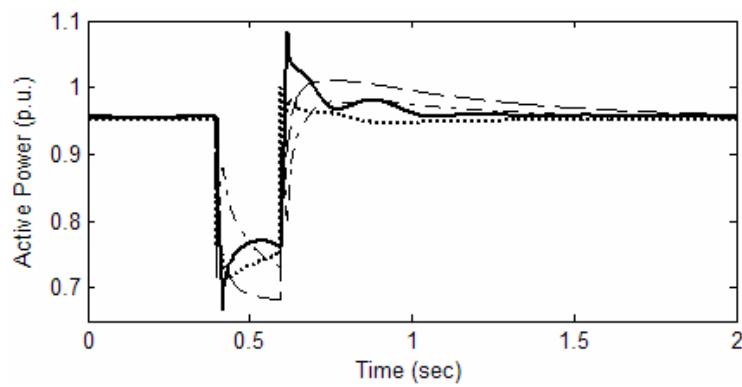
基于总体测辨建模方法,对5.6.1节仿真实验的数据样本进行建模,模型参数辨识结果如表5.12所示。限于篇幅,仅分别给出了对应样本①和样本④的模型响应曲线拟合效果,分别如图5.15和5.16所示,其中“实线”为仿真实测响应,“虚线”为模型I响应,“点划线”为模型II响应,“点线”为模型III响应(下同)。

表 5.12 三种典型机理负荷模型参数辨识结果

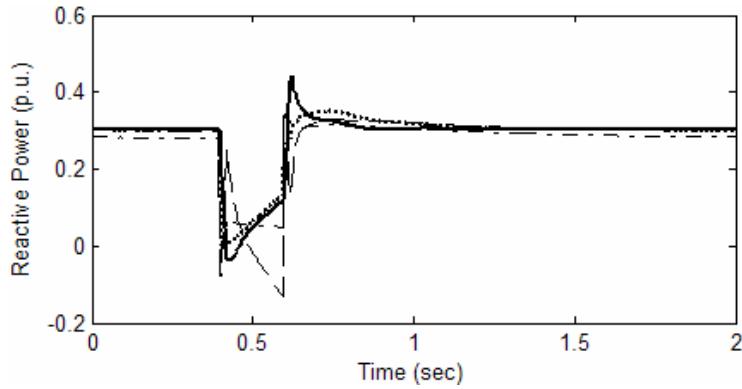
样本	模型	$R_e$	$X_e$	$k_q$	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$T_j(2H)$	$A$
①	I	/	/	/	0.015	0.332	2.08	0.181	0.331	2.53	1
	II	0.108	0.061	3.832	0.010	0.480	3.00	0.195	0.393	1.50	1
	III	0.095	0.058	3.648	0.013	0.487	2.09	0.199	0.387	1.05	1
②	I	/	/	/	0.033	0.495	4.67	0.007	0.398	1.32	1
	II	0.078	0.037	1.732	0.028	0.498	2.19	0.190	0.398	1.52	1
	III	0.073	0.035	1.079	0.029	0.497	2.08	0.008	0.397	1.50	1
③	I	/	/	/	0.053	0.497	4.26	0.006	0.395	1.35	1
	II	0.058	0.029	1.256	0.039	0.494	3.00	0.190	0.378	1.48	1
	III	0.069	0.032	1.081	0.042	0.499	2.08	0.007	0.388	1.54	1
④	I	/	/	/	0.057	0.480	2.43	0.007	0.336	2.35	1
	II	0.070	0.045	1.052	0.079	0.492	2.39	0.006	0.399	2.43	1
	III	0.069	0.051	1.037	0.028	0.456	2.20	0.008	0.390	2.52	1

续表 5.12 三种典型机理负荷模型参数辨识结果

样本	模型	$B$	$a_p$	$b_p$	$a_q$	$b_q$	$K$	$K_m(K_m')$	$T_0$	$s_0$	$E_r$
①	I	0	/	/	/	/	/	0.65	0.424	0.080	0.00314
	II	0	/	/	/	/	1.893	0.57	0.258	0.060	0.00275
	III	0	0.36	0.38	0.42	0.23	1.653	0.42	0.175	0.041	0.00167
②	I	0	/	/	/	/		0.43	0.196	0.044	0.00333
	II	0	/	/	/	/	2.145	0.36	0.103	0.031	0.00275
	III	0	0.52	0.14	0.32	0.45	2.346	0.32	0.086	0.028	0.00234
③	I	0	/	/	/	/		0.40	0.189	0.043	0.00324
	II	0	/	/	/	/	1.689	0.35	0.098	0.034	0.00283
	III	0	0.44	0.28	0.33	0.54	1.872	0.27	0.067	0.015	0.00224
④	I	0	/	/	/	/		0.13	0.028	0.008	0.00406
	II	0	/	/	/	/	3.964	0.07	-0.023	-0.001	0.00375
	III	0	0.27	0.35	0.17	0.64	3.409	-0.02	-0.061	-0.011	0.00278

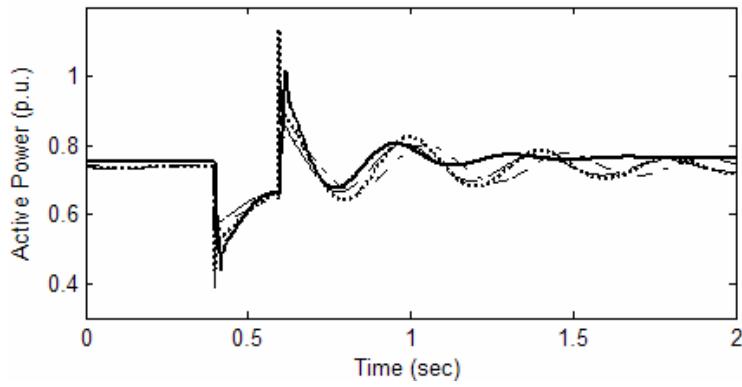


a) 有功功率响应曲线

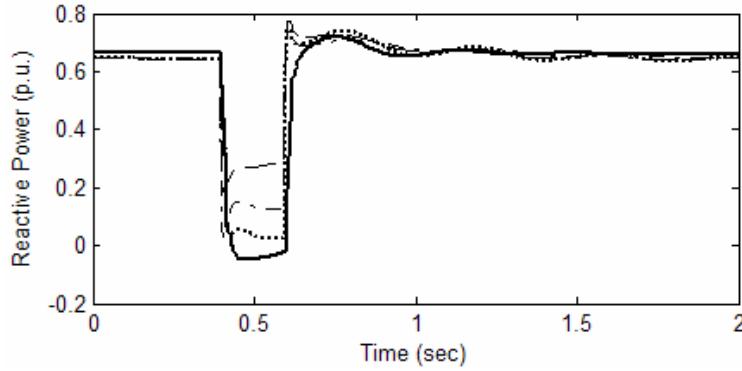


b) 无功功率响应曲线

图 5.15 样本①的实测与模型响应曲线拟合效果



a) 有功功率响应曲线



b) 无功功率响应曲线

——仿真实测响应 —— 模型 I 响应 - - - 模型 II 响应 ..... 模型 III 响应

图 5.16 样本④的实测与模型响应曲线拟合效果

## 5.6.4 适应性能力比较

基于上述建模结果，现就三种典型机理负荷模型的自描述能力、泛化能力等简要讨论如下。

### 5.6.4.1 模型的自描述能力

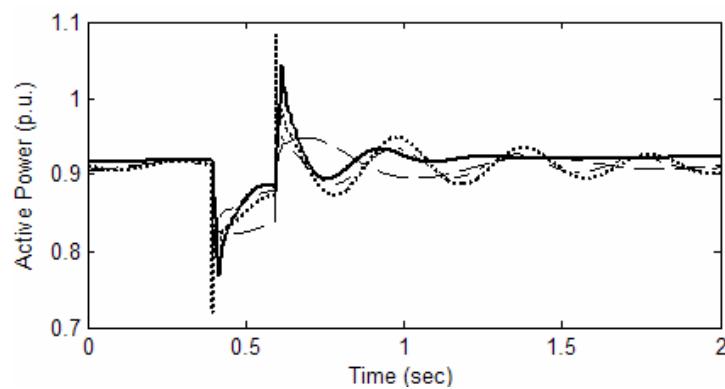
图 5.15 和图 5.16 的实测与模型响应曲线拟合效果直观表明，模型 III 对建模样本的逼近效果明显优于模型 II 和模型 I，且模型 II 也稍微优于模型 I，尤其体现在动态过程的变化趋势上；表 5.12 则展示了 4 个样本的参数辨识结果和相对拟合误差，由表 5.12 可知，模型 III 对所有样本的平均拟合误差仅为模型 I 的 65.6%，模型 II 对所有样本的平均拟合误差为模型 I 的 87.7%。上述结果充分说明，模型 III 对含风力发电的配电网综合负荷特性具有较强的自描述能力，且较模型 II 和模型 I 有了一定的提高。

### 5.6.4.2 模型的泛化能力

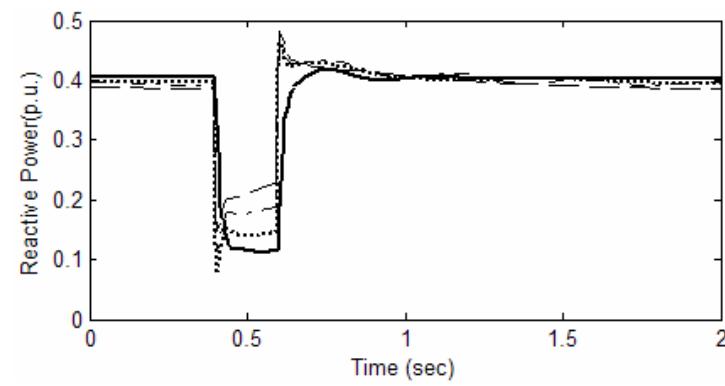
针对仿真实验的 4 种典型风力发电接入方式，在假设故障仿真时，使 B1 母线电压分别下降 10%、20% 和 30%，进行电力系统暂态仿真，获取模型辨识所需的负荷特性数据样本。分别绘制对样本 20% 下辨识所得的模型参数在样本 10% 激励下的模型响应曲线（内插能力验证）和对样本 20% 下辨识所得的模型参数在样本 30% 激励下的模型响应曲线（外推能力验证）。图 5.17 和图 5.18 分别给出了第 2 种运行方式下的内插、外推能力验证。表 5.13 列出了不同风力发电接入方式下的模型内插、外推响应拟合误差。

表 5.13 三种典型机理负荷模型泛化能力验证误差

运行方式	模型	拟合误差	
		内插（10%）	外推（30%）
①	I	0.001921	0.004426
	II	0.001630	0.003302
	III	0.001417	0.002674
②	I	0.001968	0.003528
	II	0.001764	0.003223
	III	0.001492	0.002865
③	I	0.001941	0.003793
	II	0.001635	0.003333
	III	0.001329	0.003062
④	I	0.002392	0.005853
	II	0.002218	0.005506
	III	0.001842	0.004741

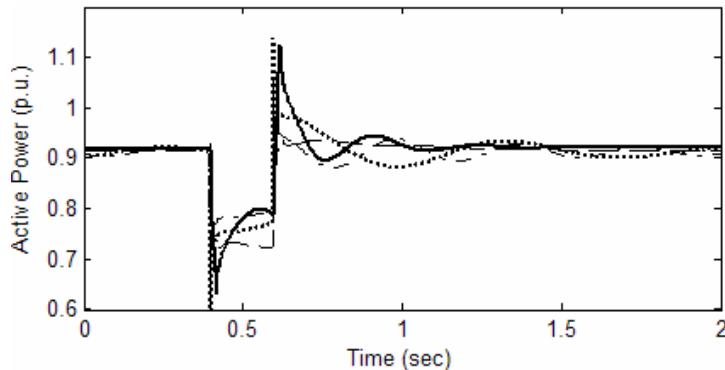


a) 有功内插能力验证

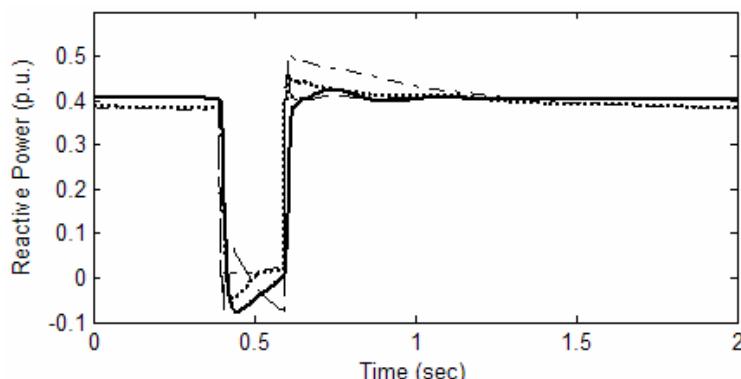


b) 无功内插能力验证

图 5.17 运行方式②的内插能力验证



a) 有功外推能力验证



b) 无功外推能力验证

——仿真实测响应 —— 模型 I 响应 - - - 模型 II 响应 ..... 模型III响应

图 5.18 运行方式②的外推能力验证

从曲线拟合效果来看，虽然内插、外推检验样本与建模样本之电压激励幅度相差悬殊， $|\Delta V_{10\%}| = 50\% |\Delta V_{20\%}|$ ， $|\Delta V_{30\%}| = 150\% |\Delta V_{20\%}|$ ，且三种模型在一定程度上对内插、外推样本的实测响应均能拟合，但模型 III 的拟合效果要明显优于模型 II 和模型 I，尤其是在动态变化趋势上，模型 III 的优势更加明显。同时，表 5.13 列出了不同风力发电接入方式下的模型内插、外推响应拟合误差数据，也充分说明模型 III 的泛化能力较模型 II 和模型 I 有了一定的提高。

综上所述，通过 4 种运行方式下三种典型机理负荷模型的自描述能力和泛化能力的比较分析，可以看出，对含风力发电的配电网综合负荷特性整体描述能力而言，配电网集结等效的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型的综合性能最好，配电网集结等效的感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型次之，传统感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型最差。

## 5.7 本章小结

为建立能准确描述含风力发电的配电网综合负荷特性的负荷模型，本章在构建典型配电系统的基础上，研究了不同容量比例和不同地理位置的集中和分散 WG 接入对配电网综合负荷特性的影响。研究表明，不同容量比例的集中和分散 WG 接入，均表现为随着接入容量比例的增大，配电网综合负荷特性受影响越大，且 WG 的集中接入要比分散接入的影响更为明显；不同地理位置的集中 WG 接入与接入节点和所在支路负荷比重有直接关系，接入节点越靠近配电网末端，所在支路负荷比重越小，对综合负荷特性影响也就越大；然而，不同地理位置的分散 WG 接入对配电网综合负荷特性影响相对较小，充分说明 WG 作为典型分布式电源的分散接入更加有利于系统的安全稳定运行；同时，就对配电网综合负荷特性的影响程度来看，容量比例的影响要明显大于地理位置的影响，在影响因素中占主导作用。

此外，在上述研究基础上，利用不同影响因素下的仿真数据，从拟合效果、平均拟合误差及辨识参数 3 个方面，验证了第 4 章所提出的任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型的有效性；并且，通过 4 种典型运行方式下的建模比较分析，研究了传统感应电动机综合负荷模型、配电网集结等效的感应电动机综合负荷模型、任意动静比例的配电网集结等效的异步电机广义综合负荷模型等三种典型机理负荷模型，对含 WG 的配电网综合负荷特性的综合描述能力比较，研究表明配电网集结等效的广义综合负荷模型的综合性能要明显优于其它两种模型，较适合描述含 WG 的配电网综合负荷特性。

# 第6章 考虑直流分布式电源的配电网综合负荷建模研究

## 6.1 引言

光伏电池（Photovoltaic Cell, PV）和燃料电池（Fuel Cell, FC）作为两种典型的分布式电源，因其清洁、环保、高效等特点引起越来越广泛的关注，其共同特点是产生的都是直流电<sup>[113~117]</sup>。PV 和 FC 作为典型的小容量直流分布式电源，大多接入电网 10kV 及以下配网侧，而作为电网规划设计与运行调度控制之基本决策依据的电力系统仿真计算中，负荷模型是对主网变电站母线“综合负荷”特性的等值描述，这种综合负荷成份自然也包括了 PV 和 FC 等直流分布式电源。因此，研究考虑直流分布式电源的配电网综合负荷建模，是 PV 和 FC 广泛应用的一个重要方向。

考虑直流分布式电源的配电网综合负荷建模研究工作面临两个亟待解决的问题：其一，基于总体测辨法的负荷建模需要大量的仿真计算，而仿真计算所需的 PV 和 FC 模型如何建立？是否适合负荷建模？其二，作为配电网综合负荷的一部分，PV 和 FC 如何等效？作为广义上的负荷是等效为动态负荷还是静态负荷，模型又如何？针对上述问题一，国内外学者提出了诸如基于 BP 神经网络的 PV 模型<sup>[118,119]</sup>、非线性的 FC 模型<sup>[120,121]</sup>、基于神经模糊辨识的 FC 模型<sup>[122~125]</sup>等，但这些模型复杂，在电力系统仿真计算应用有较大的困难，不适合负荷建模的研究。而针对问题二的研究尚属空白。

本章在研究 PV 和 FC 自身机理特性和运行控制方式的基础上，构建适合作为分布式发电的 PV 和 FC 发电系统，建立既能反映其机理特性又适合负荷建模研究的等值模型；在此基础上，通过其稳态和暂态特性的分析，提出适合描述其外特性的等效描述模型，进而提出考虑 PV 和 FC 等直流分布式电源的广义综合负荷模型结构，通过计算机仿真和辨识建模对其进行有效性检验。

## 6.2 光伏电池发电系统建模

光伏发电是在一定条件下使太阳能直接转化为电能的过程，在转化过程中，没有污染和噪声，因此作为一种清洁环保和可再生的分布式发电方式被各国大力的推广应用。按照制造光伏电池的材料不同，可以把光伏电池分成 4 种类型：单晶硅电池，多晶硅电池，薄膜电池和非晶硅电池<sup>[126]</sup>。本章研究以单晶硅为例，其它类型可通过适当的数学转换为这种类型。

光伏发电的一个主要特点就是受气候条件（光照强度、温度等）因素影响，为减少这些因素对用户的影响，本章构建由光伏电池阵列、最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT）、蓄电池、DC/DC 变换器、并网逆变单元等部分构成的光伏电池发电系统对用户进行供电，供电模式如图 6.1 所示。

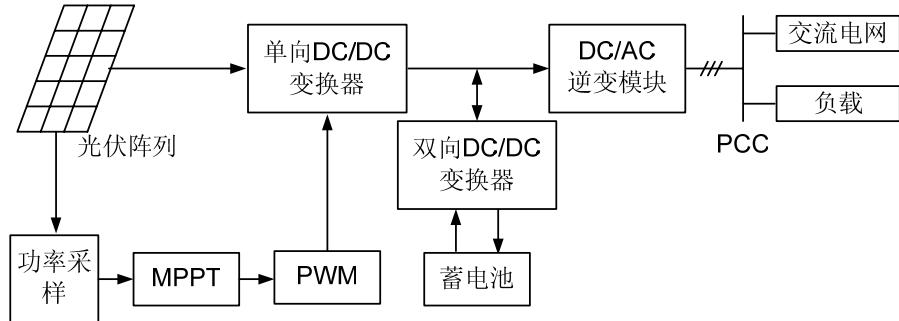


图 6.1 光伏电池发电系统供电模式

图 6.1 所示的 PV 发电系统中，主要由三个模块构成：发电模块、储能模块和逆变模块。其中发电模块由光伏阵列将太阳能转换为电能，通过 MPPT 和脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）的单向 DC/DC 变换器实现恒定电压的最大直流功率输出；储能模块由蓄电池和双向 DC/DC 变换器组成，通过采集系统反馈量控制充电和放电状态，实现 PV 系统的恒定电压和恒定直流功率输出；逆变模块实现直流到交流的转变，将光伏电池发出的电能输送到电网和负荷。根据各模块具体功能，本节首先介绍发电模块和储能模块的主要模型，逆变模块将在 6.4 节介绍。

### 6.2.1 光伏电池阵列数学模型

光伏电池阵列由单个的光伏电池串联和（或）并联连接而成，每一个光伏电池本质上等效为一个 P-N 结，基本特性与二极管类似，直接将光能转换成电能。其等效电路由电流密度为  $I_{ph}$  的理想光生电流源、理想二极管  $D$  及一系列电阻（内部并联电阻  $R_{sh}$  和串联电阻  $R_s$ ）组成，如图 6.2 所示<sup>[127]</sup>。

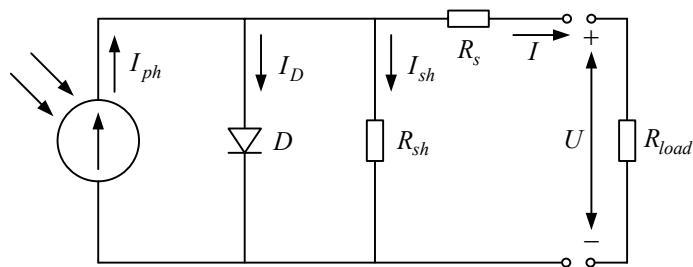


图 6.2 光伏电池的等效电路

单个光伏电池的输出电流可以由以下数学表达式来描述：

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (6.1)$$

式 (6.1) 中  $I_{ph}$  指的是单晶硅的光电流强度，它的大小主要与太阳日照强度和

电池温度有关，可以用式（6.2）描述：

$$I_{ph} = \frac{G}{1000} [I_{SCR} + K_I (T - T_r)] \quad (6.2)$$

式中： $G$  为太阳日照强度， $\text{W/m}^2$ ； $I_{SCR}$  为在太阳日照强度为  $1000\text{W/m}^2$ 、参考温度为  $25^\circ\text{C}$  时的电池短路电流， $\text{A}$ ； $K_I$  为电池短路电流温度系数， $\text{A/}^\circ\text{C}$ ； $T$  为电池温度， $^\circ\text{C}$ ； $T_r$  为参考温度， $T_r = 25^\circ\text{C}$ 。

式（6.1）中  $I_D$  指的是单晶硅的短路电流，它的大小与光伏电池的温度和输出电压有关，用式（6.3）表达。

$$I_D = I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{qU_{oc}}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (6.3)$$

其中：

$$I_{os} = I_{or} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_{GO}}{BK} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

$$U_{oc} = U + IR_s$$

式中： $I_{os}$  为电池反向饱和电流， $\text{A}$ ； $U_{oc}$  为电池开路电压， $\text{V}$ ； $q$  为电子电荷， $q = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ； $A$ ， $B$  为 P-N 结理想因子； $K$  为波尔兹曼常数， $\text{J/K}$ ； $T$  为电池温度， $\text{K}$ ； $T_r$  为参考温度， $T_r = 301.18\text{K}$ ； $I_{or}$  为在参考温度下的电池饱和电流， $\text{A}$ ； $E_{GO}$  为带隙硅常数， $\text{eV}$ ； $U$  为电池的输出电压， $\text{V}$ ； $R_s$  为电池的等效串联电阻， $\Omega$ 。

式（6.1）中  $I_{sh}$  指的是电池对地的泄漏电流，可以用下式表达：

$$I_{sh} = \frac{U_{oc}}{R_{sh}} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (6.4)$$

式中： $R_{sh}$  为电池的等效并联电阻， $\Omega$ 。

将式（6.3）、（6.4）代入（6.1）可以得到：

$$I = I_{ph} - I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{q(U + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{(U + IR_s)}{R_{sh}} \quad (6.5)$$

