



**A comprehensive load modeling considering fuel cells and  
photovoltaic power generation**

**by**

**Wang Ling**

**B.E.(Hunan University)2008**

**A thesis submitted in partial satisfaction of the**

**Requirements for the degree of**

**Master of Engineering**

**in**

**Electrical Engineering**

**in the**

**Graduate School**

**of**

**Hunan University**

**Supervisor**

**Professor LI Xinran**

**April, 2011**



# 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： 王玲

日期： 2011年5月22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： 王玲 日期： 2011年5月22日

导师签名： 李航 日期： 2011年5月22日



## 摘 要

电力系统