由于一个光伏阵列通常由几个光伏电池串联和（或）并联连接而成，光伏阵列的输出电压  $U_{pv}$  和电流  $I_{pv}$  与单个光伏电池的输出电压  $U$  和电流  $I$  的关系：

$$\begin{cases} U_{pv} = n_s U \\ I_{pv} = n_p I \end{cases} \quad (6.6)$$

式中： $n_s$  表示每组串联的光伏电池个数； $n_p$  表示一个光伏阵列并联的组数。

将式（6.5）代入式（6.6）可以得到一个光伏阵列等效的数学模型，通常可以表示为：

$$I_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s/n_p)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{(n_p U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \quad (6.7)$$

光伏阵列的输出功率是电流与终端电压的乘积，其数学表达式为：

$$P = n_p I_{ph} U_{pv} - n_p I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s/n_p)}{AKT} \right] - 1 \right\} U_{pv} - \frac{(n_p U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s) U_{pv}}{R_{sh}} \quad (6.8)$$

### 6.2.2 基于单向 DC/DC 变换器的最大功率点跟踪

光伏电池发电系统中，PV 的输出由多种因素决定，如日照强度和环境温度等，在不同的环境中，光伏电池的输出曲线是不同的。在参考温度下 ( $T=25^{\circ}\text{C}$ )，PV 的电压-电流和功率-电压输出曲线如图 6.3 所示。

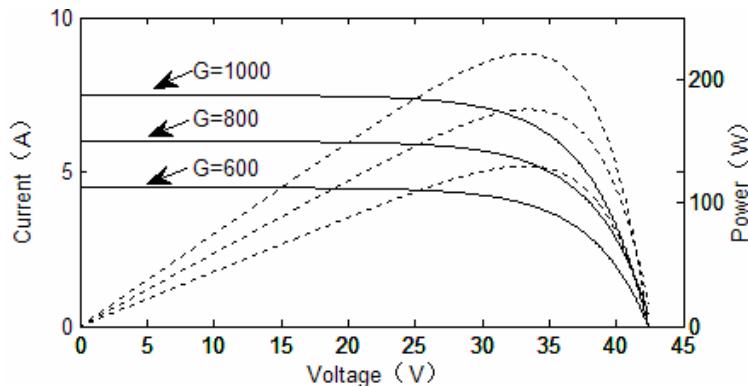


图 6.3 PV 的输出曲线

从图 6.3 可以看出，当日照强度变化时，PV 输出电压和电流呈非线性关系变化，其输出功率也随之改变。PV 是一种非线性直流电源，最大功率点随日照强度和温度的变化而变化，每条曲线都存在一个最大功率点，该功率点对应唯一的电池输出电压。因此若想最大限度地提高 PV 的输出功率，从而显著提高 PV 的工作效率，通过调节 PV 的输出电压使其趋近最大功率点就可以实现最大功率点跟踪。

目前，常用的最大功率点跟踪算法有扰动观测法<sup>[128~130]</sup>、电导增量法<sup>[131,132]</sup>、开路电压法<sup>[133,134]</sup>、神经网络预测法<sup>[135~139]</sup>等。扰动观测法通过成比例的增加或减少变换器的输入电压，移动工作点向最大功率点靠近，其首先初设一个 PV 工作电压，然后通过调节变换器的占空比给 PV 阵列输出电压周期性的扰动，例如使其增加，然后比较扰动前后的 PV 输出功率，如果输出功率也增加，则说明 PV 工作在最大功率点的左侧，应在下一次扰动周期中继续保持当前的扰动方向，即增大光伏电池输出电压；反之亦然。该方法控制简单、容易实现，对参数精度要求也不高，且该方法只需要两个传感器，减少了硬件个数和成本费用，因此是普遍使用的一种方法。

本章采用扰动观测法，通过成比例的增加或减少升压式 DC/DC 变换器的输入电压，移动操作点向最大功率点靠近，同时计算升压变换器的占空比，达到控制光伏阵列始终在最大功率点运行的目的，提高光伏阵列的工作效率，其控制算法流程图如图 6.4 所示<sup>[140]</sup>。

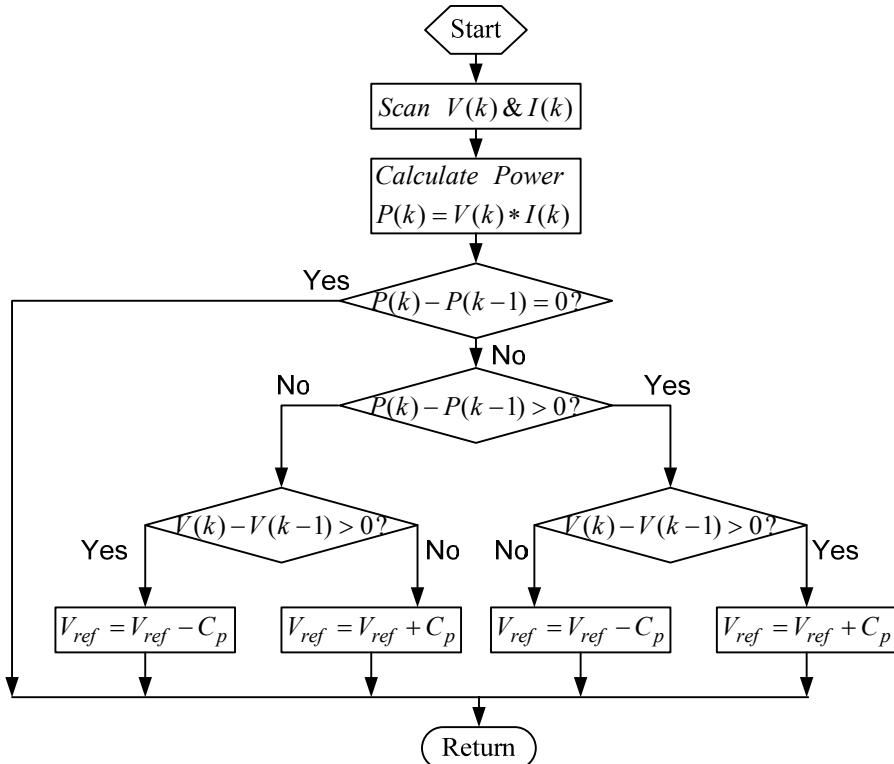


图 6.4 MPPT 控制算法流程图

图 6.4 中  $V(k)$ 、 $I(k)$  是新测量的值，根据这两个值计算功率  $P(k) = V(k)*I(k)$ 。比较  $k$  点与  $k-1$  点功率值的变化，以决定下一步变化的方向。如果功率增加，在搜索方向不变；如果功率减小，在搜索方向相反。 $C_p$  为占空比间隔，决定功率变化的步长，如果步长值较大，则系统响应快，但不准确；如果步长值较小，则系统反应慢，但相对精确。通过对  $V_{ref}$  的不断调整，最终搜索到最大功率点。

扰动观测法的实质是基于光伏输出功率的计算和采样电压和电流值的功率变化，比较前一个和当前的电压值来检测功率变化，计算出参考电压  $V_{ref}$  用于产生 PWM 的控制信号，PWM 模块基于占空比为 DC/DC 变换器产生脉冲信号<sup>[141]</sup>。

受太阳辐射强度和光伏电池温度等因素的影响，光伏阵列输出电压范围很宽，DC/DC 变换器是通过控制电压的方法将不控的直流输入变为可控的直流输出的一种变换电路。在 PV 发电系统中，DC/DC 变换器的作用是从光伏阵列中吸收最大功率并且提升电压。本章采用升压式 DC/DC 变换器（Boost Converter），其等效电路图如图 6.5 所示<sup>[142,143]</sup>，主要由开关管  $S$ 、二极管  $D$ 、输入电感  $L$  和输出电容  $C$  等构成。

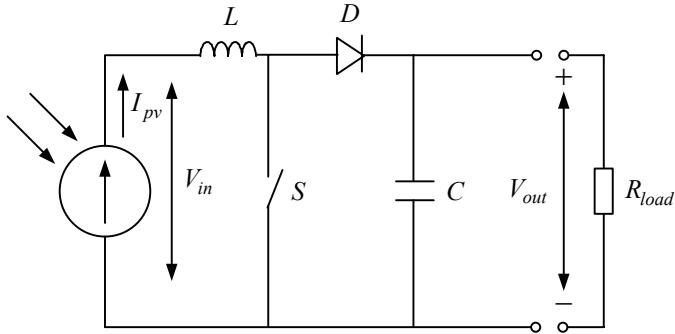


图 6.5 Boost Converter 等效电路图

当 DC/DC 变换器在稳态运行时，感应电压在一个开关周期内的平均值为零，可求出输出电压为：

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (6.9)$$

式中： $V_{out}$  为变换器输出电压； $V_{in}$  为变换器输入电压； $D$  为占空比。

基于开关闭合器的能量存储和能量释放，以及电压电流波动，计算变换器所需要的电容和电感值为：

$$C = \frac{V_{out} TD}{2\Delta V_{out} R_{load}} \quad (6.10)$$

$$L = \frac{2CV_{out}\Delta V_{out}}{2I_{in}\Delta I_{in}} \quad (6.11)$$

式中： $C$  为输出电容； $L$  为输入电感； $T$  为开关周期； $\Delta V_{out}$  为输出电压波动； $R_{load}$  为负载； $I_{in}$  为输入电流； $\Delta I_{in}$  为输出电流波动。

输入和输出电压的关系取决于占空比，假定变换器的效率为 100%，即忽略变换器损耗，输出功率等于输入功率，则可以得到最优负载为：

$$R_{load} = \frac{V_{in}}{I_{in}(1-D)^2} \quad (6.12)$$

基于公式 (6.9) ~ (6.12) 即可求出 DC/DC 变换器的电容值和电感值。

### 6.2.3 基于双向 DC/DC 变换器的蓄电池模型

光伏电池一个重要的特点就是其输出功率受气候条件（光照和温度）影响，为减小这种影响，构建如图 6.1 所示的 PV 发电系统引入蓄电池模块。通过蓄电池与双向 DC/DC 变换器的配合使用，不仅可以向负载提供所需的稳定电压，而且在光照强度较强时，将多余的能量储存起来；当光照强度不够时，释放多余能量，来实现 PV 系统的恒定功率输出。

本章选用如图 6.6 所示的非隔离式结构的双向 DC/DC 变换器<sup>[144]</sup>，其中 T1、T2 为 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）元件，D1、D2 为二极管。

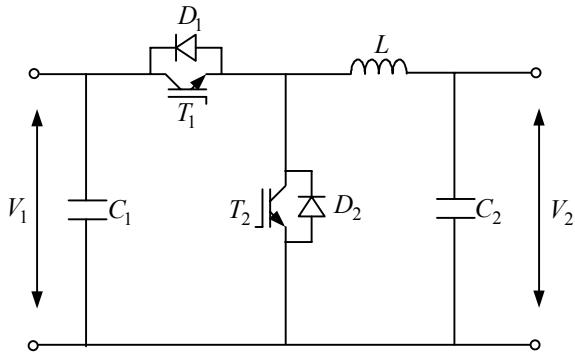


图 6.6 非隔离式双向 DC/DC 变换器

双向 DC/DC 变换器有 Buck 和 Boost 两种工作模式，当光照强度比较强时，恒定功率供给负载后剩余能量从 PV 流向蓄电池，双向 DC/DC 变换器工作在 Buck 模式，蓄电池处于充电状态，对低压端采用电流控制，对蓄电池进行恒流充电；当光照强度较弱时，为保持恒定功率供给负载，能量从蓄电池流向系统，双向 DC/DC 变换器工作在 Boost 模式，蓄电池处于放电状态，采用电压控制，使其高压端输出恒定电压，控制方法参见文献[145]。

蓄电池模型结构如图 6.7 所示<sup>[146]</sup>。

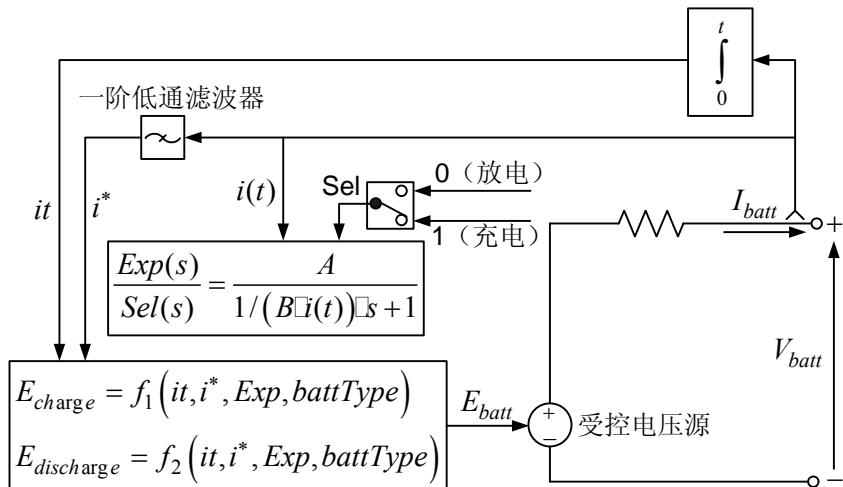


图 6.7 蓄电池模型结构

以铅酸蓄电池为例，图 6.7 中受控电压源的表达式如式 (6.13)、(6.14) 所示。

放电模式 ( $i^* > 0$ ) 下：

$$E_{batt} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sel}(s)} \cdot 0 \right) \quad (6.13)$$

充电模式 ( $i^* < 0$ ) 下：

$$E_{batt} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sel}(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (6.14)$$

式中： $E_{batt}$  为蓄电池非线性电压，V； $E_0$  为蓄电池恒定电压，V； $\text{Exp}(s)$  为指数域动态值，V； $\text{Sel}(s)$  为电池运行模式，0 表示放电，1 表示充电； $K$  为极化常数， $\text{Ah}^{-1}$ ；

$i^*$ 为低频电流动态值, A;  $i$ 为电池电流, A;  $Q$ 为最大电池容量, Ah;  $A$ 为指数电压, V;  $B$ 为指数容量, Ah。

### 6.3 燃料电池发电系统建模

燃料电池发电是在一定条件下使氢气、天然气或煤气等燃料与氧化剂发生电化学反应, 将化学能直接转化为电能的过程。FC 与 PV 一个最大的区别就是不受气候条件等因素影响, 只要燃料和氧化剂供给, FC 就会有持续不断的电力输出, 具有能量转化效率高、洁净、无污染、噪声低等优点。燃料电池发电系统一般由燃料电池堆、DC/DC 变换器、DC/AC 逆变控制模块等构成, 其供电模式如图 6.8 所示。

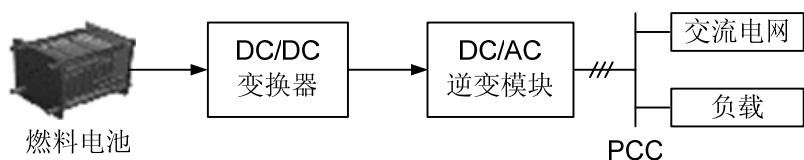


图 6.8 燃料电池发电系统供电模式

图 6.8 所示的 FC 发电系统中 DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器模型与 PV 发电系统一致, 而适用于分布式发电应用的燃料电池有质子交换膜燃料电池(PEMFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC) 和固体氧化物燃料电池(SOFC)<sup>[147,148]</sup>。常用的燃料电池数学模型有机理模型、经验模型和半经验模型, 前面 2 种模型一般比较复杂, 难以操作, 且不适合用于负荷建模的研究。本章以 SOFC 为例, 建立既能简单模拟电池堆性能又能进行负荷建模研究的半经验模型。逆变模块与 PV 发电系统一样, 详细介绍见 6.4 节。

#### 6.3.1 基本假设

本章建立的 SOFC 数学模型基于下面基本假设:

- 1) 气体是理想气体, 燃料为氢气, 氧化剂为氧气;
- 2) 电池工作在恒温, 且温度分布均匀;
- 3) 忽略电池对环境的热量损失;
- 4) 不考虑水管理和系统湿度;
- 5) 可以用能斯特方程来计算电压。

#### 6.3.2 数学模型

##### 6.3.2.1 气体状态方程

根据理想气体状态方程, 可以得到氢气、氧气和水蒸气的偏微分方程<sup>[149]</sup>如式(6.15)所示。

$$\begin{cases} \frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_a} (N_{H_2}^{in} - N_{H_2}^{out} - N_{H_2}^r) \\ \frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{ca}} (N_{O_2}^{in} - N_{O_2}^{out} - N_{O_2}^r) \\ \frac{dP_{H_2O}}{dt} = \frac{RT}{V_a} (N_{H_2O}^{in} - N_{H_2O}^{out} + N_{H_2O}^p) \end{cases} \quad (6.15)$$

式中： $R$  是通用气体常数， $8.314\text{J/mol}\cdot\text{K}$ ； $T$  是工作温度， $\text{K}$ ； $P_{H_2}$ 、 $P_{O_2}$ 、 $P_{H_2O}$  是氢气、氧气、水蒸气的压力， $\text{atm}$ ； $N_{H_2}^{in}$ 、 $N_{O_2}^{in}$ 、 $N_{H_2O}^{in}$  分别为这 3 种气体输入的摩尔流量， $\text{mol/s}$ ，而水蒸气是电池反应时在电池内部产生的； $N_{H_2}^{out}$ 、 $N_{O_2}^{out}$ 、 $N_{H_2O}^{out}$  是这 3 种气体输出的摩尔流量， $\text{mol/s}$ ； $N_{H_2}^r$ 、 $N_{O_2}^r$ 、 $N_{H_2O}^p$  分别为这 3 种气体反应消耗或生成的摩尔流量， $\text{mol/s}$ ； $V_a$ 、 $V_{ca}$  分别为电池阳极、阴极的体积。

根据 FC 原理的电化学关系，得到消耗、生成的气体与电池堆电流关系如式 (6.16) 所示。

$$N_{H_2}^r = 2N_{O_2}^r = N_{H_2O}^p = 2K_r I \quad (6.16)$$

式中： $K_r = N_0/4F$ ， $N_0$  为串联电池的数量； $F$  是法拉第常数， $96487\text{C/mol}$ ； $I$  为 FC 堆电流， $\text{A}$ 。

此外 3 中气体的输出流量可定义为：

$$\begin{cases} N_{H_2}^{out} = K_{H_2} P_{H_2} \\ N_{O_2}^{out} = K_{O_2} P_{O_2} \\ N_{H_2O}^{out} = K_{H_2O} P_{H_2O} \end{cases} \quad (6.17)$$

式中： $K_{H_2}$ 、 $K_{O_2}$ 、 $K_{H_2O}$  是氢气、氧气和水蒸气的阀摩尔常数， $\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{atm})$ 。

将式 (6.16) (6.17) 带入式 (6.15) 得到氢气、氧气和水蒸气的压力：

$$\begin{cases} P_{H_2}(t) = \frac{(N_{H_2}^{in} - 2K_r I)(1 - e^{-t/\tau_{H_2}})}{K_{H_2}} + P_{H_2}(0)e^{-t/\tau_{H_2}} \\ P_{O_2}(t) = \frac{(N_{H_2}^{in}/r_{H-O} - K_r I)(1 - e^{-t/\tau_{O_2}})}{K_{O_2}} + P_{O_2}(0)e^{-t/\tau_{O_2}} \\ P_{H_2O}(t) = \frac{2K_r I(1 - e^{-t/\tau_{H_2O}})}{K_{H_2O}} + P_{H_2O}(0)e^{-t/\tau_{H_2O}} \end{cases} \quad (6.18)$$

式中： $\tau_{H_2}$ 、 $\tau_{O_2}$ 、 $\tau_{H_2O}$  分别是氢气、氧气和水蒸气的响应时间， $\text{s}$ ；且  $\tau_{H_2} = V_a / K_{H_2} RT$ 、 $\tau_{O_2} = V_{ca} / K_{O_2} RT$ 、 $\tau_{H_2O} = V_{ca} / K_{H_2O} RT$ ；从化学反应来看， $r_{H-O}$  的值一般为 2，为了能使氢气完全反应，其值一般小于 2，典型数值  $1 < r_{H-O} < 1.25$ 。

### 6.3.2.2 能斯特电压方程

SOFC 是一个氧浓差电池，其热力学电动势由如式（6.19）的能斯特（Nernst）方程<sup>[150]</sup>给出：

$$E = N_0 [E_0 + \frac{RT}{2F} \ln(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}) + \ln P] \quad (6.19)$$

式中： $E_0$  为开路电池电压，V； $P$  为电池堆系统压力，atm。

### 6.3.2.3 输出电压方程

由于 SOFC 工作温度非常高，需考虑到各种极化损失，一个能较好反映 SOFC 输出电压的经典半经验方程为<sup>[151]</sup>：

$$V_{FC} = E - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (6.20)$$

式中： $V_{act}$ 、 $V_{con}$ 、 $V_{ohm}$  分别表示活性极化损失、浓度极化损失和欧姆极化损失的电势，其经典半经验表达式如下：

$$V_{act} = a + b \log i \quad (6.21)$$

$$V_{con} = -\frac{RT}{2F} \ln(1 - \frac{i}{i_L}) \quad (6.22)$$

$$V_{ohm} = 0.126 I e^{-2870(\frac{1}{1273} - \frac{1}{T})} \quad (6.23)$$

式中： $a$ 、 $b$  分别为 Tafel 常数和 Tafel 斜率，一般  $a = 0.05$ 、 $b = 0.11$ ； $i$ 、 $i_L$  分别为电池的电流密度和极限电流密度，A/cm<sup>2</sup>。

### 6.3.3 SOFC 建模

利用 MATLAB/SIMULINK 工具包构建 SOFC 系统动态模型，如图 6.9 所示。

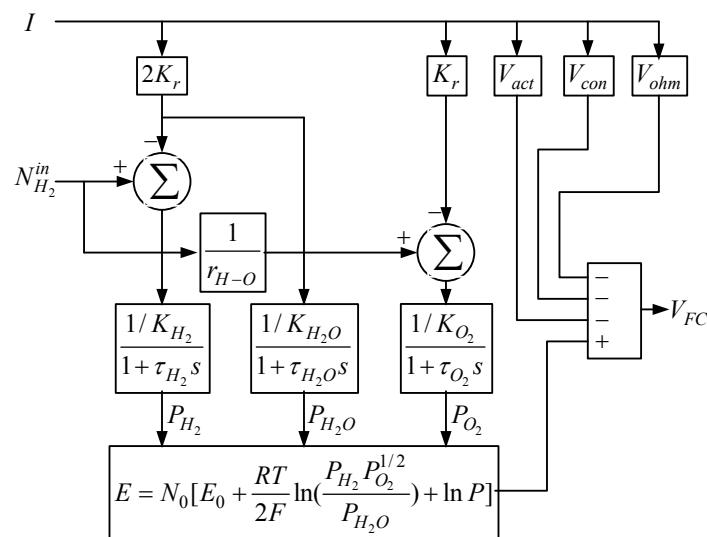


图 6.9 SOFC 系统动态模型

## 6.4 直流分布式电源逆变并网控制

随着目前大力开发可再生能源和保护环境的迫切需要，分布式电源与区域配电网并联运行趋势日益明显。作为典型的分布式电源，通过 6.2~6.3 节的分析可知，光伏电池和燃料电池本身发出的都是直流电，因此要与区域配电网并联运行，必须经过逆变器将直流电转化为工频交流电才能并入电网中，一种典型的直流分布式电源逆变并网示意图如图 6.10 所示<sup>[152]</sup>。

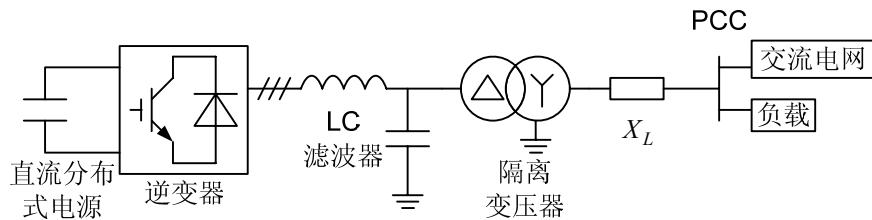


图 6.10 直流分布式电源逆变并网示意图

如何选择适合中小容量分布式电源逆变并网运行控制方法，使其能够保持系统可接受的外特性是解决直流分布式电源应用的关键之一<sup>[153,154]</sup>。美国对分布式电源应用和市场前景的调查表明：电力公司普遍认为从电网角度来看，分布式电源最好能表现的如“负荷”一般<sup>[155,156]</sup>。从我国配电系统的实际情况考虑，认为从公共连接点（Point of Common Coupling, PCC）来看，中小型的分布式电源以恒功率拟负荷的外特性连接到 PCC 处，关系上类似负荷，但并不吸收功率，这样可尽量避免分布式电源直接参与馈线的电压调节<sup>[63]</sup>。基于此，本章采用 PWM 调节的双环串级 PI 控制的电压型逆变器（Voltage Source Inverter, VSI），能按照设定的值向电网输送定量的功率并保持 PCC 的电压在期望的、恰当的范围内<sup>[157]</sup>。控制系统结构如图 6.11 所示，PWM 调节的双环串级 PI 控制框图如图 6.12 所示。

图 6.11、6.12 中的逆变器控制系统主体为功率、电流串级 PI 控制， $d$  轴、 $q$  轴分量分开调节，包含两个反馈环：外环第 1 级功率调节属于稳态调节器，是分布式电源可控负荷外特性的主调节回路，响应相对慢一点；内环第 2 级电流调节属于暂态调节器，是副调节回路，响应速度较快。详细控制方法参见文献[152]。

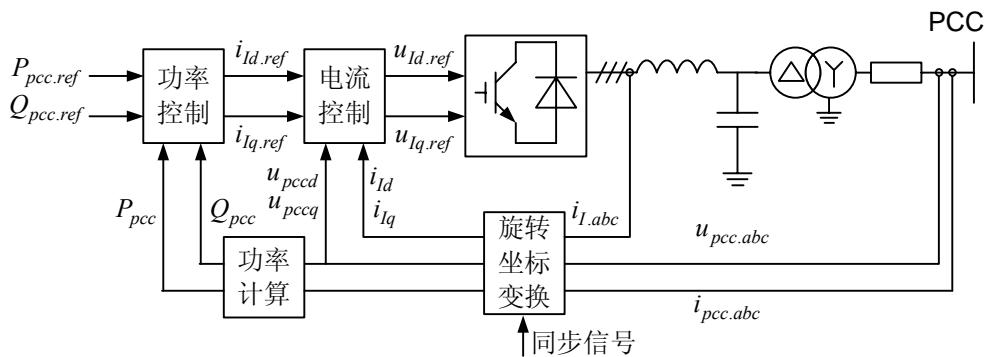


图 6.11 直流分布式电源逆变并网控制系统结构

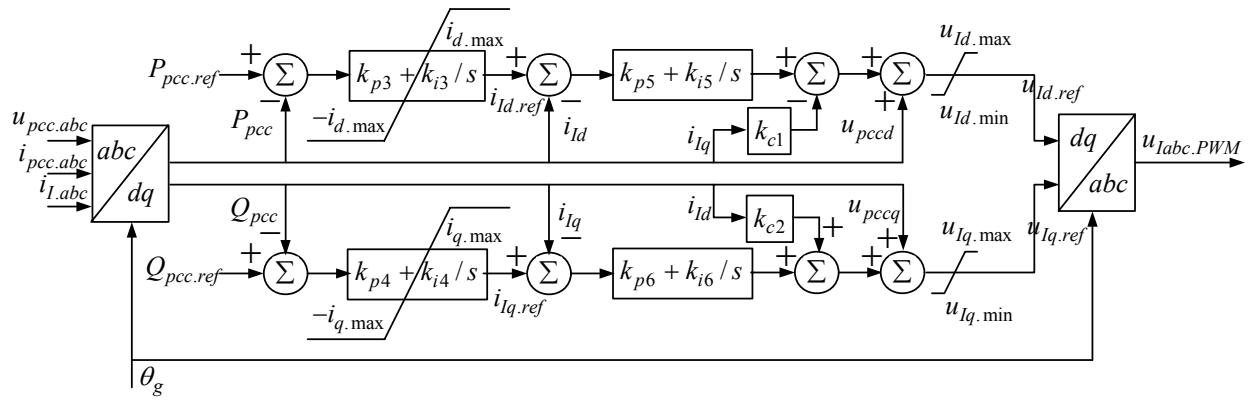


图 6.12 PWM 调节的双环串级 PI 控制框图

图中： $u_{pcc.abc}$ 、 $i_{pcc.abc}$  分别为注入 PCC 的三相电压、电流； $i_{I.abc}$  为逆变器交流侧三相电流； $P_{pcc.ref}$ 、 $Q_{pcc.ref}$  分别为有功、无功参考值； $P_{pcc}$ 、 $Q_{pcc}$  分别为实际注入 PCC 的有功、无功； $i_{Id.ref}$ 、 $i_{Iq.ref}$  分别为逆变器交流侧  $d$  轴、 $q$  轴电流参考值； $i_{Id}$ 、 $i_{Iq}$  分别为逆变器交流侧  $d$  轴、 $q$  轴电流； $u_{pccd}$ 、 $u_{pccq}$  分别为注入 PCC 的  $d$  轴、 $q$  轴电压； $\theta_g$  为同步信号； $u_{Iabc.PWM}$  为逆变器三相脉宽调制信号。

另外，本章考虑的逆变器输出首先要经电感-电容 (LC) 滤波器滤波后，再通过隔离变压器以及一段线路连接到配电网的 PCC，可以有效地提高电能输出质量。其中，LC 滤波器的主要目的是消除围绕开关频率的高次电流谐波；而隔离变压器一方面避免分布式电源的零序或直流分量进入配电系统，另一方面也作为很重要的滤波电抗。

## 6.5 直流分布式电源的等效描述

分布式发电设备种类繁多，其运行特性由于其自身机理特性和控制方式不同而各有差异，而这些特性各异的分布式电源逐渐接入配电系统后，无疑对配电网综合负荷特性产生重要影响。如何建立描述各类分布式电源外特性的等效数学模型是研究考虑分布式发电的配电网综合负荷建模的基础。第 4 章研究了鼠笼式风力发电机组的工作原理与运行特性，提出了可以用异步发电机来等效描述，进而提出了任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型来描述含 WG 的配电网综合负荷特性。延续此研究思路，本节首先在 6.2~6.4 节研究的 PV 和 FC 工作原理、运行特性、控制方式的基础上，建立能准确描述其外特性的等效数学模型，通过计算机仿真实验验证模型的有效性。

### 6.5.1 PV 的等效描述

电力系统负荷建模主要是为电力系统暂态仿真服务的，因此在建立能准确描述各类分布式电源外特性的等效数学模型时，需要从静态特性和动态特性两个方面进行综合分析。

### 6.5.1.1 稳态运行中 PV 的静态特性

由图 6.3 可知, PV 的电压-电流特性近似为一矩形, 即低压段近似为恒流源, 接近开路电压时近似为恒压源。经过 MPPT 和单向 DC/DC 变换控制之后, 通过控制电压的方法, 可将不可控的直流输入变为可控的直流输出, 即直流输出电压基本恒定在设定值范围。然而, 由于 PV 发电系统受气候条件(日照和温度)的影响, 通过 MPPT 和单向 DC/DC 变换控制后虽能较好地控制其直流输出电压恒定, 但直流输出电流受气候因素影响较大, 从而直流输出功率也随气候条件而波动。为很好地保证 PV 发电系统的拟负荷外特性, 在本文建立的等效仿真模型中特增加了蓄电池模块, 以保证其直流输出功率恒定。当日照较强时, 利用双向 DC/DC 变换控制, 在保证恒定直流功率输出的基础上, 将剩余电量储存到蓄电池中; 当日照较弱时, 则使蓄电池处于放电状态, 从而保证恒定的直流功率输出。因此, 稳态运行情况下, 可将增加了蓄电池模块并考虑了 MPPT 和 DC/DC 变换控制之后的 PV 等效为恒定直流功率输出的电压源。同时, 当 PV 通过逆变器并网之后, 采用 6.4 节的控制方法, 可以实现恒定的交流功率输出。

### 6.5.1.2 暂态过程中 PV 的动态特性

当外部系统发生故障时, 根据上面的稳态情况分析可知, 由于 PV 是一个直流性电源, 没有旋转机械, 其输出功率仅与气候条件(光照和温度)有关, 而相当于配电网暂态过程百毫秒级的时间常数而言, 气候条件的变化至少是数十秒, 甚至分钟、小时级的时间常数, 然而就负荷建模而言, 当用于电力系统稳定(机电暂态)仿真研究时, 其关注的重点往往是在很短的暂态过程中所表征的负荷特性(暂态稳定所对应的大扰动持续时间一般在 0.1s~0.5s 范围内)。因此, 当 PV 作为广义综合负荷的组成部分时, 在所研究的暂态过程时段内, 从宏观的角度(短期可预测范围内), 可以假设光照和温度等气候条件在所研究的时段内, 保持不变, 从而输出功率恒定。因而, 基于上述假设, 暂态过程中 PV 具有与稳态运行的静态特性一致的动态特性。

综上所述, PV 作为典型的直流分布式电源, 通过 MPPT、DC/DC 和 DC/AC 变换控制, 同时增加蓄电池模块之后, 在稳态运行的过程中可以等效为恒功率输出的电压源; 而在面向电力系统暂态仿真的负荷建模研究中, 基于暂态过程气候条件不变的假设, PV 可以看作一个功率消耗为负的等效广义静态负荷, 当其作为广义综合负荷的组成部分时, 可以用恒功率的静态负荷模型来等效描述。

## 6.5.2 FC 的等效描述

### 6.5.2.1 稳态运行中 FC 的静态特性

可能影响燃料电池性能的一个重要运行变量是它的利用率  $u$ , 它可以定义为:

$$u = \frac{N_{H_2}^{in} - N_{H_2}^{out}}{N_{H_2}^{in}} = \frac{N_{H_2}^r}{N_{H_2}^{in}} = \frac{2K_r I}{N_{H_2}^{in}} \quad (6.24)$$

从式 (6.24) 可以得到：

$$I = u N_{H_2}^{in} / 2K_r \quad (6.25)$$

研究表明，从经济性和电池效率分析，利用率一般在 0.7~0.9 范围内，而其稳态利用率一般为 0.8 左右<sup>[158]</sup>。

由 6.3 节所建 FC 的数学模型可知，FC 的电压-电流和功率-电压稳态曲线如图 6.13 所示。

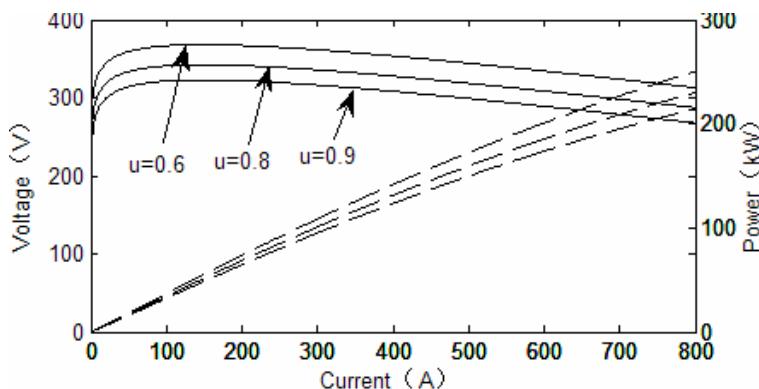


图 6.13 FC 的稳态特性

由图 6.13 可知，FC 的电压-电流特性具有如下特征：电压随电流的增大而降低；随燃料利用率  $u$  的增大而下降；但当  $u$  一定时，随电流的增大，电压下降并不明显。经过 DC/DC 变换控制之后，可以将 FC 的直流输出电压恒定在设定值范围，直流输出电流受输入氢气的摩尔流量影响，氢气输入量越大，电流越大，输出的直流功率也越大。但是当氢气输入量恒定时，FC 的直流输出功率也恒定。因此，可将考虑了 DC/DC 变换控制之后 FC 等效为恒定直流功率输出的电压源。同样，与 PV 发电系统类似，当 FC 通过逆变器并网之后，采用 6.4 节的控制方法，可以实现恒定的交流功率输出。

### 6.5.2.2 暂态过程中 FC 的动态特性

当外部系统发生故障时，与 PV 类似，FC 也是一个直流性电源，没有旋转机械，根据上面的稳态情况分析可知，其直流输出功率仅与输入的氢气量和利用率有关，且 FC 的重整器和堆动态时间常数一般达到数十秒甚至百秒级，相对暂态过程 ms 级的时间常数而言，这种暂态过程对 FC 发电系统的影响甚微。因而，当输入氢气量恒定时，在暂态研究过程中，FC 的输出功率也是恒定的，即暂态过程中 FC 也具有与稳态运行的静态特性一致的动态特性。

综上所述，FC 作为典型的直流分布式电源，通过 DC/DC 和 DC/AC 变换控制

之后，在稳态运行的过程中可以等效为恒功率输出的电压源；而在面向电力系统暂态仿真的负荷建模研究中，与 PV 发电系统类似，FC 同样可以看作一个功率消耗为负的等效广义静态负荷，当其作为广义综合负荷的组成部分时，同样可以用恒功率的静态负荷模型来等效描述。

### 6.5.3 仿真检验

为验证上述建立的恒功率模型对 PV 和 FC 直流分布式电源等效描述的有效性，选择一系列的扰动试验来检验模型的有效性，包括：气候条件变化、PCC 附近负荷扰动、分布式电源参考出力信号变化、馈线短路故障等。

#### 6.5.3.1 仿真系统及各模块主要参数

基于 MATLAB/SIMULINK 搭建如图 6.10 所示的仿真系统，其中直流分布式电源分别用 6.2 节构建的如图 6.2 所示的 PV 发电系统和 6.3 节构建的如图 6.8 所示的 FC 发电系统代替，交流电网用无穷大电源等效，各模块主要参考参数如下。

##### 1) PV 发电系统

单个光伏电池以尚德公司 STP220S-24/vb 型单晶硅电池为对象，在标准测试环境下 ( $G = 1000\text{W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ) 其主要参数为： $V_m=34\text{V}$ ,  $I_m=6.47\text{A}$ ,  $I_{SCR}=7.48\text{A}$ ,  $U_{oc}=42.4\text{V}$ ,  $P_{mpp}=220\text{W}$ ; PV 阵列并联 70 组，每组串联 30 个。

##### 2) FC 发电系统

单个燃料电池组主要参数为： $T=1273\text{K}$ ,  $P=1\text{atm}$ ,  $E_0=0.938\text{V}$ ,  $N_0=384$ ,  $K_r=0.996$ ,  $K_{H_2}=0.843\text{mol/(s\cdot atm)}$ ,  $K_{O_2}=2.52\text{mol/(s\cdot atm)}$ ,  $K_{H_2O}=0.281\text{mol/(s\cdot atm)}$ ,  $\tau_{H_2}=26.1\text{s}$ ,  $\tau_{O_2}=2.91\text{s}$ ,  $\tau_{H_2O}=78.3\text{s}$ ,  $r_{H-O}=1.145$ ,  $i_L=0.8\text{A/cm}^2$ 。

##### 3) 逆变并网控制系统

逆变器输出额定线电压为 480V，直流侧电压为 1kV，逆变器开关频率为 1.5kHz；LC 滤波器参数为 1mH, 70μF；隔离变压器采用 Yd1 接线，10kV/480V, 2.5MVA,  $r_T=1\%$ ,  $x_T=6\%$ ；连接到 PCC 的线路参数为  $0.1\Omega$ , 1mH。

#### 6.5.3.2 气候变化与负荷扰动

以 PV 发电系统为例，设定其向系统输送 100kW 的功率，假设从  $t = 0$  时刻开始，直到  $t = 4\text{s}$  前，气候条件为  $G = 1000\text{W/m}^2$  和  $T = 25^\circ\text{C}$ , PCC 附近负荷为  $P = 10\text{kW}$  和  $Q = 5\text{kvar}$ ； $t = 4\text{s}$  时刻，气候条件发生改变 ( $G = 400\text{W/m}^2$  和  $T = 25^\circ\text{C}$ )，负荷不变； $t = 8\text{s}$  时刻，负荷发生改变 ( $P = 20\text{kW}$  和  $Q = 12\text{kvar}$ )，气候条件不变。针对上述变化过程，进行仿真计算，观察 PV 系统直流电压、PCC 的电压和 PV 发电系统向系统输送功率的变化情况，如图 6.14 所示，图中各量均采用标幺值，为便于比较分析，假设基准值均为其稳态运行情况下的额定值（下同）。

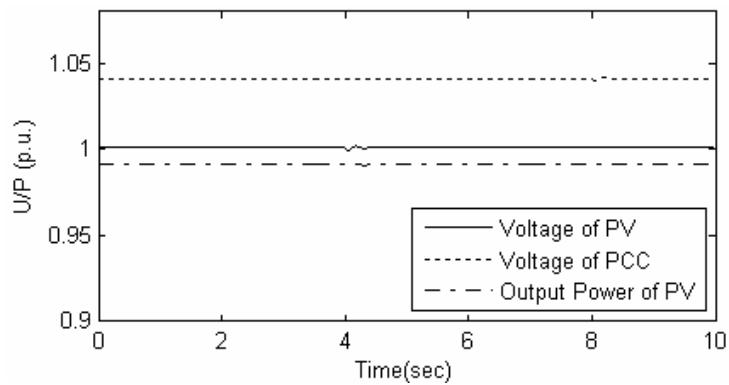


图 6.14 气候变化和负荷扰动下变化曲线

从图 6.14 可以看出，稳态运行过程中，PV 的直流输出电压和输出功率基本维持恒定，仅在气候变化的时候有细微的动态过程，但很快恢复额定值，PCC 附近负荷扰动对此无影响；PCC 处电压也基本维持恒定，仅在负荷扰动时有细微的动态过程，而气候变化对此没有影响。因此，6.2 节构建的 PV 发电系统在气候变化和负荷扰动时，基本能维持电压和输出功率恒定的特性，用恒功率输出的电压源来等效描述是可行的。同样，6.3 节构建的 FC 发电系统在 PCC 负荷扰动时，也具有上述特性，限于篇幅，不再赘述。

#### 6.5.3.3 参考出力信号变化

假设逆变系统的外特性功率参考信号在 1s 内连续发生 2 次阶跃，因本章采用的逆变控制器中有功出力和无功出力可以相应独立调节。为便于观察，将有功、无功的阶跃时间相错开，分布式电源外特性跟踪保持曲线如图 6.15 所示。

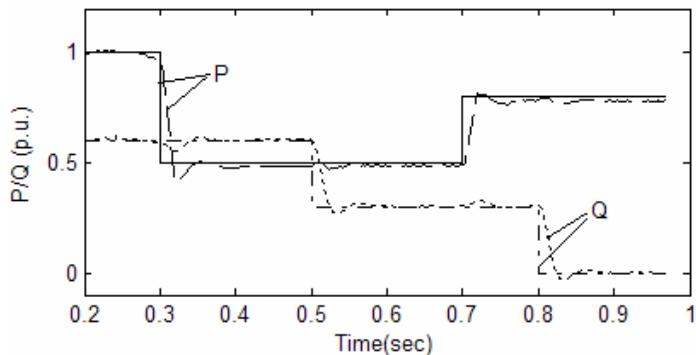


图 6.15 功率跟随参考信号变化曲线

从图 6.15 可以看出，采用 6.4 节设计的逆变器控制系统，无论是针对 PV 还是 FC 发电系统，其向系统输送的有功功率和无功功率均能在较短的时间内跟随外特性变化的要求，具备良好的维持功率能力。外特性跟随过程中，虽然有功、无功调节可以相对独立进行，然而调节过程中两者之间不可避免地存在细微的干扰，但其影响基本可以忽略不计。因此，PV 和 FC 直流分布式电源均能很好地跟随可行运行范围内功率的变化，这说明 6.4 节所设计的 PWM 串级 PI 外特性控制器是

完全可行的，即直流分布式电源可以实现恒功率源的拟负荷外特性。

#### 6.5.3.4 馈线短路故障

以 FC 发电系统为例，假设在稳定运行之后，系统侧发生三相短路故障，持续 0.1s 恢复，观察 PCC 电压和 FC 向系统输出功率的变化，如图 6.16 所示。

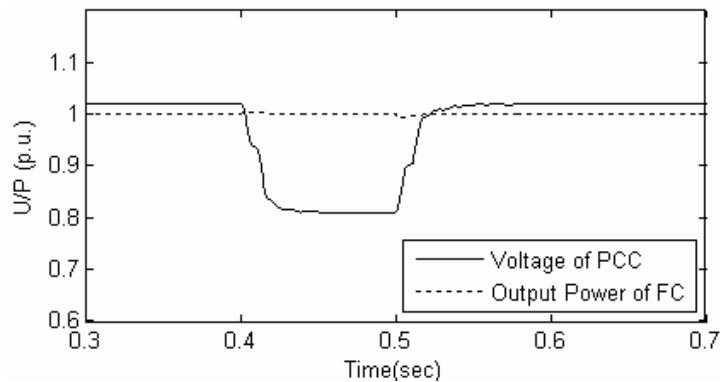


图 6.16 暂态过程电压、功率变化曲线

从图 6.16 可以看出，当系统侧发生三相短路故障时，PCC 处电压受影响比较大，而 FC 向系统输出的功率基本维持恒定，这充分说明在面向电力系统暂态仿真的负荷建模研究中，在所研究的暂态过程时段内（通常为百 ms 级），FC 的出力能维持不变，同样，暂态过程中 PV 也具有上述特性。因此，前面提出的在负荷建模研究中，PV 和 FC 直流分布式电源可以看作一个功率消耗为负的广义静态负荷，用恒功率模型来等效描述，是完全可行的。

## 6.6 考虑直流分布式电源的广义综合负荷模型

为准确反应直流分布式电源接入配电系统后对配电网综合负荷特性的影响，在提出直流分布式电源等效描述模型的基础上，建立考虑直流分布式电源的广义综合负荷模型，基于大量的仿真计算验证模型的有效性。

### 6.6.1 模型结构及其解析描述

#### 6.6.1.1 模型结构

通过上述分析可知，PV 和 FC 的典型直流分布式发电系统，无论在稳态运行还是暂态过程，均能实现恒功率源的拟负荷外特性。根据直流分布式电源的这种拟负荷外特性，当研究考虑 PV 和 FC 的典型直流分布式电源的配电网综合负荷建模时，可以将直流分布式电源看作一个功率消耗为负的广义静态负荷，当其作为配电网综合负荷的组成部分时，可以用恒功率的广义静态负荷模型来等效描述。基于此，本文提出图 6.17 所示的等效静态负荷并联感应电动机的广义综合负荷模型来描述含直流分布式电源的配电网综合负荷特性。

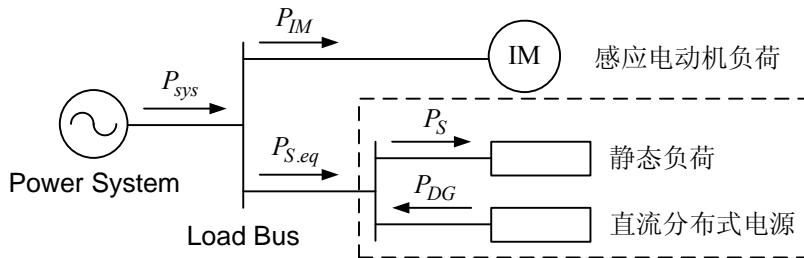


图 6.17 考虑直流分布式电源的广义综合负荷模型结构

图 6.17 中,  $P_{IM}$ 、 $P_S$ 、 $P_{DG}$  分别表示感应电动机负荷功率、静态负荷功率、直流分布式发电出力; 将直流分布式电源出力和静态负荷合成为等效静态负荷, 负荷功率用  $P_{S.eq}$  表示; 系统供给负荷为  $P_{sys}$ 。上述各功率参考方向定义如图 6.17 所示, 图中仅标出了有功功率参考方向, 无功功率类似。

### 6.6.1.2 动静比例

由于直流分布式电源的接入会直接影响配电网综合负荷中静态负荷所占的比例, 从而影响综合负荷特性, 参考传统综合负荷模型惯用定义方式, 定义考虑直流分布式电源的广义综合负荷模型中动静比例  $K_m''$  如式 (6.26) 所示, 式中各量均表示对应的初始稳态量, 为表述的方便, 均直接用变量表述 (下同)。

$$K_m'' = \frac{P_{IM}}{P_{sys}} = \frac{P_{IM}}{P_{IM} + P_{S.eq}} = \frac{P_{IM}}{P_{IM} + (P_S - P_{DG})} \quad (6.26)$$

传统综合负荷模型中,  $K_m''$  的取值范围为  $[0,1]$ , 但考虑了 PV 和 FC 等直流分布式电源的广义综合负荷模型中, 其  $K_m''$  的取值范围根据实际运行方式分下列三种情况:

- 1)  $P_{DG} < P_S$ , 即直流分布式电源的出力不足以供给静态负荷, 此时  $P_{S.eq} > 0$ 、 $P_{sys} > 0$ , 则有  $0 < K_m'' < 1$ ;
- 2)  $P_S \leq P_{DG} < P_S + P_{IM}$ , 即直流分布式电源的出力足以供给静态负荷但不足以供给总负荷, 此时  $P_{S.eq} \leq 0$ 、 $P_{sys} > 0$ , 则有  $K_m'' \geq 1$ ;
- 3)  $P_{DG} \geq P_S + P_{IM}$ , 即直流分布式电源的出力足以供给总负荷, 此时  $P_{S.eq} \leq 0$ 、 $P_{sys} \leq 0$ , 则有  $K_m'' \leq 0$ 。

通常运行状况下, PV 和 FC 一般作为小容量的分布式电源接入配电网, 因此上述前两种运行方式最为普遍, 针对这两种运行方式, 当直流分布式电源出力逐渐增加时, 等效静态负荷逐步减小, 而广义综合负荷模型的动静比例 (动态负荷所占比例) 递增。

### 6.6.1.3 等效静态负荷描述

图 6.17 所示的模型结构中, 感应电动机负荷与传统模型描述一致, 均可用式 (3.13) ~ (3.15) 描述。而当静态负荷采用多项式模型 (ZIP) 时, 传统综合负荷中静态功率可表示为:

$$\begin{cases} P = P_0 [a_p(U/U_0)^2 + b_p(U/U_0) + c_p] \\ Q = Q_0 [a_q(U/U_0)^2 + b_q(U/U_0) + c_q] \end{cases} \quad (6.27)$$

式中： $U_0$ 、 $P_0$  和  $Q_0$  分别为初始稳态电压、有功和无功； $U$ 、 $P$  和  $Q$  分别为实际电压、有功和无功；系数  $a$ 、 $b$  和  $c$  分别为恒阻抗、恒电流和恒功率负荷所占比例。

传统综合负荷模型中，模型辨识静态部分需要满足如下约束（以有功为例）。

$$\begin{cases} a_p + b_p + c_p = 1 \\ a_p \geq 0, b_p \geq 0, c_p \geq 0 \end{cases} \quad (6.28)$$

应当强调指出，本文提出的模型中，尽管等效静态负荷的描述形式与传统的静态负荷描述相同，但是考虑直流分布式电源的广义综合负荷模型中，系数  $a_p$ 、 $b_p$  和  $c_p$  不再受式（6.28）中的不等式约束，仅满足等式约束，因此计算结果有可能为负。且随着直流分布式电源出力的增加， $c_p$  逐渐减小， $a_p$ 、 $b_p$  逐渐增大。

综上所示，采用如图 6.17 的考虑直流分布式电源的广义综合负荷模型结构来描述含 PV 和 FC 的配电网综合负荷时，影响其特性的关键参数——动静比例  $K_m''$  随着接入的直流分布式电源容量的增加， $K_m''$  的值越来越大（ $K_m''$  为正的情况下），且静态负荷参数  $c_p$  逐渐减小， $a_p$ 、 $b_p$  逐渐增大。

## 6.6.2 仿真实验与建模结果

### 6.6.2.1 仿真系统与仿真方法

选用如图 6.18 所示的配电网作为仿真算例，系统等值以及负荷数值在图中标出，B1 母线作为综合负荷母线。仿真系统感应电动机和静态负荷主要参数如表 6.1 所示。

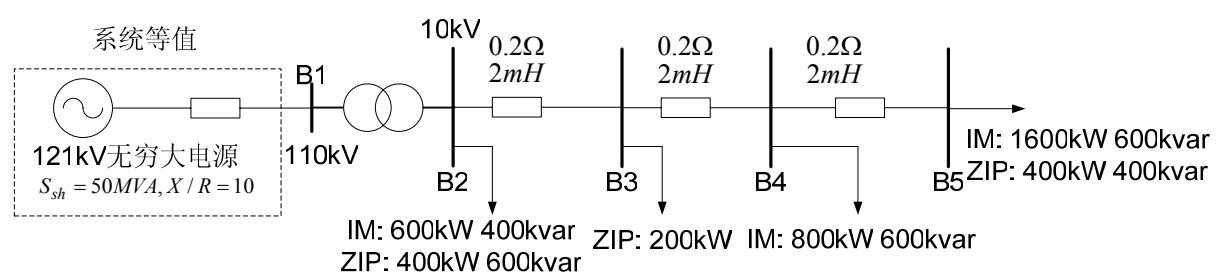


图 6.18 仿真系统单线示意图

基于 MATLAB/SIMULINK 搭建如图 6.18 的仿真系统，在 B3 和 B4 母线分别接入 PV 和 FC 直流分布式电源，假设无穷大系统发生故障（持续时间 0.2s），电压降低 20%左右，进行电力系统暂态仿真，可获得扰动下系统侧传输到配网侧负荷母线的有功功率、无功功率和电压的动态特性数据，以此作为基于总体测辨法的配电网综合负荷建模参数辨识所需要的实测数据。根据这些数据辨识负荷模型

的等值参数，然后再计算综合负荷模型的动态响应，与原始测量的数据进行比较分析。

表 6.1 仿真系统感应电动机和静态负荷主要参数

参数	B2	B3	B4	B5
$R_s$	0.031	/	0.035	0.031
$X_s$	0.067	/	0.094	0.100
$X_m$	3.800	/	2.800	3.200
$R_r$	0.009	/	0.048	0.018
$X_r$	0.170	/	0.163	0.180
$H$	1.500	/	0.750	0.750
$A$	1.000	/	1.000	1.000
$B$	0	/	0	0
$C$	0	/	0	0
$a_P$	0	0.300	/	1.000
$b_P$	0.300	0.200	/	0
$c_P$	0.700	0.500	/	0
$a_Q$	0.500	/	/	0.200
$b_Q$	0.200	/	/	0
$c_Q$	0.300	/	/	0.800

### 6.6.2.2 建模结果

在第 3 章提出的考虑配电网络参数的综合负荷模型的基础上，考虑直流分布式发电的影响，采用第二章的总体测辨负荷建模方法，对三个样本（样本①：未接直流分布式电源；样本②：PV 和 FC 分别输入 200kW 功率；样本③：PV 和 FC 分别输入 400kW 功率）进行总体测辨建模，为便于针对性观察，逆变并网控制的 PV 和 FC 仅向系统输送有功。模型待辨识参数为：

$$\boldsymbol{\alpha} = \left[ R_e \ X_e \ k_q \ R_s \ X_s \ X_m \ R_r \ X_r \ T_j \ A \ B \ a_p \ b_p \ a_q \ b_q \ K \ K_m'' \right]^T, \text{ 且 } K_m'' \in (-\infty, +\infty)$$

建模结果如图 6.19~6.21 所示，辨识参数见表 6.2 所示。

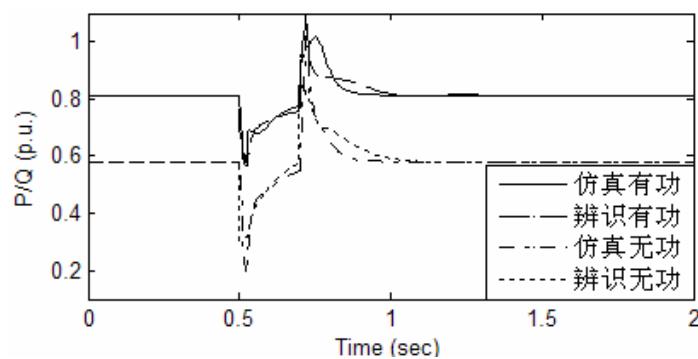


图 6.19 样本①仿真实测与模型响应拟合曲线

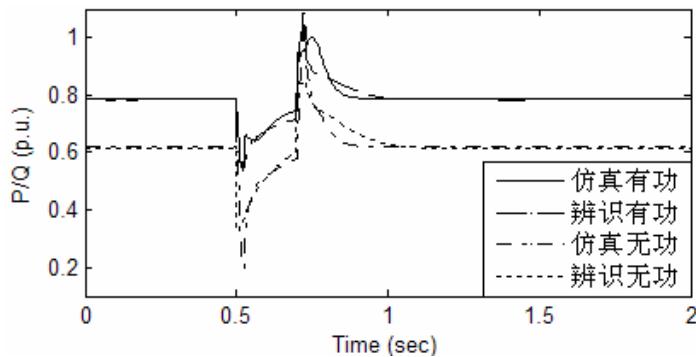


图 6.20 样本②仿真实测与模型响应拟合曲线

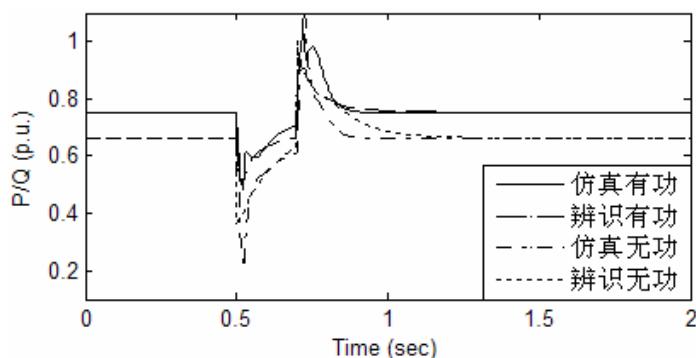


图 6.21 样本③仿真实测与模型响应拟合曲线

表 6.2 考虑直流分布式电源的模型辨识参数

样本	$R_e$	$X_e$	$k_q$	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$	$T_j$	$A$	$B$	$a_p$	$b_p$	$a_q$	$b_q$	$K$	$K_m''$	$E_r$
①	0.255	0.023	1.760	0.028	0.499	3.037	0.040	0.179	2.473	1	0	0.478	0.167	0.411	0.103	1.248	0.682	0.001392
②	0.206	0.025	2.509	0.034	0.479	2.530	0.034	0.153	2.515	1	0	0.849	0.345	0.409	0.098	1.367	0.757	0.001460
③	0.188	0.021	2.392	0.031	0.493	2.701	0.026	0.125	2.681	1	0	2.226	0.734	0.425	0.116	1.144	0.852	0.001670

### 6.6.3 模型适应性检验

基于上述建模结果，现就本章提出的“考虑直流分布式电源的等效静态负荷并联感应电动机的广义综合负荷模型”的描述能力、参数变化规律、泛化能力等问题简要讨论如下。

#### 6.6.3.1 模型的自描述能力

通过图 6.19~6.21 对三个样本建模所得的仿真实测与模型响应拟合曲线可以看出，样本②（直流分布式电源占总负荷比例约 10%）和样本③（直流分布式电源占总负荷比例约 20%）的仿真实测与模型响应曲线拟合效果与样本①（未接入直流分布式电源）基本一致，均能很好地拟合，直观说明 6.6.1 节提出的广义综合负荷模型能较好地描述含直流分布式电源的配电网综合负荷特性。同时，从表 6.2 所示的相对拟合误差来看，三个样本均维持在较小的范围内，仅随着接入的直流分布式电源容量的增加而略有增大。

### 6.6.3.2 模型的参数变化规律

通过表 6.2 所示的模型辨识参数可以看出，所有辨识参数中，变化较为明显的参数 ( $a_p$ 、 $b_p$  和  $K_m''$ ) 正是由于直流分布式电源的接入造成的，其他配网参数和感应电动机参数受直流分布式电源的接入影响不大，基本稳定。而  $a_p$ 、 $b_p$  和  $K_m''$  的变化趋势，随着直流分布式电源接入容量的增加，均呈增大的趋势，而  $c_p$  由  $0.355 \rightarrow -0.194 \rightarrow -1.96$  呈逐渐下降的趋势，且当直流分布式电源的出力超过静态负荷中恒功率负荷时为负值，这充分说明直流分布式电源的接入对恒功率静态负荷的影响最为明显，即本章提出的用恒功率模型来等效描述直流分布式电源是可行的。

### 6.6.3.3 模型的泛化能力

针对上述 3 种运行方式，在设置故障仿真时使图 6.18 所示的仿真系统中 B1 母线的电压分别下降 10%、15%、20%、25%、30% 进行电力系统暂态仿真，获取模型辨识所需的负荷特性数据样本。分别作对样本 20% 下辨识所得的参数模型在样本 10% 之激励作用下的模型响应曲线（内插能力验证）和对样本 20% 下辨识所得的参数样本在 30% 之激励作用下的模型响应曲线（外推能力验证）。图 6.22 和图 6.23 分别给出了样本②下内插和外推能力验证。

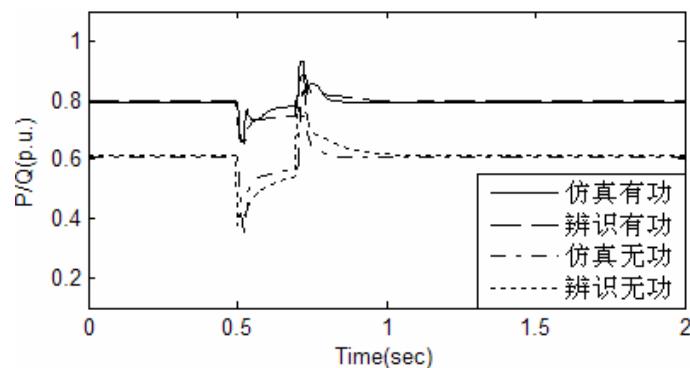


图 6.22 样本②下内插能力验证

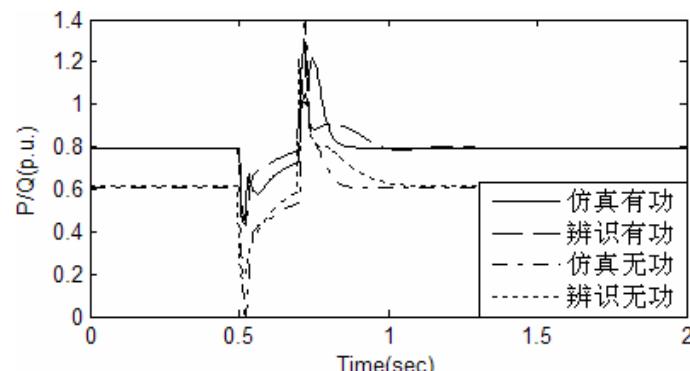


图 6.23 样本②下外推能力验证

从图 6.22 和 6.23 在样本②下内插和外推的曲线拟合效果来看，虽然内插外推检验样本与建模样本之电压激励幅度相差悬殊， $|\Delta V_{10\%}|=50\%|\Delta V_{20\%}|$ ， $|\Delta V_{30\%}|=150\%|\Delta V_{20\%}|$ ，但该模型对内插、外推样本的实测响应均能很好地拟合。同时，表 6.3 列出了不同情况下的内插外推响应相对拟合误差数据，充分表明该综合负荷模型有较好的泛化能力。

表 6.3 内插、外推验证相对拟合误差

样本	相对拟合误差			
	内插 10%	内插 15%	外推 25%	外推 30%
①	0.001235	0.001547	0.001785	0.001953
②	0.001647	0.001964	0.002167	0.002357
③	0.001876	0.002037	0.002374	0.002577

#### 6.6.4 讨论

以上数据分析与拟合效果表明，当 PV 和 FC 等典型直流分布式电源接入配电网后，采用等效静态负荷并联感应电动机的广义综合负荷模型结构能较好地拟合含直流分布式电源的配电网综合负荷动态特性，且该模型具有较好的自描述能力和泛化能力。同时，通过辨识参数的变化规律性分析可知，直流分布式电源的接入对动静比例  $K_m''$  和静态负荷中恒阻抗、恒电流、恒功率的权重系数  $a_p$ 、 $b_p$  和  $c_p$  影响较大，且随着接入容量的增大而规律性变化，这种变化规律与本章提出的用恒功率的广义静态负荷模型来等效描述 PV 和 FC 直流分布式电源是相符的。因此，PV 和 FC 等直流分布式电源接入配电网后，可以看作一个功率消耗为负的广义静态负荷，在负荷建模研究中，可以用恒功率的静态负荷模型来等效描述，进而用等效静态负荷并联感应电动机的广义综合负荷模型来描述含直流分布式电源的配电网综合负荷特性是合理有效的。

### 6.7 本章小结

本章首先基于构建的 PV 和 FC 并网发电系统，建立了面向负荷建模的 PV 和 FC 模型，并对 PV 和 FC 等直流分布式电源的逆变并网控制进行了详细的阐述；通过对 PV 和 FC 工作原理、运行特性和控制方式的研究，提出恒功率源的拟负荷外特性等效描述模型，进而指出在负荷建模的研究中可以看做功率消耗为负的恒功率广义静态负荷；基于此，提出等效静态负荷并联感应电动机的广义综合负荷模型来描述含 PV 和 FC 等典型直流分布式电源的配电网综合负荷特性；针对直流分布式电源接入容量的不同，对三个样本进行了总体测辨建模研究，通过模型自描述能力、泛化能力和影响其综合负荷特性的关键参数（动静比例和 ZIP 静态负荷系数）的变化规律分析，验证了本章所提出来的广义综合负荷模型的有效性。

# 第 7 章 考虑微型燃气轮机的配电网综合负荷建模研究

## 7.1 前言

微型燃气轮机（Microturbine，MT）以可燃性气体或液体为燃料，可同时产生热能和电能，具有排放少、效率高、安装方便、维护简单等特点，作为一种典型的分布式发电设备正日益受到重视<sup>[159~164]</sup>。MT 作为典型的小容量分布式电源，大多接入电网 10kV 及以下配网侧，与 PV 和 FC 一样，自然也成为配电网综合负荷的一部分。因此，在鼓励分布式发电高渗透率的大环境下，研究考虑 MT 接入配电网的综合负荷建模非常重要。

考虑 MT 的配电网综合负荷建模研究工作与 PV 和 FC 等直流分布式电源一样，同样面临两个亟待解决的问题：其一，基于总体测辨法的负荷建模需要大量的仿真计算，而仿真计算所需的 MT 模型如何建立？是否适合负荷建模？其二，作为配电网综合负荷的一部分，MT 如何等效？作为广义上的负荷是等效为动态负荷还是静态负荷，模型又如何？针对上述问题一，文献[165]基于模块化建立了 MT 的六阶系统模型；文献[166]在分析单循环重载 MT 的基础上，建立了用于动态仿真的 MT 单循环数学模型；文献[167]设计了一种新的神经网络 PID 控制为主的微型燃气轮机控制系统；文献[168]建立了简化的 MT 发电系统，并分析了其联网动态特性；文献[169]分析了联网和孤立运行的 MT 动态行为。这些文献一方面侧重于 MT 自身的动态行为研究，另一方面则侧重于与电网连接的动态行为研究。前者模型复杂，在电力系统仿真计算应用有较大的困难，不适合负荷建模的研究；后者过于简化，未考虑 MT 自身的动态特性。缺乏一种既能准确反映 MT 自身特性，又能适合负荷建模所需的并网仿真的模型体系。而针对问题二的研究尚属空白。

本章在研究 MT 自身机理特性和运行控制方式的基础上，构建适合作为分布式发电的 MT 发电系统，建立既能反映其机理特性又适合负荷建模研究的等值模型；在此基础上，通过其稳态和暂态特性的分析，提出适合描述其外特性的等效描述模型，进而提出考虑 MT 的广义综合负荷模型结构，通过计算机仿真和辨识建模对其进行有效性检验。

## 7.2 微型燃气轮机发电系统建模

常用 MT 发电系统主要有两类<sup>[170]</sup>：第一类是通过齿轮箱将额定转速为 3600rpm 的汽轮机与传统的发电机相连，这种 MT 并网时不需要额外的电力电子接

口，但由于齿轮箱维护费用高昂而应用范围有限；第二类是采用单轴结构，通过压缩机涡轮产生的转矩驱动高速发电机发电，此类 MT 发电系统产生的三相交流电频率高达 1500-4000Hz，需要通过整流逆变装置并网，但与使用齿轮箱相比，单轴系统效率更高、结构更紧凑、可靠性也更高，因此应用比较广泛。本章研究采用的是单轴结构的 MT，通过永磁同步发电机（Permanent Magnet Synchronous Generation, PMSG）发电，采用双脉宽调制（pulse width modulation, PWM）的整流和逆变装置通过公共连接点（PCC）并网，其系统结构如图 7.1 所示。

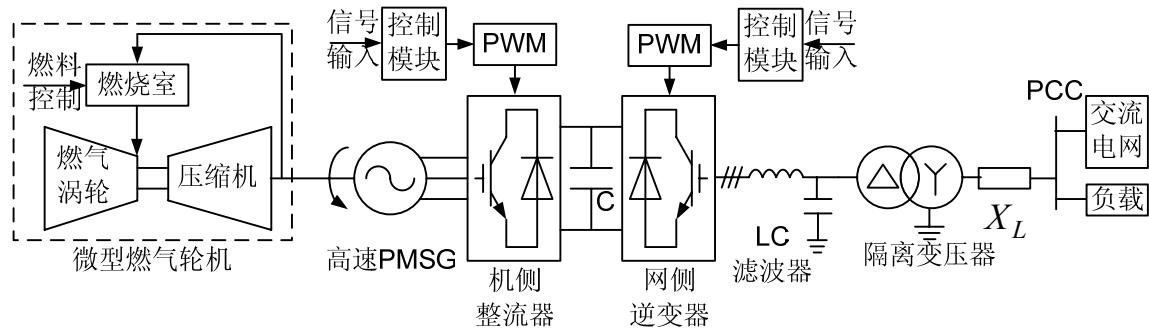


图 7.1 单轴微型燃气轮机发电系统供电模式

### 7.2.1 MT 动态模型

MT 的动态仿真模型如图 7.2 所示，包括速度控制系统、燃料控制系统、加速控制系统、温度控制系统<sup>[171]</sup>。

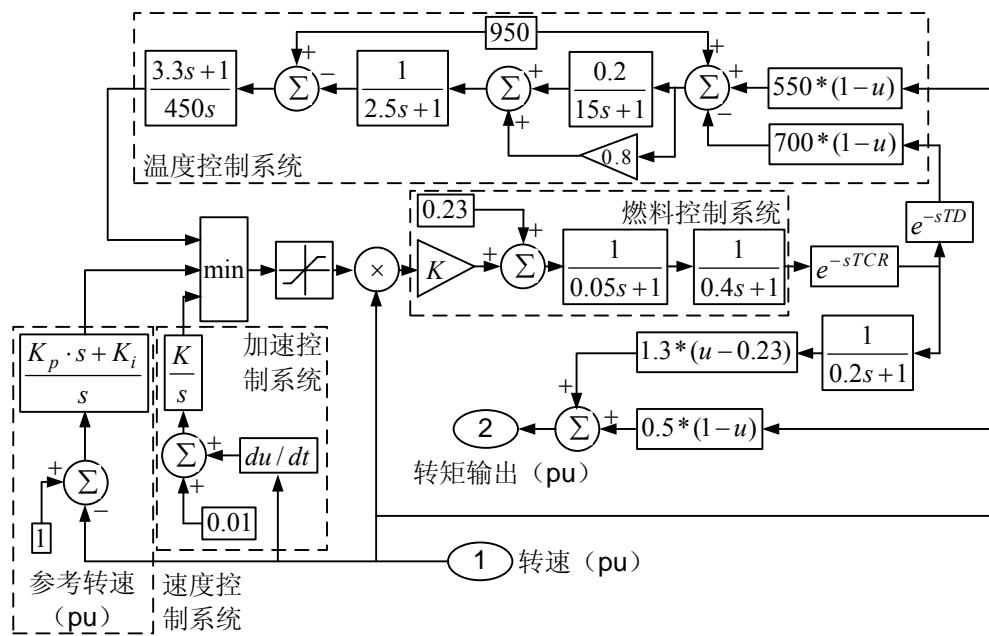


图 7.2 MT 动态仿真模型

图 7.2 所示的 MT 动态仿真系统中，通过 MT 的实际速度与预设的参考速度之间的差值来调节 MT 的转速。速度控制系统通常用一个超前滞后函数或者 PID 控制器来模拟。加速控制模块主要在 MT 达到稳定运行状态之前起作用，限制转子

的加速度。温度控制系统通过热电偶检测燃烧室气体温度，并与参考值进行比较；通常设置的参考值比实际测量的值高，这使得温度控制系统输出作为燃料调节的上限；当测量值一旦超过参考值，两者之间的比较信号为负，从而通过极小值选择器，使得燃料控制系统的输出减小。

### 7.2.2 PMSG 动态模型

单轴 MT 发电系统通常采用高速 PMSG，在额定转速 96000rpm 下，输出功率为 30kW，端口额定电压 480V。在 dq0 坐标系下 PMSG 的数学模型可用式（7.1）来描述<sup>[172]</sup>。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q \\ \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q} \\ T_e = 1.5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_r \end{array} \right. \quad (7.1)$$

式中： $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴等值电感； $R$  为定子绕组电阻； $i_d$ 、 $i_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电流； $v_d$ 、 $v_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电压； $\omega_r$  为转子角速度； $\lambda$  为转子上永磁体在定子上感应出的磁通； $p$  为磁极对数； $T_e$  为电磁转矩； $J$  为转子惯性时间常数； $F$  为阻尼系数； $\theta$  为转子相位角； $T_m$  为轴系的机械转矩。

### 7.2.3 机侧整流器模型与控制

MT 发电系统产生的三相交流电频率高达 1500-4000Hz，在与电网并网运行之前，必须经过整流逆变成工频交流电。靠近 MT 的机侧整流器一般有电压型和电流型两类，电压型整理器易进行脉宽调制、无差拍和重复等多种控制，有效实用，已经在太阳能光伏发电、风力发电等孤立系统中得到了初步应用<sup>[173]</sup>。本章采用 PWM 电压型整流器（Voltage Source Rectifier, VSR）的理想开关模型，对 PMSG 输出的三相交流电进行整流，在 dq0 坐标系下其数学模型可用式（7.2）来描述<sup>[174]</sup>。

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_d}{dt} = v_d - i_d R' + \omega L i_q - S_d v_{dc} \\ L \frac{di_q}{dt} = v_q - i_q R' - \omega L i_d - S_q v_{dc} \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} = 1.5 (S_d i_d + S_q i_q) - \frac{v_{dc}}{R_L} \end{array} \right. \quad (7.2)$$

式中： $v_d$ ， $v_q$  分别为  $d$ ， $q$  轴电压； $i_d$ ， $i_q$  分别为  $d$ ， $q$  轴电流； $v_{dc}$  为直流母线电压； $L$  为交流滤波电感； $R'$  为开关管损耗等效电阻与交流滤波电感等效电阻之和； $\omega$  为角频率； $S_d$ ， $S_q$  分别为  $d$ ， $q$  轴开关函数； $C$  为直流母线电容； $R_L$  为负载等效阻抗。

机侧 PWM VSR 采用双环控制方式，即功率-电压外环控制和电流内环控制。功率-电压外环的主要作用是在负荷功率变化时提供电流内环参考值；电流内环按电压外环输出指令进行电流控制，控制框图如图 7.3 所示<sup>[175,177]</sup>。

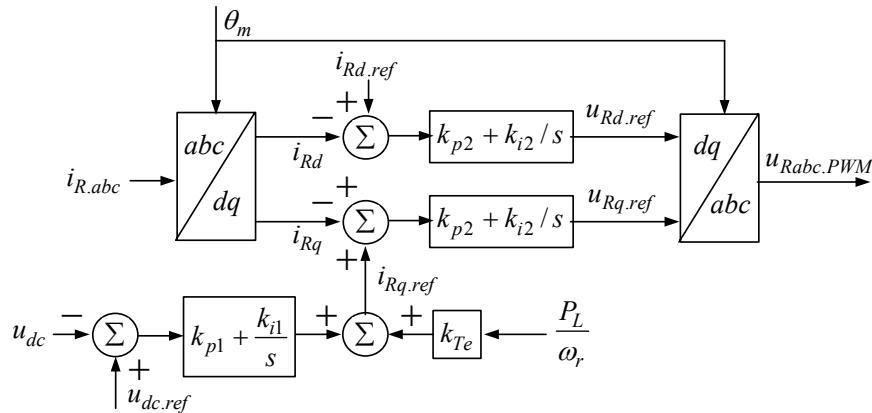


图 7.3 机侧整流器控制框图

图中： $u_{dc}$ 、 $u_{dc.ref}$  分别为直流电压及其参考值； $k_{Te}$  为转矩常数； $P_L$  为负荷功率； $i_{R.abc}$  为整流器交流侧三相电流； $i_{Rd}$ 、 $i_{Rq}$  和  $i_{Rd.ref}$ 、 $i_{Rq.ref}$  分别为整流器交流侧  $d$  轴、 $q$  轴电流及其参考值； $\theta_m$  为 PMSG 转子位置角； $u_{Rabc.PWM}$  为整流器三相脉宽调制信号。

图 7.3 所示的控制结构包括 2 个 PI 控制器，直流电压差值为 PI1 控制器的输入，其输出与负荷功率变化之和为 PMSG 的  $q$  轴电流参考值。 $q$  轴参考电流与 PMSG 定子  $q$  轴电流的差值输入到 PI2 控制器后产生实际需要的发电机定子  $q$  轴电压，结合定子  $d$ 、 $0$  轴电流参考值，通过坐标变换形成  $abc$  三相 PMW 波。当外界功率变化时，通过功率变化改变发电机  $q$  轴电流参考值及电磁转矩，实现发电机转速、功率快速调节和直流电压恒定。详细控制方法参见文献[175]。

网侧逆变器模型与控制方式与 6.4 节的直流分布式电源的逆变并网控制方式类似，限于篇幅，不再赘述。

### 7.3 微型燃气轮机的等效描述

如何建立描述微型燃气轮机外特性的等效数学模型是研究考虑 MT 的配电网综合负荷建模的基础。稳态运行情况下，MT 发电系统通过整流逆变控制能向系统输送恒定的功率，但电力系统负荷建模是为电力系统动态仿真服务的，在扰动发生的暂态过程中，MT 发电系统是否还能保持这种恒功率特性值得商榷。

通过上一章的分析可知，PV 和 FC 之所以在负荷建模的研究中可以等效为功率消耗为负的恒功率广义静态负荷，最大的特点就是它们都是直流性电源。而 MT 与 PV 和 FC 最大的区别正是在于 MT 是一个交流动态系统，具有旋转机械部分，

正因为此旋转动态系统的特性，在暂态过程中，向系统输送的功率不能再保持恒定。因此，作为广义上的负荷，在负荷建模的研究中已不能纯粹的等效为静态负荷，而是要考虑其动态特性，用广义动态负荷来等效描述。为研究到底采用何种动态模型，既能真实反映 MT 的动态特性，又能满足负荷建模的需要，有必要对 MT 在暂态过程中所表征出来的动态特性进行规律性分析的基础上，建立能准确描述其外特性的等效数学模型，通过计算机仿真实验验证模型的有效性。

### 7.3.1 暂态过程中 MT 的动态特性

基于 MATLAB 构建如图 7.1 所示的 MT 发电系统<sup>[177]</sup>，详细参数见表 7.1 所示。假设 MT 接入的配电网侧发生三相对称短路故障，电压下降 20%左右，持续时间 0.2s，由于整流逆变器的动态时间常数达到  $\mu\text{s}$  级，而暂态过程时间是百 ms 级，因此忽略整流逆变器的动态时间常数影响甚微。通过观察 MT 发电系统的相关状态量，如图 7.4 所示，分析暂态过程中 MT 的动态特性。

表 7.1 MT 发电系统各模块主要参考参数

元件	参数值
永磁同步发电机	额定转速: $\omega_N = 96000$ (r/min)
	额定功率: $P_N = 30$ (kW)
	极对数: $N_p = 1$
	定子绕组: $R_s = 0.25$ ( $\Omega$ )
	定子电感: $L_d = L_q = 0.6875$ (mH)
整流器控制器	转子永磁体磁链: $\Phi_m = 0.0534$ (Wb)
	转动惯量: $J = 0.2$ ( $\text{g} \cdot \text{m}^2$ )
	直流侧输出额定电压: $v_{dc} = 900$ (V)
	载波频率: $f_r = 10$ (kHz)
	$k_{p1} = 8.5, k_{i1} = 156, k_{p2} = 0.4, k_{i2} = 10$
逆变器控制器	PWM 传递常数: $K_{PWM} = 0.8$
	交流侧输出额定线电压: $u_{inv} = 480$ (V)
	载波频率: $f_i = 1.5$ (kHz)
	$k_{p3} = 0.5, k_{i3} = 20, i_{d,max} = 1.0$
	$k_{p4} = 0.5, k_{i4} = 20, i_{q,max} = 1.0$
LC 滤波器	$k_{p5} = 0.8, k_{i5} = 10, k_{c1} = 0.2, u_{Id,max} = 1.0, u_{Id,min} = -1.0$
	$k_{p6} = 0.8, k_{i6} = 10, k_{c2} = 0.2, u_{Iq,max} = 1.0, u_{Iq,min} = -1.0$
	$L = 1$ (mH), $C = 70$ ( $\mu\text{F}$ )
	型号: Y, d1 480V/10.5kV
	隔离变压器 额定容量: $S_N = 2$ (MVA)
	$r_T = 1\%, x_T = 6\%$

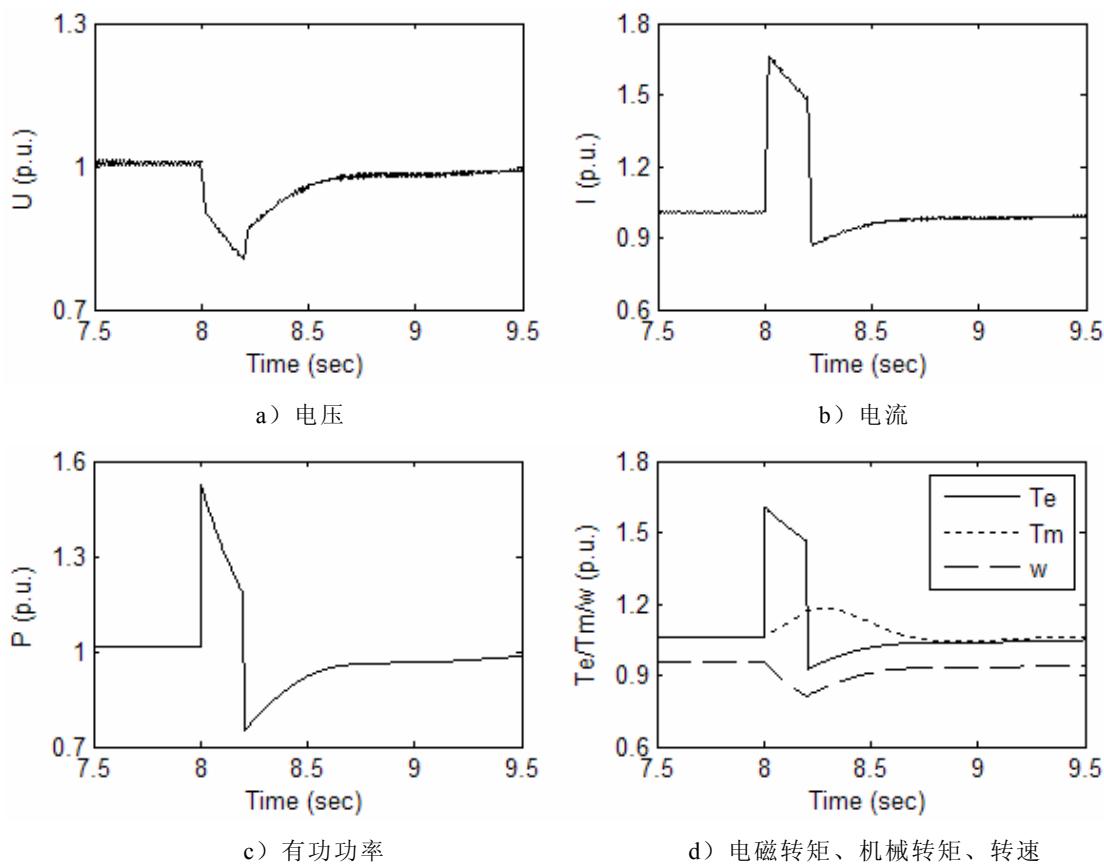


图 7.4 暂态过程中 MT 动态变化特性

图 7.4 直观表明，暂态过程中，MT 系统的各相关状态量均经过动态过程才能恒定。故障发生时刻，电流、输出有功和电磁转矩均突变增加，然后随着电压的下降而缓慢下降，而机械转矩因为转子的惯性而不能突变，为与电磁转矩重新平衡只能缓慢增加，此时电磁转矩要大于机械转矩，导致转速缓慢下降；故障切除后，电流、输出有功和电磁转矩又突变减小，然后随着电压的恢复而缓慢上升，直到重新达到稳定，而机械转矩因为转子的惯性而不能突变，为与电磁转矩重新平衡只能缓慢减小，此时电磁转矩要小于机械转矩，导致转速缓慢上升，直到重新达到稳定。因此，在研究考虑 MT 的配电网综合负荷建模时，不能同 PV 和 FC 一样作为广义上的静态恒功率负荷来处理，而是要考虑其动态过程，作为广义上的动态负荷来等效。

### 7.3.2 MT 的等效描述模型

通过上述分析可知，暂态过程中，由于微型燃气轮机的转轴速度发生变化，MT 发出的功率并不是恒定不变的。因此，为准确反映这种功率的变化，必须考虑 MT 发电系统的电磁和机械暂态过程，构建有效的数学模型来描述这种变化过程。

构建用等效暂态电动势和等效暂态阻抗表示的 MT 发电系统等值电路如图 7.5 所示，图中各量和下面的模型推导均采用标幺值。

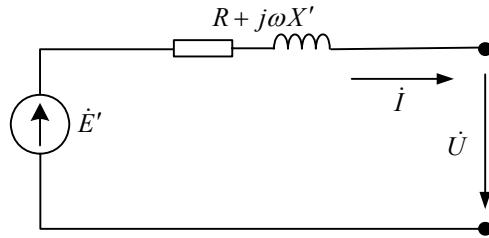


图 7.5 用等效暂态电动势和等效暂态阻抗表示的 MT 等值电路

图中： $\dot{E}'$  为等效暂态电动势； $R$  为定子等效电阻； $X'$  为等效暂态电抗； $I$  为向系统输送的电流； $U$  为端口电压； $\omega$  为转子角速度，由于 MT 系统采用的 PMSG，且极对数为 1，因此标幺制下转子角速度和电磁角速度在数值上是相等的，本章均用  $\omega$  表示。

电压方程为：

$$\dot{E}' = \dot{U} + (R + j\omega X')I \quad (7.3)$$

设  $\dot{E}' = E'_x + jE'_y$ 、 $\dot{U} = U_x + jU_y$ 、 $I = I_x + jI_y$ ，代入式 (7.3)，实部、虚部分开：

$$\begin{cases} E'_x = U_x + RI_x - \omega X'I_y \\ E'_y = U_y + \omega X'I_x + RI_y \end{cases} \quad (7.4)$$

写成矩阵的形式为：

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & -\omega X' \\ \omega X' & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

由式 (7.5) 可以解得电流为：

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega X' \\ \omega X' & R \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & -\omega X' \\ \omega X' & R \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

将式 (7.6) 写成多项式的形式为：

$$I_x = \frac{RE'_x + \omega X'E'_y - RU_x - \omega X'U_y}{R^2 + (\omega X')^2} \quad (7.7)$$

$$I_y = \frac{-\omega X'E'_x + RE'_y + \omega X'U_x - RU_y}{R^2 + (\omega X')^2} \quad (7.8)$$

如图 7.5 所示的 MT 等值电路，暂态过程中  $\dot{E}'$  的等效描述是关键。在传统同步发电机的研究中，之所以引入了暂态电势的概念，用来反映机电暂态过程中励磁绕组磁链的变化，根据系统分析计算的不同精度要求，有三绕组模型、两绕组模型、不计阻尼绕组模型和暂态电势为常数的模型等。这些模型中，一方面，暂态过程中暂态电势需要解微分方程来得出，虽然在计算精度上满足了要求，但无疑增加了计算的阶数，使本身较为复杂的负荷模型更加复杂，不适合负荷建模的

研究；另一方面，暂态过程中的暂态电势取为恒定值，但这样的简化往往会造成一定的误差，无法准确描述其动态特性。同时，MT 采用的是永磁同步发电机，其励磁磁场是不变的，但是在机电暂态过程中，由于定子绕组磁链的改变，转子绕组的磁链会发生变化，所以总的转子磁场也会发生变化，因此暂态过程中，图 7.5 所提出的等效暂态电势也势必发生变化。而从图 7.4 所示的暂态过程中 MT 的动态特性来看，一个能准确反映动态特性又具有实际物理意义的变量就是转速的变化，这一特点给本文 MT 发电系统等效暂态电势  $\dot{E}'$  在暂态过程中的等效描述提供了启发。基于此，为准确描述 MT 系统的动态特性，又适合负荷建模的研究，构建如式（7.9）所示的代数方程来等效描述暂态过程中  $\dot{E}'$  的变化。

$$\dot{E}' = \omega^n \dot{E}'_0 = \omega^n (E'_{x0} + jE'_{y0}) \quad (7.9)$$

式中： $\dot{E}'_0$  为稳态情况下初始等效暂态电动势； $n$  为幂指数（待辨识参数），用来反映  $\dot{E}'$  随  $\omega$  变化的程度。

当把 MT 和 PMSG 转子视为一个刚体时，忽略轴与轴承间的阻尼摩擦，整个 MT 发电机组的转子方程可以表示为：

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (T_m - T_e) \quad (7.10)$$

式中： $T_J$  为转子惯性时间常数； $T_m$  为机械转矩； $T_e$  为电磁转矩。

式（7.10）中电磁转矩  $T_e$  可以表示为：

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = \frac{\text{Re}(\dot{E}'\hat{I})}{\omega} = \frac{E'_x I_x + E'_y I_y}{\omega} \quad (7.11)$$

将式（7.7）~（7.9）代入式（7.11）有：

$$T_e = \frac{R\omega^{2n}(E'^2_{x0} + E'^2_{y0}) - R\omega^n(E'_{x0}U_x + E'_{y0}U_y) - \omega X' \omega^n(E'_{x0}U_y - E'_{y0}U_x)}{\omega[R^2 + (\omega X')^2]} \quad (7.12)$$

由 7.2.1 节的 MT 动态模型可知，MT 输出的机械转矩与转速存在非线性关系；同时，在电力系统负荷建模研究中，机械转矩常取为转速的二次函数，且描述能力较强；借鉴此思想，本文也取为转速的二次函数，则式（7.10）中机械转矩  $T_m$  可以表示为：

$$T_m = T_0 [\alpha\omega^2 + \beta\omega + (1-\alpha-\beta)] \quad (7.13)$$

式中： $T_0$  为稳态初始负载率； $\alpha$  和  $\beta$  为转矩特性系数。

MT 发出的功率为：

$$\tilde{S} = \dot{U}\hat{I} = P + jQ \quad (7.14)$$

将  $\dot{U} = U_x + jU_y$ 、 $\dot{I} = I_x + jI_y$ ，代入式 (7.14)，实部、虚部分开得到：

$$\begin{cases} P = U_x I_x + U_y I_y \\ Q = U_y I_x - U_x I_y \end{cases} \quad (7.15)$$

将式 (7.7)、(7.8) 代入式 (7.15) 有：

$$P = \frac{RE'_x U_x - RU_x^2 + \omega X' E'_y U_x - \omega X' E'_x U_y + RE'_y U_y - RU_y^2}{R^2 + (\omega X')^2} \quad (7.16)$$

$$Q = \frac{RE'_x U_y - \omega X' U_x^2 + \omega X' E'_y U_y + \omega X' E'_x U_x - RE'_y U_x - \omega X' U_y^2}{R^2 + (\omega X')^2} \quad (7.17)$$

将式 (7.9) 代入式 (7.16)、(7.17) 有：

$$P = \frac{R\omega^n E'_{x0} U_x - RU_x^2 + \omega X' \omega^n E'_{y0} U_x - \omega X' \omega^n E'_{x0} U_y + R\omega^n E'_{y0} U_y - RU_y^2}{R^2 + (\omega X')^2} \quad (7.18)$$

$$Q = \frac{R\omega^n E'_{x0} U_y - \omega X' U_x^2 + \omega X' \omega^n E'_{y0} U_y + \omega X' \omega^n E'_{x0} U_x - R\omega^n E'_{y0} U_x - \omega X' U_y^2}{R^2 + (\omega X')^2} \quad (7.19)$$

为了借鉴仿真与辨识理论的研究成果，下面将上述 MT 发电系统等效模型写成状态方程的形式。

令状态向量  $\mathbf{x} = [\omega]$ ；模型参数  $\boldsymbol{\theta} = [R \ X' \ T_J \ n \ \alpha \ \beta]^T$ ；输入向量  $\mathbf{u} = [U_x \ U_y]^T$ ；输出向量  $\mathbf{y} = [P \ Q]^T$ ，则 MT 等效模型写成状态方程的一般形式为：

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (7.20)$$

式 (7.20) 中  $f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{u})$  的具体表达式为：

$$f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{u}) = \frac{1}{T_J} (T_m - T_e) \quad (7.21)$$

式中： $T_e$  和  $T_m$  分别由式 (7.12) 和 (7.13) 表示。

式 (7.20) 中  $h(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{u})$  的具体表达式为：

$$h(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{u}) = [P \ Q]^T \quad (7.22)$$

式中： $P$  和  $Q$  分别由式 (7.18) 和 (7.19) 表示。

已知稳态时的激励  $\mathbf{u}_0 = [U_{x0} \ U_{y0}]^T$  和响应  $\mathbf{y}_0 = [P_0 \ Q_0]^T$ ，由式 (7.15) 可求出电

流响应的初值 $[I_{x0} \ I_{y0}]^T$ ，同时由式(7.9)的定义可以得到 $\omega_0=1$ ，代入式(7.5)可解出暂态电动势稳态初值 $[E'_{x0} \ E'_{y0}]^T$ 。令式(7.10)左边导数等于零，由 $T_e=T_m$ 可解得MT的初始负载率 $T_0$ 。

### 7.3.3 仿真检验

为验证上面建立的动态模型对MT发电系统等效描述的有效性，基于7.3.1节的仿真数据，采用第二章的总体测辨负荷建模方法，对7.3.2建立的动态模型进行总体测辨建模。一般情况下，MT在额定运行工况下，仅向系统提供有功功率，且暂态过程中无功也无变化，因此，建模结果仅就有功的仿真实测与模型响应进行曲线拟合比较。建模结果如图7.6和表7.2所示。

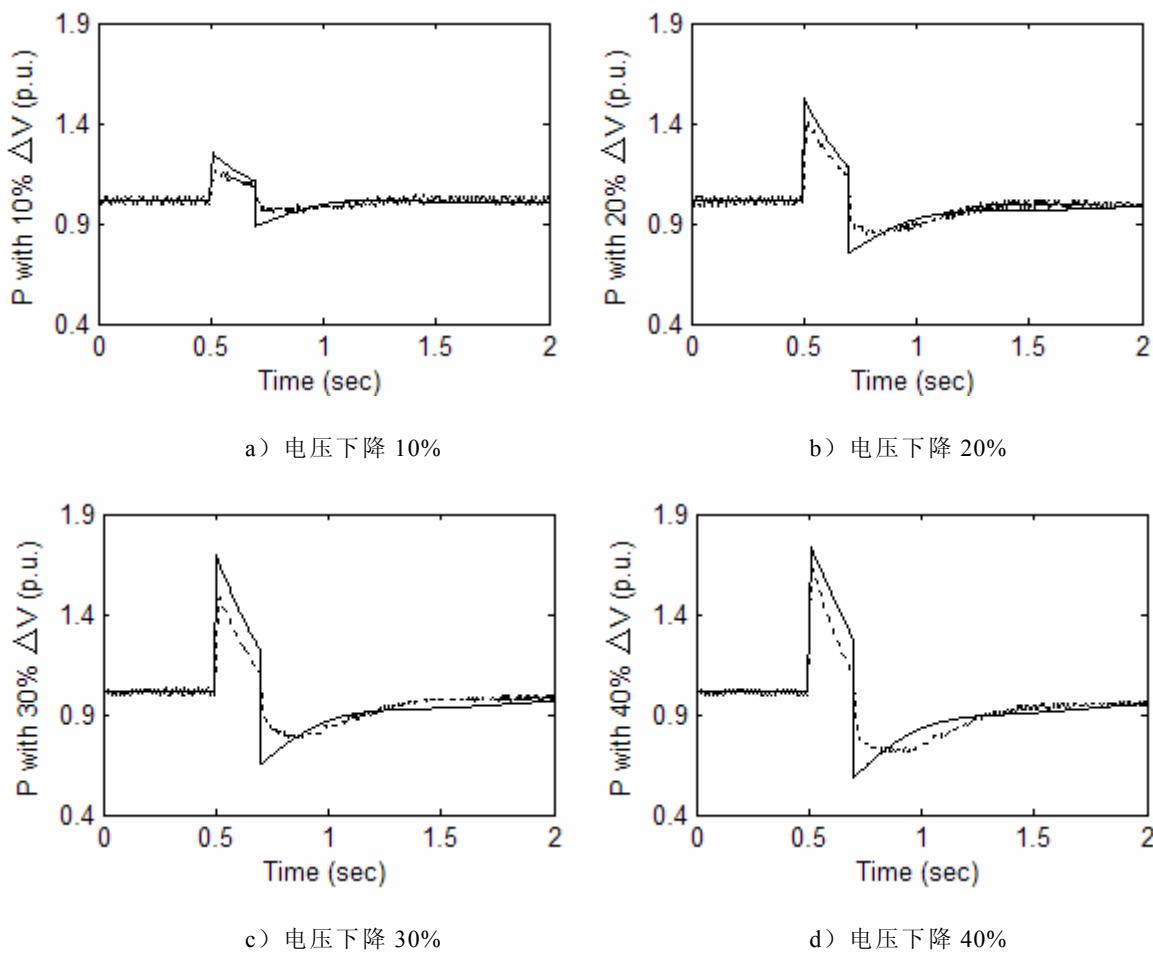


图 7.6 MT 等效描述模型拟合效果

表 7.2 MT 等效描述模型辨识参数

编号	电压降	$R$	$X'$	$T_J$	$n$	$a$	$\beta$	$E'_{x0}$	$E'_{y0}$	$T_0$	$E_r$
1	10%	0.174	0.044	0.433	0.595	0.998	0.002	1.187	0.042	1.388	0.00089
2	20%	0.160	0.042	0.465	0.450	1	0	1.172	0.040	1.371	0.00138
3	30%	0.203	0.040	0.470	0.473	1	0	1.216	0.038	1.407	0.00181
4	40%	0.211	0.040	0.471	0.450	1	0	1.224	0.038	1.408	0.00197

图 7.6 所示的 MT 等效描述模型拟合效果直观表明：暂态过程中，除 10% 电压下降幅度情况下拟合稍有偏差之外，其他不同电压下降程度下均能较好地拟合，这主要是由于 10% 的电压下降激励，还不足以充分激发 MT 系统的动态特性。一般情况下，激励越大，越能激发动态系统的潜能，参数稳定性也会越好，表 7.2 的 MT 等效描述模型的辨识参数也正好说明了这一点，当激励达到 30% 之后，参数基本稳定，变化幅度很小，拟合效果也基本稳定。因此，通过上述分析充分说明，采用 7.3.2 所建立的一阶微分方程描述的等效模型能较好地描述 MT 发电系统的动态特性，在负荷建模的研究中，有必要把 MT 看作一个广义的动态负荷来处理。

## 7.4 考虑微型燃气轮机的广义综合负荷模型

### 7.4.1 模型结构与待辨识参数

#### 7.4.1.1 模型结构及其解析描述

通过上述几节对 MT 发电系统结构特点和动态特性的讨论，并在详细分析了 MT 的等效描述模型之后，当研究考虑 MT 的配电网综合负荷建模时，可以把接入配电网的 MT 看作一个功率消耗为负的广义动态负荷。基于此，本文提出图 7.7 所示的微型燃气轮机和感应电动机组成的等效动态负荷并联静态负荷的广义综合负荷模型结构来描述含 MT 的配电网综合负荷特性。

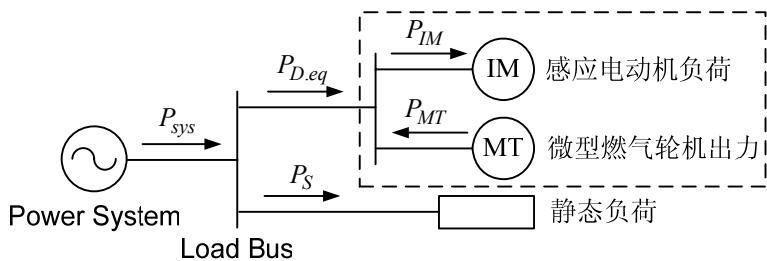


图 7.7 考虑 MT 的广义综合负荷模型结构

图 7.7 中， $P_{IM}$ 、 $P_S$ 、 $P_{MT}$  分别表示感应电动机负荷功率、静态负荷功率、MT 出力；将 MT 出力和感应电动机负荷合成为等效动态负荷，负荷功率用  $P_{D.eq}$  表示；系统供给负荷为  $P_{sys}$ 。上述各功率参考方向定义如图 7.7 所示，图中仅标出了有功功率参考方向，无功功率类似。功率平衡方程如式 (7.23) 所示。

$$\begin{cases} P_{sys} = P_{IM} + P_S - P_{MT} \\ Q_{sys} = Q_{IM} + Q_S - Q_{MT} \end{cases} \quad (7.23)$$

定义 MT 出力占总负荷的比例  $K_{MT}$  如式 (7.24) 所示，式中各量均表示对应的初始稳态量，为表述的方便，均直接用变量表述（下同）。

$$K_{MT} = \frac{P_{MT}}{P_{IM} + P_S} = \frac{P_{MT}}{P_{sys} + P_{MT}} \quad (7.24)$$

定义感应电动机负荷占总负荷的比例  $K_{IM}$  如式 (7.25) 所示。

$$K_{IM} = \frac{P_{IM}}{P_{IM} + P_S} = \frac{P_{IM}}{P_{sys} + P_{MT}} \quad (7.25)$$

由式 (7.24) 可以求得 MT 出力初始功率为：

$$P_{MT} = \frac{K_{MT}}{1 - K_{MT}} P_{sys} \quad (7.26)$$

将式 (7.26) 代入式 (7.25) 可以求得感应电动机负荷初始功率为：

$$P_{IM} = \frac{K_{IM}}{1 - K_{MT}} P_{sys} \quad (7.27)$$

考虑功率平衡方程式 (7.23) 可以求得静态负荷初始功率为：

$$P_S = \frac{1 - K_{IM}}{1 - K_{MT}} P_{sys} \quad (7.28)$$

因此，影响配电网综合负荷特性关键参数动静比例（动态负荷所占比例）可以定义为：

$$K_m''' = \frac{P_{D.eq}}{P_{sys}} = \frac{P_{IM} - P_{MT}}{P_{sys}} \quad (7.29)$$

将式 (7.26) 和 (7.27) 代入 (7.29) 可以求得：

$$K_m''' = \frac{K_{IM} - K_{MT}}{1 - K_{MT}} \quad (7.30)$$

传统综合负荷模型中， $K_m'''$  作为独立的待辨识参数，且其取值范围为 [0,1]，但考虑了 MT 的广义综合负荷模型中， $K_m'''$  为非独立辨识参数，而是由另外两个独立待辨识参数  $K_{MT}$  和  $K_{IM}$  按式 (7.30) 求得，同时其取值范围根据实际运行方式分下列三种情况：

- 1)  $P_{MT} < P_{IM}$ , 即 MT 的出力不足以供给感应电动机负荷, 此时  $P_{D.eq} > 0$ 、 $P_{sys} > 0$ , 则有  $0 \leq K_{MT} < 1$ 、 $0 < K_{IM} \leq 1$ , 且  $K_{MT} < K_{IM}$ , 从而  $0 < K_m''' \leq 1$ ;
- 2)  $P_{IM} \leq P_{MT} < P_{IM} + P_S$ , 即 MT 的出力足以供给感应电动机负荷但不足以供给全部负荷, 此时  $P_{D.eq} \leq 0$ 、 $P_{sys} > 0$ , 则有  $0 < K_{MT} < 1$ 、 $0 \leq K_{IM} \leq 1$ , 且  $K_{MT} \geq K_{IM}$ , 从而  $K_m''' \leq 0$ ;
- 3)  $P_{MT} \geq P_{IM} + P_S$ , 即 MT 的出力足以供给全部负荷, 此时  $P_{D.eq} < 0$ 、 $P_{sys} \leq 0$ , 则有  $K_{MT} \geq 1$ 、 $0 \leq K_{IM} \leq 1$ , 且  $K_{MT} > K_{IM}$ , 从而  $K_m''' > 1$ 。

通常运行状况下, MT 一般作为小容量的分布式电源接入配电网, 因此上述前两种运行方式最为普遍, 且尤以第一种运行方式居多。

### 7.4.1.2 模型的待辨识参数

根据上面几节 MT 等效模型的描述和考虑 MT 的广义综合负荷模型结构的分析，当不考虑配电网参数影响时，考虑 MT 的配电网广义综合负荷模型的独立待辨识参数由下面 3 个参数矢量构成。

(1) 感应电动机特性参数矢量  $\alpha_1$

$$\alpha_1 = [R_s \ X_s \ R_r \ X_r \ R_m \ X_m \ T_j \ A \ B \ K_{IM}]^T$$

(2) 微型燃气轮机特性参数矢量  $\alpha_2$

$$\alpha_2 = [R \ X' \ T_J \ n \ \alpha \ \beta \ K_{MT}]^T$$

(3) 静态负荷特性参数矢量  $\alpha_3$

$$\alpha_3 = [A_P \ B_P \ A_Q \ B_Q]^T \text{——ZIP 模型;} \quad$$

或  $\alpha_3 = [P_v \ Q_v]^T \text{——幂函数模型。}$

应当注意，在上述独立辨识参数中，当静态负荷用恒阻抗描述时， $\alpha_3$  为空集。另外，在独立辨识参数一定后，非独立参数应当根据初始稳态条件及参数本身约束解出。

### 7.4.2 仿真实验与建模结果

#### 7.4.2.1 仿真系统与仿真方法

选用如图 5.18 所示的配电网网络作为仿真算例，为增大 MT 出力占总负荷的比例，将各节点负荷缩小为原负荷的 1/10，总负荷为 400kW+260kvar，如图 7.8 标注所示。B1 母线作为综合负荷母线。感应电动机和静态负荷主要参数如表 5.1 所示。

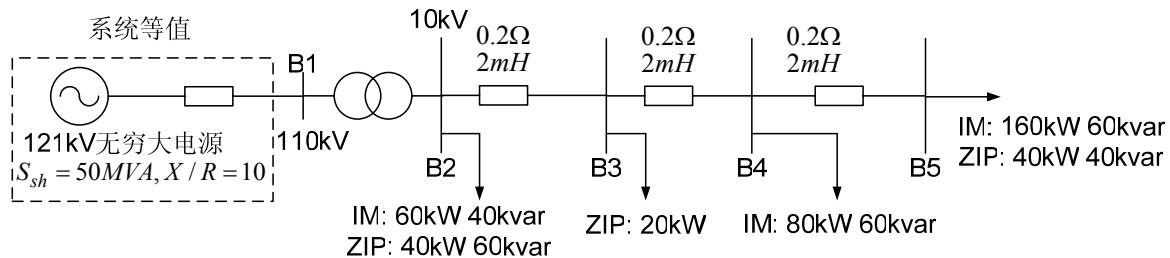


图 7.8 仿真系统单线示意图

基于 MATLAB/SIMULINK 搭建如图 7.8 的仿真系统，在 B4 母线接入 MT 发电系统，假设无穷大系统发生故障（持续时间 0.2s），电压降低 20%左右，进行电力系统暂态仿真，可获得扰动下系统侧传输到配网侧负荷母线的有功功率、无功功率和电压的动态特性数据，以此作为基于总体测辨法的配电网综合负荷建模参数辨识所需要的实测数据。根据这些数据辨识负荷模型的等值参数，然后再计算综合负荷模型的动态响应，与原始测量的数据进行比较分析。

#### 7.4.2.2 建模结果

由 7.4.1.2 节的模型待辨识参数矢量构成可知, 考虑 MT 的广义综合负荷模型参数较多, 不利于总体测辨建模的准确和高效。因此, 为提高建模工作的效率, 同时有针对性的分析研究, 有必要采用一定的模型参数简化辨识策略。由文献 [178,179] 的结论可知, 感应电动机特性参数  $R_m$ 、 $X_m$ 、 $T_j$ 、 $A$ 、 $B$  对模型响应的灵敏度低, 可取其典型参数值, 故在广义综合负荷模型参数辨识中将前述参数取为典型值 (本章取  $R_m=0$ 、 $X_m=3$ 、 $T_j=2$ 、 $A=1$ 、 $B=0$ ), 不再作为辨识参数, 同时取静态负载为恒阻抗模型。

综上所示, 简化后的考虑 MT 的配电网广义综合负荷模型待辨识参数为:

$$\boldsymbol{\alpha} = [R_s \ X_s \ R_r \ X_r \ R \ X' \ T_J \ n \ \alpha \ \beta \ K_{IM} \ K_{MT}]^T$$

采用第二章的总体测辨建模方法, 对三个样本 (样本①: B4 接入 30kW 的 MT; 样本②: B3 和 B4 分别接入 30kW 的 MT; 样本③: B2、B3 和 B4 分别接入 30kW 的 MT) 进行总体测辨建模, 建模结果如图 7.9~7.11 所示 (图中“实线”表示仿真数据, “点线”表示模型响应数据), 辨识参数见表 7.3 所示。

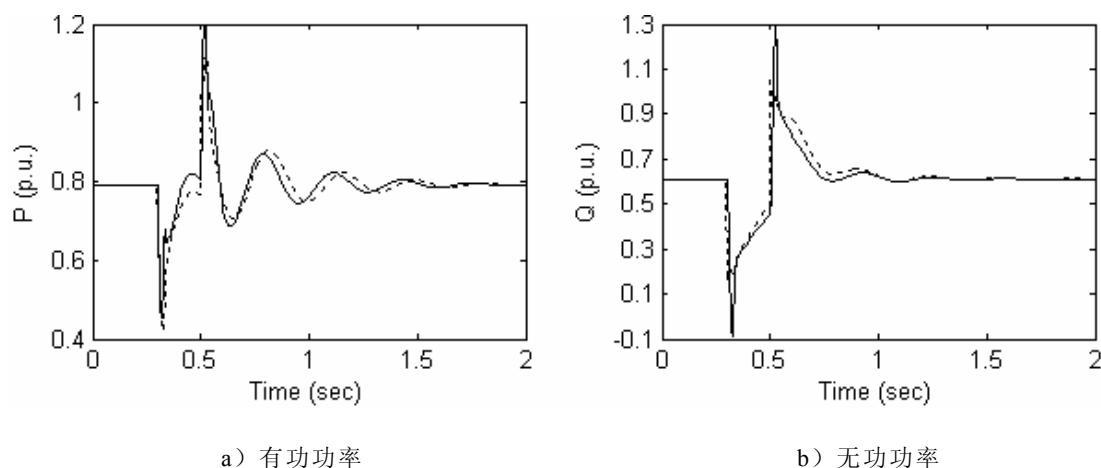


图 7.9 样本①仿真实测与模型响应拟合曲线

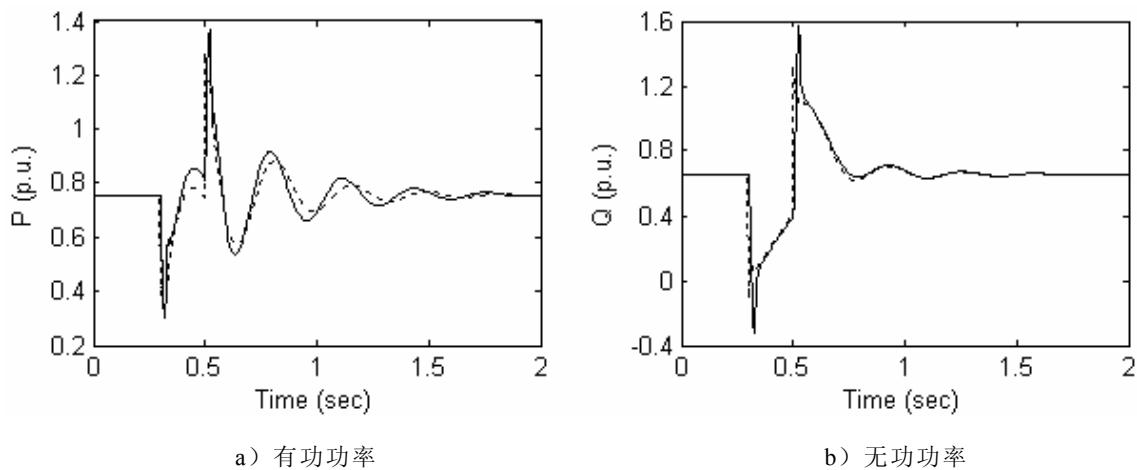


图 7.10 样本②仿真实测与模型响应拟合曲线

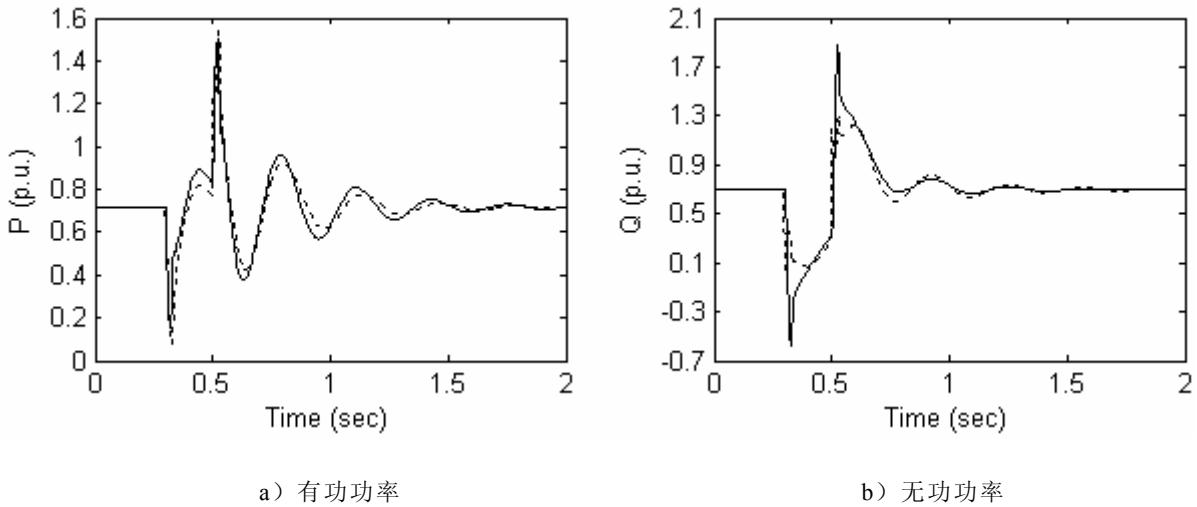


图 7.11 样本③仿真实测与模型响应拟合曲线

表 7.3 考虑 MT 的模型辨识参数

样本	$R_s$	$X_s$	$R_r$	$X_r$	$R$	$X'$	$T_J$	$n$	$\alpha$	$K_{IM}$	$K_{MT}$	$K_m'''$	$E_r$
①	0.018	0.409	0.021	0.398	0.183	0.042	0.468	0.449	1	0	0.689	0.058	0.679 0.00286
②	0.023	0.386	0.022	0.479	0.179	0.039	0.473	0.450	1	0	0.703	0.126	0.660 0.00295
③	0.016	0.326	0.025	0.456	0.176	0.041	0.471	0.450	1	0	0.691	0.198	0.615 0.00304

### 7.4.3 模型适应性检验

基于上述建模结果，现就本章提出的“由 MT 和感应电动机组成的等效动态负荷并联静态负荷的广义综合负荷模型”的描述能力、参数变化规律、泛化能力等问题简要讨论如下。

#### 7.4.3.1 模型的自描述能力

通过图 7.9~7.11 对三个样本建模所得的仿真实测与模型响应拟合曲线可以看出，三种运行情况下的拟合效果基本一致，均能较好地拟合，直观表明 7.4.1 节提出的广义综合模型能较好地描述含 MT 的配电网综合负荷特性。同时，从表 7.3 所示的相对拟合误差来看，三个样本均维持在较小的范围内，仅随着接入的微型燃气轮机容量的增加而略有增大。

#### 7.4.3.2 模型的参数变化规律

通过表 7.3 所示的辨识数据，可以清楚地看出，所有辨识参数中，变化较为明显的参数 ( $K_{MT}$ 、 $K_m'''$ ) 正是由于 MT 接入容量的不断增大而造成的，其它感应电动机参数和 MT 等效模型参数受 MT 接入容量大小的影响不大，基本稳定。且  $K_{MT}$ 、 $K_m'''$  的变化趋势，随着 MT 接入容量的增大， $K_{MT}$  逐渐增大，而  $K_m'''$  呈逐渐下降的趋势，这充分说明 MT 的接入对动态负荷的影响较为明显，即提出的用广义动态

负荷来等效描述 MT 发电系统是可行的，也是有必要的。

#### 7.4.3.3 模型的泛化能力

针对上述 3 种运行方式，在设置故障仿真时使图 7.8 所示的仿真系统中 B1 母线的电压分别下降 10%、15%、20%、25%、30% 进行电力系统暂态仿真，获取模型辨识所需的负荷特性数据样本。分别作对样本 20% 下辨识所得的参数模型在样本 10% 之激励作用下的模型响应曲线（内插能力验证）和对样本 20% 下辨识所得的参数样本在 30% 之激励作用下的模型响应曲线（外推能力验证）。图 7.12 和图 7.13 分别给出了样本②下内插和外推能力验证。

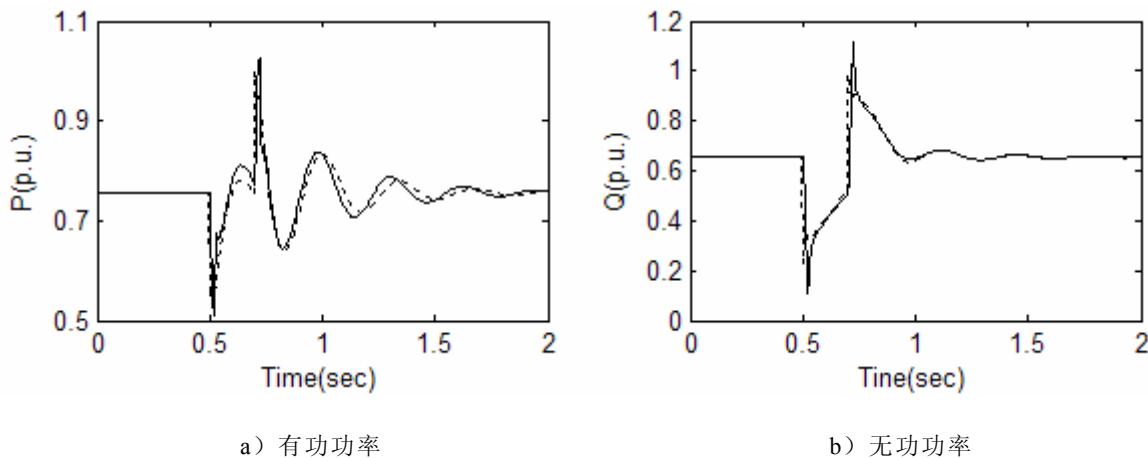


图 7.12 样本②下内插能力验证

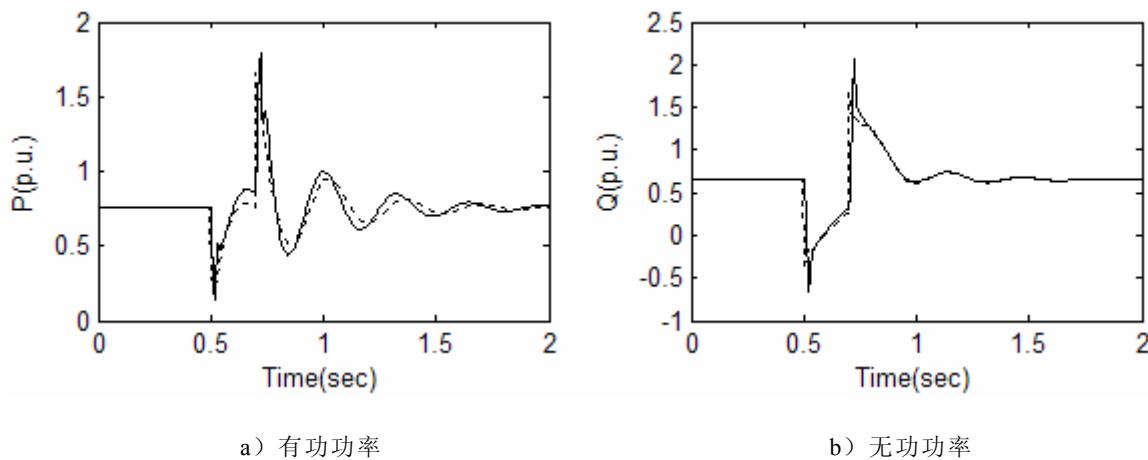


图 7.13 样本②下外推能力验证

从图 7.12 和 7.13 在样本②下内插和外推的曲线拟合效果来看，虽然内插外推检验样本与建模样本之电压激励幅度相差悬殊， $|\Delta V_{10\%}| = 50\% |\Delta V_{20\%}|$ ， $|\Delta V_{30\%}| = 150\% |\Delta V_{20\%}|$ ，但该模型对内插、外推样本的实测响应均能很好地拟合。同时，表 7.4 列出了不同情况下的内插外推响应相对拟合误差数据，充分表明该综合负荷模型有较好的泛化能力。

表 7.4 内插、外推验证相对拟合误差

样本	相对拟合误差			
	内插 10%	内插 15%	外推 25%	外推 30%
①	0.001075	0.001127	0.001359	0.001479
②	0.001247	0.001397	0.001564	0.001759
③	0.001478	0.001567	0.001758	0.001934

#### 7.4.4 讨论

以上数据分析与拟合效果表明，当 MT 接入配电网后，采用由一阶微分方程等效描述的 MT 和感应电动机共同组成的等效动态负荷并联静态负荷的广义综合负荷模型结构能较好地拟合含 MT 的配电网综合负荷动态特性，且该模型具有较好的自描述能力和泛化能力。同时，通过辨识参数的变化规律性分析可知，MT 的接入对 MT 所占负荷比例  $K_{MT}$  和动态负荷所占负荷比例  $K_m'''$  的影响较为明显，且  $K_{MT}$ 、 $K_m'''$  的变化趋势，随着 MT 接入容量的增大， $K_{MT}$  逐渐增大，而  $K_m'''$  呈逐渐下降的趋势，这种变化规律与本章提出的一阶微分方程的广义动态负荷模型来等效描述 MT 是相符的。因此，MT 接入配电网后，可以看作一个功率消耗为负的广义动态负荷，在负荷建模研究中，可以用一阶微分方程来等效描述，进而用等效动态负荷并联静态负荷的广义综合负荷模型来描述含 MT 的配电网综合负荷特性是合理有效的。

### 7.5 本章小结

本章在构建适合分布式发电的 MT 发电系统的基础上，建立并阐述了面向负荷建模的各模块模型和控制策略；通过对 MT 动态特性的研究分析，提出了一阶微分方程描述的等效数学模型，进而指出在负荷建模的研究中可以看作功率消耗为负的广义动态负荷；基于此，提出由 MT 和感应电动机构成的等效动态负荷并联静态负荷的广义综合负荷模型来描述含 MT 的配电网综合负荷特性；针对 MT 接入容量的不同，对三个样本进行了总体测辨建模研究，验证了本章所提出来的广义综合负荷模型的有效性。

# 结 论

## 本文的主要研究内容和成果

本文紧密结合国家大力开发可再生洁净能源分布式发电技术与装备的科技发展战略和电网仿真所需的配电网综合负荷建模特殊要求，围绕构建考虑风力发电、光伏电池、燃料电池、微型燃气轮机等典型分布式发电系统的配电网广义综合负荷模型开展了一系列的研究，取得了如下主要成果：

(1) 基于电网工程仿真计算的综合负荷模型应用环境，从总体测辨的角度，提出了一种“配电网集结等效的综合感应电动机模型”。该模型不仅计及了配网参数，而且增加了无功调整元件，增强了模型对综合负荷暂态无功的描述能力；模型能够自动辨识变压器有载调节分接头(OLTC)以及感应电动机容量，增强了模型对负荷水平变化的适应能力；模型结构更加符合工程仿真计算所模拟综合负荷的实际情况。针对该模型与传统综合负荷模型的激励与响应的不同，首次提出了模型的“递推辨识策略”，更准确地实现了模型的总体测辨建模。大量基于现场实测数据的建模实践表明，该模型对综合负荷的描述能力和泛化能力、参数稳定性、辨识效率等综合性能较目前普遍使用的传统感应电动机模型有一定的改进，具有良好的实用性。通过该模型的建立及其“递推辨识策略”参数确定方法的研究，为考虑分布式发电的负荷建模提供了基础有效的模型结构体系。

(2) 针对含风力发电的配电网综合负荷，提出了一种任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型。该模型把风力发电看作一个功率消耗为负的广义动态负荷，用异步发电机来等效描述，并对独立风力发电机系统的等效描述进行了验证；在此基础上，为准确反映不同运行方式下，风力发电出力对配电网综合负荷特性的影响，模型中的动态负荷所占比例（动静比例）的取值范围必须扩大到任意实数；通过3种典型风力发电出力和负荷水平的运行方式，验证了该模型对含风力发电的配电网综合负荷特性的描述能力、泛化能力、适应能力等性能。

(3) 研究了容量比例、地理位置和接入方式（集中或分散）等影响因素下WG接入对配电网综合负荷特性的影响。研究表明，不同容量比例的集中和分散WG接入，均表现为随着接入容量比例的增大，配电网综合负荷特性受影响越大，且WG的集中接入要比分散接入的影响更为明显；而不同地理位置的集中WG接入与接入节点和所在支路负荷比重有直接关系，接入节点越靠近配电网末端，所在支路负荷比重越小，对综合负荷特性影响也就越大；同时，容量比例的影响要

明显大于地理位置的影响，且 WG 分散接入对配电网综合负荷特性的影响要明显小于 WG 集中接入，更加有利于系统的安全稳定运行的结论。在此基础上，利用上面的研究数据，进一步验证了所提出的任意动静比例的异步电机并联静态负荷的广义综合负荷模型的有效性。

此外，结合本文第 2 章提出的配电网集结等效的综合感应电动机模型，对第 3 章提出的广义综合负荷模型进行了扩展，提出“任意动静比例的配电网集结等效的异步电机广义综合负荷模型”，通过与另外两种典型机理负荷模型的比较，研究表明该模型的综合性能要明显优于其它两种模型，更适合描述含 WG 的配电网综合负荷特性。

(4) 针对含光伏电池、燃料电池等直流分布式电源的配电网综合负荷，提出了一种等效静态负荷并联感应电动机的广义综合负荷模型。该模型把直流分布式电源看作一个功率消耗为负的广义静态负荷，用恒功率模型来等效描述；通过构建的 PV 和 FC 并网发电系统的稳态与暂态仿真，验证了该等效描述模型的有效性；针对三种不同接入容量比例的直流分布式电源，进行了总体测辨建模研究，通过分析影响其综合负荷特性的关键参数（动静比例和 ZIP 静态负荷系数）的变化规律，验证了该模型的有效性。

(5) 针对含微型燃气轮机的配电网综合负荷，提出了一种微型燃气轮机和感应电动机组的等效动态负荷并联静态负荷的广义综合负荷模型。该模型把微型燃气轮机看作一个功率消耗为负的广义动态负荷，用一阶微分方程模型来等效描述；通过构建的 MT 发电系统的暂态仿真，验证了该等效描述模型的有效性；针对 MT 接入容量的不同，对三个样本进行了总体测辨建模研究，验证了该模型的有效性。

通过上述主要成果的研究，形成了适用于含分布式电源配电网的广义综合负荷建模的系统理论与方法，为综合考虑不同分布式发电的电力系统负荷建模打下了坚实的基础，为分布式发电技术大规模应用提供电力系统仿真建模与分析控制的理论和技术储备，具有一定的工程应用前景。

## 今后进一步研究工作展望

配电网综合负荷本身就具有构成非常复杂、特性随机多变等特点，精确描述其等效特性的难度很大，分布式发电的发展必然使这些特点更加突出，描述难度进一步增大，要达到理论的完善和研究成果的实用化，还有很长的研究道路。结合本论文的工作，作者认为以后进一步研究主要在以下几方面：

(1) 基于现场实测数据的模型有效性进一步检验。现阶段由于含分布式发电的相关试验基地构造比较昂贵，物理模拟实验条件比较有限；同时目前实际电网中获取现场实测数据尚不完全具备条件，因此本文多采用基于 MATLAB 仿真环境

进行电力系统暂态仿真的方法获取激励和响应，从而替代现场实测数据。这是目前较符合现场实际的实验研究手段。随着分布式发电相关研究的逐步深入和相关技术的日益成熟，在进一步完善本文所取得的阶段性理论研究成果的同时，积极获取已有相关示范工程的现场实验数据，对本文提出的几种考虑分布式发电的配电网综合负荷模型类进行进一步的验证，达到工程实用化的标准。

(2) 微电网数字仿真平台的构建。在本文构建的风力发电、光伏电池、燃料电池和微型燃气轮机等典型分布式发电系统的基础上，结合微电网的概念，构建考虑不同分布式电源类型、负荷类型、网络结构等多元化的微电网数字仿真系统，为研究不同分布式电源及其综合特性对负荷建模的影响提供一个准确有效的数字仿真平台。

(3) 不同分布式电源在不同影响因素综合作用下对配电网综合负荷特性影响的统计规律性研究。配网侧接入多种分布式电源后，综合负荷特性的复杂性和影响因素大大增加。这些影响因素包括：分布式电源的不同物理特性、不同容量比例、不同物理位置；配网本身的负荷构成与负荷水平；配电网运行方式及拓扑结构；影响分布式电源出力的气候条件等。应当充分研究这些因素之间的相互作用机理及其规律，把握关键影响因素；深入研究这些影响因素综合作用下，综合负荷特性所表现出的特点和关键特征，掌握其统计规律性；基于大量典型网络的实测数据进行参数辨识，用概率统计的方法得到模型推荐参数。基于此，在本文建立的几种考虑分布式发电的配电网综合负荷模型类的基础上，建立能够描述不同影响因素组合条件下的广义综合负荷模型体系及其推荐典型参数。

(4) 含分布式电源的配电网广义综合负荷模型的评价方法研究。含分布式电源的配网侧综合负荷特性异常复杂，影响因素众多。因此，一方面很难期望采用某一种模型结构即可描述不同影响因素组合条件下的综合负荷特性；另一方面，同一模型结构对于不同影响因素组合条件下的综合负荷特性的描述能力具有差异性，而且这种差异性存在很大的不确定性。为此，必须研究模型的评价方法，在较充分和较准确地把握各种影响因素的相互作用机理及其统计规律性的基础上，建立科学合理的模型评价原则和评价指标体系，作为指导模型选择与应用的科学依据，这是含分布式电源的配网侧广义综合负荷模型具有良好工程实用性的客观要求。

负荷建模的困难性及其重要性，早已被公认为是电力系统科学的研究的难题之一，已经引起了广大科技工作者的高度重视。智能电网和分布式发电的快速发展，为负荷建模的研究提供了机遇也提出了考验，要使负荷建模理论取得很大突破，最终走向工程实际应用需要科研工作者付出更加艰辛的努力。

## 参考文献

- [1] Kundur P. Power system stability and control. 北京: 中国电力出版社, 2001
- [2] Taylor C W. Power system voltage stability. New York: McGraw-Hill, 1994
- [3] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模(第二版). 北京: 中国电力出版社, 2008
- [4] 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. 中国电机工程学报, 2002, 22 (9): 78-82
- [5] 章健. 电力系统负荷模型与辨识. 北京: 中国电力出版社, 2007
- [6] General Electric Company. Load modeling for power flow and transient stability studies. New York: EPRI Report of Project RP849-7, 1987
- [7] Hwang J C, Huang C W, Cheng C T. The development of load characteristics information network system to improve the estimated efficiency of load synthesis in TaiPower. In: First International Conference on Innovative Computing, Information and Control. Beijing, 2006, 6-9
- [8] 汤涌, 张东霞, 张红斌, 等. 东北电网大扰动试验仿真计算中的综合负荷模型及其拟合参数. 电网技术, 2007, 31 (4): 75-78
- [9] Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14 (3): 967-979
- [10] David J H. Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8 (1): 166-176
- [11] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (3): 1302-1313
- [12] Louie K W, Marti J R. A method to improve the performance of conventional static load models. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (1): 507-508
- [13] Marti J R, Louie K W. New aggregate load model for different load data formats. In: Electrical and Computer Engineering Conference. Montreal, 2003, 613-616
- [14] 李欣然, 贺仁睦, 周文. 综合负荷的广义感应电动机模型及描述能力. 华北电力大学学报, 1999, 26 (1): 18-24
- [15] 王卫国, 贺仁睦, 王铁强. 反映综合负荷动特性机理的感应电动机模型. 电力系统自动化, 2002, 26 (4): 23-28

- [16] 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. 中国电机工程学报, 2005, 25 (3): 8-12
- [17] 周海强, 范超, 鞠平, 等. 考虑配电网的综合负荷模型可辨识性分析. 电力系统自动化, 2008, 32 (16): 16-19
- [18] 陈谦, 孙建波, 蔡敏, 等. 考虑配电网综合负荷模型的参数确定. 中国电机工程学报, 2008, 28 (16): 45-50
- [19] 张广东. 牵引供电系统综合负荷模型结构研究: [湖南大学硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2008, 1-8
- [20] 金艳, 鞠平, 吴峰. 地方电厂对区域负荷建模的影响. 中国水电科技进展, 2002, 22 (5): 35-37
- [21] 鞠平, 何孝军, 黄丽, 等. 广义电力负荷的模型结构和参数确定. 电力系统自动化, 2006, 30 (23): 11-13
- [22] 王吉利, 贺仁睦, 马进. 配网侧接入电源对负荷建模的影响. 电力系统自动化, 2007, 31 (20): 22-26
- [23] 张红斌, 汤涌, 李柏青. 差分方程负荷模型参数分散性的研究. 中国电机工程学报, 2006, 26 (18): 1-5
- [24] 姚建刚, 陈亮, 戴习军, 等. 混沌神经网络负荷建模的理论研究. 中国电机工程学报, 2002, 22 (3): 99-102
- [25] 张浩然, 韩正之, 李昌刚. 基于支持相量机的非线性系统辨识. 系统仿真学报, 2003, 15 (1): 119-121
- [26] 罗庆跃, 黄大足, 黄乘顺, 等. 基于 DW 分离模糊负荷模型的无功功率优化. 长沙电力学院学报 (自然科学版), 2006, 21 (1): 10-14
- [27] 林舜江. 负荷动特性的建模及其对电压稳定的影响研究: [湖南大学博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2008, 3-5
- [28] 李培强. 统计测辨法综合负荷建模研究: [湖南大学博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2009, 4-10
- [29] 鞠平, 李德丰, 陆小涛. 电力系统非机理负荷模型的可辨识性. 河海大学学报, 1999, 27 (1): 16-19
- [30] Shi J H, He R M. Measurement-based load modeling: model structure. In: IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna, 2003, 1-5
- [31] 史真惠, 朱守真, 郑竟宏, 等. 改进 BP 神经网络在负荷动静比例确定中的应用. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 25-29
- [32] Rudolph G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5 (1): 96-101
- [33] 韩祯祥, 文福拴. 模拟进化方法简介. 电力系统自动化, 1995, 19 (12): 5-10

- [34] 李欣然, 金群, 刘艳阳, 等. 遗传策略的综合改进及其在负荷建模中的应用. 电网技术, 2006, 30 (11): 40-46
- [35] 石景海, 贺仁睦. 动态负荷建模中负荷时变性研究. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 83-90
- [36] 鞠平, 金艳, 吴峰, 等. 综合负荷特性的分类综合方法及其应用. 电力系统自动化, 2004, 28 (1): 64-68
- [37] 李欣然, 林舜江, 刘扬华, 等. 基于实测响应空间的负荷动特性分类原理与方法. 中国电机工程学报, 2006, 26 (8): 39-44
- [38] 林舜江, 李欣然, 李培强, 等. 基于实测响应空间的负荷动特性直接综合方法. 中国电机工程学报, 2006, 26 (21): 36-42
- [39] 贺仁睦. 电力系统精确仿真与负荷模型实用化. 电力系统自动化, 2004, 28 (16): 4-7
- [40] 鞠平, 潘学萍, 韩敬东. 3 种感应电动机综合负荷模型的比较. 电力系统自动化, 1999, 23 (19): 40-43
- [41] 马进, 贺仁睦, 周彦军. 负荷模型泛化能力的研究. 中国电机工程学报, 2006, 26 (21): 29-35
- [42] He R M, Ma J, Hill D J. Composite load modeling via measurement approach. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (2): 663-672
- [43] 郑竟宏, 朱守真. 基于滑差同调等值的空调群负荷建模. 电力系统自动化, 2008, 32 (16): 11-14
- [44] 顾丹珍, 艾莘, 陈陈, 等. 冲击负荷的实用建模新方法. 电力系统自动化, 2006, 30 (20): 10-14
- [45] 卫志农, 鞠平. 电力负荷在线建模方法. 中国电机工程学报, 1995, 15 (6): 361-369
- [46] 林舜江, 李欣然, 刘杨华. 考虑负荷动态模型的暂态电压稳定快速判断方法. 中国电机工程学报, 2009, 29 (4): 14-20
- [47] 马瑞, 贺仁睦, 王鹏, 等. 考虑及负荷静态电压特性的多目标交易研究. 中国电机工程学报, 2005, 25 (9): 1-6
- [48] 谢会玲, 鞠平, 陈谦. 广域电力系统负荷整体建模方法. 电力系统自动化, 2008, 32 (1): 1-5
- [49] Momoh J A. Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control . In : IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle, 2009, 1-8
- [50] Hughes J. IntelliGrid architecture concepts and IEC61850. In: IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Dallas, 2006, 401-404

- [51] EPRI. Intelligrid architecture status report: Technology transfer activities and recommendation. <http://intelligrid.epri.com>, 2005-12-23
- [52] DOE. Smart grid activities at the department of energy presented to FERC-NARUC collaborative leadership. <http://www.amsc.com>, 2008-05-07
- [53] DOE. Smart grid: An introduction. <http://www.oe.energy.gov>, 2008-09-10
- [54] U.S. Department of Energy. Obama administration announces availability of 3.9 billion to invest in smart grid technologies and electric transmission infrastructure. <http://www.energy.gov>, 2009-06-25
- [55] Rogai S. Telegestore project progresses and results. In: IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. Pisa, 2007, 1-2
- [56] Buchholz B, Schluecking U. Energy management in distribution grids European cases. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal, 2006, 1-2
- [57] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网研究综述. 电网技术, 2009, 33 (8): 1-7
- [58] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网. 电网与清洁能源, 2009, 25 (1): 7-11
- [59] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网. 中国电力, 2008, 46 (6): 19-22
- [60] Puttgen H B, MacGregor P R, Lambert F C. Distributed generation: semantic hype or the dawn of a new era. IEEE Power and Energy Magazine, 2003, 1 (1): 22-29
- [61] Chiradeja P, Ramakumar R. An approach to quantify the technical benefits of distributed generation. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19 (4): 764-773
- [62] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述. 电网技术, 2003, 27 (12): 71-75
- [63] 刘扬华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述. 电网技术, 2008, 32 (15): 71-76
- [64] Lasseter R H, Paipi P. Microgrids: a conceptual splution. In: IEEE 35<sup>th</sup> Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, 2004, 4285-4290
- [65] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 100-104
- [66] McDermott T E, Dugan R C. Distributed generation impact on reliability and power quality indices. In: IEEE Rural Electric Power Conference. Colorado,

2002, D3/1- D3/7

- [67] 庞建业, 夏晓宾, 房牧. 分布式发电对配电网继电保护的影响. 继电器, 2007, 35 (11): 5-8
- [68] 赵豫, 于尔铿. 电力零售市场研究(六) 分散式发电对电力系统的影响. 电力系统自动化, 2003, 27 (15): 25-28
- [69] Nara K, Hayashi Y, Ikeda K, et al. Application of tabu search to optimal placement of distributed generators. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Ohio, 2001, 918-923
- [70] Daly P A, Morrison J. Understanding the potential benefits of distributed generation on power delivery system . In : IEEE Rural Electric Power Conference. Arkansas, 2001, A2/1-A2/13
- [71] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响. 电网技术, 2006, 30 (19): 27-30
- [72] Brown R E, Freeman L A A. Analyzing the reliability impact of distributed generation. In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vancouver, 2001, 1013-1018
- [73] Choi B K, Chiang H D, Li Y H, et al. Measurement-based dynamic load models:derivation, comparison, and validation. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (3): 1276-1283
- [74] 张红斌, 汤涌, 张东霞, 等. 基于总体测辨办法的电力负荷建模系统. 电网技术, 2007, 31 (4): 32-35
- [75] 肖锋, 李欣然, 王立德, 等. 基于神经网络的并行差分方程综合负荷模型. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (1): 41-47
- [76] 王立德, 李欣然, 李培强, 等. 基于人工神经网络的综合负荷模型. 电网技术, 2008, 32 (16): 59-65
- [77] 李欣然, 贺仁睦, 周文, 等. 综合负荷感应电动机模型的改进及其描述能力. 电力系统自动化, 1999, 23 (9): 23-27
- [78] 鞠平, 赵夏阳, 李东辉. 电力负荷模型可辨识性分析方法. 电力系统自动化, 1999, 23 (19): 29-33
- [79] 施鹏飞. 从世界发展趋势展望我国风力发电前景. 中国电力, 2003, 36 (9): 54-62
- [80] Righter R W. Pioneering in wind energy:The California experience. Renewable Energy, 1996, 9 (1-4): 781-784
- [81] Schumacher K, Sands R D. Innovative energy technologies and climate policy in Germany. Energy Policy, 2006, 34 (18): 3929-3941

- [82] Enzensberger N, Fichtner W, Rentz O. Financing renewable energy projects via closed-end funds—a German case study. *Renewable Energy*, 2003, 28 (13): 2023-2036
- [83] Klaassen G, Miketa A, Larsen K, et al. The impact of R&D on innovation for wind energy in Denmark, Germany and United Kingdom. *Ecological Economics*, 2005, 54 (2-3): 227-240
- [84] Rodriguez J M, Fernandez J L, Beato D, et al. Incidence on power system dynamics of high penetration of fixed speed and doubly fed wind energy systems: study of Spanish case. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, 17 (4): 1089-1095
- [85] Ackermann T. Wind Power in Power Systems. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005, 745-746
- [86] Liu W Q, Gan L, Zhang X L. Cost-competitive incentives for wind energy development in China: institutional dynamics and policy changes. *Energy Policy*, 2002, 30 (9): 753-765
- [87] 王晓蓉, 王伟胜, 戴慧珠. 我国风力发电现状和展望. *中国电力*, 2004, 37 (1): 81-84
- [88] 李俊峰, 高虎, 施鹏飞, 等. 中国风电发展报告. 北京: 中国环境出版社, 2007, 61
- [89] 孙元章, 吴俊, 李国杰. 风力发电对电力系统的影响. *电网技术*, 2007, 31 (20): 55-61
- [90] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响. *电网技术*, 2007, 31 (3): 77-81
- [91] Chai C I, Lee W J, Fuangfoo P, et al. System impact study for the interconnection of wind generation and utility system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41 (1): 163-168
- [92] Vachtsevanos G J, Kalaitzakis K C. Penetration of wind electric conversion systems into the utility grid. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1985, PAS-104 (7): 1677-1683
- [93] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 基于约束规划的风电穿透功率极限计算. *中国电机工程学报*, 2002, 22 (5): 32-35
- [94] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电场的最大注入功率分析. *电网技术*, 2004, 28 (20): 28-32
- [95] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 含风电场电力系统的有功优化潮流. *电网技术*, 2002, 26 (6): 18-21

- [96] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究. 中国电机工程学报, 2007, 27 (25): 25-31
- [97] Datta R, Ranganathan V T. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18 (1): 163-168
- [98] 马幼捷, 张继东, 周雪松, 等. 含风电电力系统电压稳定问题的分岔. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20 (5): 117-123
- [99] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响. 电力系统自动化, 2006, 13 (18): 38-39
- [100] Salman K, Anita L J. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power based embedded generator. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (2): 793-802
- [101] 范伟, 赵书强. 考虑风力发电的电力系统小干扰稳定性分析. 华北电力大学学报, 2009, 36 (2): 23-27
- [102] 梁玉枝, 崔树平, 王冬梅. 对风电场接入电网后系统继电保护配置的探讨. 华北电力技术, 2009, 29 (9): 1-4
- [103] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊伊布拉. 风电场的继电保护. 可再生能源, 2009, 27 (1): 93-96
- [104] 白鸿斌, 王瑞红, 王真, 等. 风电场接入电网的电能质量分析方法研究及案例分析. 东北电力大学学报, 2008, 28 (6): 33-37
- [105] Kumano T. A short circuit study of a wind farm considering mechanical torque fluctuation. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal, 2006, 1-6
- [106] Wang W S, Chen M. Towards the integrating wind power into power grid in China. Electricity, 2004, 16 (4): 49-53
- [107] Strbac G, Shakoor A, Black M, et al. Impact of wind generation on the operation and development of the UK electricity systems. Electric Power Systems Research, 2007, 77 (9): 1214-1227
- [108] 雷亚洲, Gordon L. 国外风力发电导则及动态模型简介. 电网技术, 2005, 25 (12): 27-32
- [109] Petru T, Thiringer T. Modeling of wind turbines for power system studies. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (4): 1132-1139
- [110] Wei Q, Hareley R G, Venayagamoorthy G K. Dynamic modeling of wind farms with fixed-speed wind turbine generators. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, 2007, 1-8

- [111] 范高锋, 赵海翔, 王伟胜, 等. 基于恒速风电机组的风电场并网过程仿真. 电网技术, 2007, 31 (14): 20-23
- [112] Dusonchet L, Massaro F, Telaretti E. Transient stability simulation of a fixed speed wind turbine by Matlab/Simulink. In: International Conference on Clean Electrical Power. Capri, 2007, 651-655
- [113] 李俊峰, 王斯成, 张敏吉, 等. 中国光伏发展报告. 北京: 中国环境科学出版社, 2007, 24-25
- [114] 张颖颖, 曹广益, 朱新坚. 燃料电池: 有前途的分布式发电技术. 电网技术, 2005, 29 (2): 57-61
- [115] 李春华, 朱新坚, 胡万起, 等. 光伏/燃料电池联合发电系统的建模和性能分析. 电网技术, 2009, 33 (12): 88-93
- [116] Dakkak M, Hirata A, Muhida R, et al. Operation strategy of residential centralized photovoltaic system in remote areas. Journal of Renewable Energy, 2003, 28 (7): 997-1012
- [117] Nelson D B, Nehrir M H, Wang C. Unit sizing and cost analysis of stand alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems. Journal of Renewable Energy, 2006, 31 (10): 1641-1656
- [118] 李炜, 朱新坚, 曹广益. 基于一种改进的 BP 神经网络光伏电池建模. 计算机仿真, 2006, 23 (7): 228-230
- [119] Lalouni S, Rekioua D. Modeling and simulation of a photovoltaic system using fuzzy logic controller . In : Second International Conference on Development in eSystems Engineering. Dhabi, 2009, 23-28
- [120] 翁史烈, 翁一武, 苏明, 等. 熔融碳酸盐燃料电池动态特性的研究. 中国电机工程学报, 2003, 23 (7): 168-172
- [121] Lukas M D, Lee K Y, Ghezel A H. Development of a stack simulation model for control study on direct reforming molten carbonate fuel cell power plant. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14 (4): 1651-1657
- [122] 吴小娟, 朱新坚, 曹广宜, 等. 固体氧化物燃料电池的数学模型及自适应神经模糊辨识模型的研究. 电网技术, 2008, 32 (1): 9-14
- [123] Nether P. Two-dimensional transient model of a cascaded micro-tubular solid oxide fuel cell fed with methane. Journal of Power Sources, 2006, 157 (1): 325-334
- [124] 苗青, 曹广益, 朱新坚. 基于 ROLS 算法的 RBF 神经网络燃料电池电特性建模. 热能动力工程, 2005, 20 (4): 387-389
- [125] 卫东, 曹广益, 朱新坚. 基于神经网络辨识的质子交换膜燃料电池建模. 系

统仿真学报, 2003, 15 (4): 817-819

- [126] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用. 北京: 科学出版社, 2005, 27-29
- [127] 吴海涛, 孔娟, 夏东伟. 基于 MATLAB/Simulink 的光伏电池建模与仿真. 青岛大学学报(工程技术版), 2006, 21 (4): 74-77
- [128] 栗秋平, 周林, 刘强, 等. 光伏并网发电系统最大功率跟踪新算法及其仿真. 电力自动化设备, 2008, 28 (7): 21-24
- [129] 刘邦银, 段善旭, 刘飞, 等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪. 电工技术学报, 2009, 24 (6): 91-94
- [130] Shmilovitz D. On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2005, 152 (2): 239-248
- [131] 赵庚申, 王庆章, 许盛之. 最大功率点跟踪原理及实现方法的研究. 太阳能学报, 2006, 127 (10): 997-1001
- [132] Sera D, Teodorescu R, Hantschel J, et al. Optimized maximum power point tracker for fast-changing environmental conditions. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (7): 2629-2637
- [133] 李晶, 窦伟, 徐正国, 等. 光伏发电系统中最大功率点跟踪算法的研究. 太阳能学报, 2007, 28 (13): 268-272
- [134] Tse K K, Ho B M T, Chung H S H, et al. A comparative study of maximum power point trackers for photovoltaic panels using switching-frequency modulation scheme. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 410-418
- [135] Kottas T L, Boutails Y S, Karlis A D. New maximum power point tracker for PV arrays using controller in close cooperation with fuzzy cognitive networks. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (3): 793-803
- [136] Otieno C A, Nyakoe G N, Wekesa C W. A neural fuzzy based maximum power point tracker for a photovoltaic system. In: AFRICON. Nairobi, 2009, 1-6
- [137] 姚雪梅, 夏东伟, 李建. 基于 GA-RBF 神经网络的光伏电池 MPPT 研究. 青岛大学学报(工程技术版), 2009, 24 (2): 10-14
- [138] Esram T, Chapman P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (2): 439-449
- [139] Yu T C, Chien T S. Analysis and simulation of characteristics and maximum power point tracking for photovoltaic systems. In: International Conference on

Power Electronics and Drive Systems. Taipei, 2009, 1339-1344

- [140] Coelho R F, Concer F, Martins D C. A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking. In: Brazilian Power Electronics conference. Grosso, 2009, 673-678
- [141] 李炜, 朱新坚. 光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型. 计算机仿真, 2006, 23 (6): 239-243
- [142] Sungwoo Bae, Kwasinski A. Maximum power point tracker for a multiple-input cuk dc-dc converter. In: The 31st International Telecommunications Energy Conference. Incheon, 2009, 1-5
- [143] 蔡晓峰, 张鸿博. 光伏发电系统最大功率点跟踪的占空比扰动法仿真研究. 发电技术, 2009, 31 (9): 19-24
- [144] 张占松. 开关电源的原理与设计. 北京: 电子工业出版社, 2004, 68-71
- [145] 韦莉, 张逸成, 沈玉琢, 等. 基于 MATLAB 的大功率电源系统的建模与仿真. 系统仿真技术, 2009, 5 (3): 202-207
- [146] Zhu Y, Tomsovic K. Development of models for analyzing the load-follwing performance of microturbines and fuel cells. Electric Power Systems Research, 2002, 62 (1): 1-11
- [147] 朱新坚. 中国燃料电池技术现状与展望. 电池, 2004, 34 (3): 202-203
- [148] US Department of Energy. Fuel Cell Handbook. Morgantown: EGG Services Parsons Inc, 2000, 3-24
- [149] Li Y H, Choi S S, Rajakaruna S. An analysis of the control and operation of a solid oxide fuel-cell power plant in an isolated system. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2): 381-387
- [150] Hatzidioniu C J, Lobo A A, Pourboghrat F, et al. A simplified dynamic model of grid-connected fuel cell generators. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17 (2): 467-473
- [151] 汤根土, 骆仲泱, 倪明江, 等. 平板状阳极支撑固体氧化物燃料电池的数值模拟及性能分析. 中国电机工程学报, 2005, 25 (10): 116-121
- [152] 王志群, 朱守真, 周双喜. 逆变型分布式电源控制系统的设计. 电力系统自动化, 2004, 28 (24): 61-70
- [153] 任碧莹, 孙向东, 同向前, 等. 并网逆变器的改进误差拍控制策略. 电力电子技术, 2009, 43 (8): 35-36
- [154] 吴佳宇, 马秀娟, 孙玉德, 等. 光伏并网逆变器控制策略研究. 电源技术应用, 2009, 12 (8): 10-12
- [155] Hatzidioniu C J, Nikolov E N, Pourboghrat F. Power conditioner control and

protection for distributed generators and storage. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 18 (1): 83-90

- [156] Choi S S, Li B H, Viathgamawa D M. Design and analysis of the inverter-side filter used in the dynamic voltage restorer. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17 (3): 857-864
- [157] 夏小荣, 陈辉明, 蒋大鹏. 电压型 PWM 并网逆变器. 电源技术应用, 2005, 8 (10): 21-24
- [158] 丁明, 严流进, 范美琴, 等. 分布式发电中燃料电池的建模与控制. 电网技术, 2009, 33 (9): 8-13
- [159] 侯健敏, 周德群. 分布式能源研究综述. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2008, 4 (4): 289-293
- [160] 左远志, 杨晓西, 丁静. 微型燃气轮机分布式能源发展冷思考. 煤气与热力, 2008, 28 (6): 10-13
- [161] 王建, 王志伟. 微型燃气轮机在我国能源工业中的发展前景. 发电设备, 2006, 20 (6): 394-397
- [162] 孙可, 韩祯祥, 曹一家. 微型燃气轮机系统在分布式发电中的应用研究. 机电工程, 2005, 22 (8): 55-60
- [163] 靳智平. 微型燃气轮机发电在我国的应用前景. 电力学报, 2004, 19 (2): 95-97
- [164] Saha A K, Chowdhury S P, Chowdhury S, et al. Microturbine based distributed generator in smart grid application. In: The 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Czech Republic, 2009, 1-6
- [165] 李政, 王德慧, 薛亚丽, 等. 微型燃气轮机的建模研究(上)——动态特性分析. 中国动力工程学报, 2005, 25 (1): 13-17
- [166] Power W I. Simplified mathematical representations of heavy duty gas turbines. Journal of Engineering for Power, Transactions ASME, 1983, 105(4): 865-869
- [167] 闫大朋, 闫士杰, 李爱平, 等. 微型燃气轮机的新型神经网络控制的研究. 控制工程, 2008, 15 (5): 541-543
- [168] Saha A K, Chowdhury S, Chowdhury S P, et al. Modeling and performance analysis of a microturbine as a distributed energy resource. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24 (2): 529-538
- [169] Gaonkar D N, Patel R N, Pillai G N. Dynamic model of microturbine generation system for grid connected/islanding operation . In : IEEE International

Conference on Industrial Technology. Mumbai, 2006, 305-310

- [170] Leonard M, Dharival R S. Manufacture and testing of prototype microturbine module. Electronics Letters, 2006, 42 (8): 460-462
- [171] Soon K Y, Milanovic J V, Hughes F M. Overview and comparative analysis of gas turbine models for system stability studies. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23 (1): 108-118
- [172] Fethi O, Dessaint L A, Al-Haddad K. Modeling and simulation of the electric part of a grid connected microturbine. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting. Denver, 2004, 2212-2219
- [173] Schiemenz I, Stiebler M. Control of a permanent magnet synchronous generator used in a variable speed wind energy system. In: IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Cambridge, 2001, 872-877
- [174] 王旭, 黄凯征, 汪万伟. 三相电压型 PWM 整流器建模和仿真研究. 系统仿真学报, 2008, 20 (19): 5204-5207
- [175] 王成山, 马力, 王守相. 基于双 PWM 换流器的微型燃气轮机系统仿真. 电力系统自动化, 2008, 32 (1): 56-60
- [176] Al-hinai A, Schoder K, Feliach A. Control of grid-connected split-shaft microturbine distributed generator. In: The 35th Southeastern Symposium on System Theory. Toronto, 2003, 84-88
- [177] Guda S R, Wang C, Nehrir M H. A simulink-based microturbine model for distributed generation studies. In: The 37th Annual North American Power Symposium. Ames, 2005, 269-274
- [178] 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. 电网技术, 2004, 28 (6): 10-14
- [179] 张进, 贺仁睦. 基于参数灵敏度分析的负荷建模研究. 现代电力, 2005, 22 (5): 29-32

## 致 谢

从课题的选题、研究到本论文的撰写，自始至终得到了导师李欣然教授的悉心指导，论文的字里行间无不浸透着导师的心血和汗水。四年来，从做人到做事，从学业到生活，导师及师母何青老师的关怀和教诲使我受益终生，没齿难忘。特别是导师渊博的学识、严谨的治学态度和平易近人的工作作风，是我终生学习的楷模。借此论文脱稿之际，谨向我的恩师李欣然教授和师母何青老师表达学生最诚挚的敬意和感谢。

本文得到国家自然科学基金（50977023）、湖南省自然科学基金（10JJ2043）的资助，在此致以最诚挚的感谢。同时，在论文工作过程中，得到了湖南省电力公司调度通信局陈辉华教授级高工、宋军英博士，湖南省电力公司发展策划部朱湘有高工、唐外文高工等的大力支持与帮助，作者在此一并表示衷心的感谢。

感谢湖南大学电气与信息工程学院几年来对我的培养，感谢电气工程系各位老师在学习、科研和生活上给予的帮助和支持。感谢师兄李培强副教授、林舜江博士，在论文写作过程中给予的帮助；感谢实验室马亚辉、王玲、毕正军、李小菊、张元胜、肖圆圆、颜艳丽等师弟师妹在论文工作中的共同探讨和给予的大力帮助。

最后尤其要感谢我的家人对我的理解和支持。每当我疲倦和懈怠的时候，父母的鼓励和鞭策言犹在耳，成为我继续前行的勇气和信心。感谢我的妻子谢琼对我的宽容与支持，是她一直以来默默的理解与付出，成为我顺利完成学业的坚强后盾。在论文工作完成之际，年初也迎来了宝宝的诞生，初为人父的感觉使我倍感欣喜的同时也感到肩负的责任，惟有不懈的努力才不辜负上天对我的恩赐。

浸润在湖南大学千年人文底蕴的文化中，使我四年的博士学习生涯张弛有度、苦乐相依、收获颇丰，实为人生幸事。感谢母校湖南大学和所有关心和支持我的家人、老师和朋友，惟有以此作为一个新的起点，继续前行，方可不负这一切。

钱 军

2010 年 4 月于湖南大学

## 附录 A（攻读学位期间所发表的学术论文）

- [1] 李欣然, 钱军, 王立德, 等. 配电网集结等效的异步电动机综合负荷模型及其总体测辨建模. 电工技术学报, 2009, 24 (4): 175-185. (EI 收录号: 20092112091030)
- [2] Qian Jun, Li Xinran, Hui Jinhua. Impact of wind generation on load modeling of distribution network. In: First International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing, 2009, 1-5. (EI 收录号: 20101712891978)
- [3] 钱军, 李欣然, 王玲, 等. 面向负荷建模的光伏电池和燃料电池建模及其等效描述. 电网技术, 2010 年 2 月 1 日已录用 (稿件编号: D10-0047). (EI 源刊)
- [4] 钱军, 李欣然, 马亚辉, 等. 面向负荷建模的微型燃气轮机建模及其等效描述. 电力系统自动化, 2010 年 7 月 16 日已录用 (稿件编号: 201001044). (EI 源刊)
- [5] 钱军, 李欣然, 毕正军, 等. 不同运行方式下风力发电对配电网综合负荷建模的影响. 湖南大学学报 (自然科学版), 2010 年 3 月 28 日已录用 (稿件编号: 20093486). (EI 源刊)
- [6] 李欣然, 惠金花, 钱军 (通信作者), 等. 风力发电对配电网负荷建模的影响. 电力系统自动化, 2009, 33 (13): 89-94. (EI 收录号: 20093112227722)
- [7] 钱军, 李欣然, 惠金花, 等. 分布式发电和微电网的研究综述. 见: 2008 年全国博士生学术论坛电气工程论文集 (上). 成都: 西南交通大学出版社, 2008, 517-526.
- [8] 李欣然, 姜学皎, 钱军, 等. 基于用户日负荷曲线的用电行业分类与综合方法. 电力系统自动化, 2010, 34 (10): 56-61. (EI 收录号: 20102613046037)
- [9] 徐振华, 李欣然, 钱军, 等. 变电站用电行业负荷构成比例的在线修正方法. 电网技术, 2010, 34 (7): 52-57.
- [10] 钱军, 冯林桥, 张文涛, 等. 地区电网继电保护仿真智能系统. 电力自动化设备, 2007, 27 (4): 111-114.
- [11] 钱军, 冯林桥, 张文涛, 等. 地区电网继电保护整定及其仿真智能系统的研究. 见: 中国高等学校电力系统及其自动化专业第 22 届学术年会论文集. 南京: 河海大学出版社, 2006, 158.

## 附录 B（攻读学位期间所参加的科研工作）

- [1] 国家自然科学基金项目（50977023）. 考虑分布式发电的电力系统负荷建模关键理论与技术研究. 主要科研人员.
- [2] 湖南省自然科学基金项目（10JJ2043）. 含分布式发电的智能配电网负荷建模关键理论与技术研究. 主要科研人员.
- [3] 湖南省电力公司重点电力基金项目. 基于 Internet/Intranet 的在线准实时广域负荷建模技术支持系统研究与开发. 主要科研人员.
- [4] 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目（20070532052）. 电气化铁路牵引负荷建模及其对公用电网运行状态的影响研究. 主要科研人员.
- [5] 湖南省电力公司重点电力基金项目. 地区电网建设规模指标体系与评估方法研究. 主要科研人员.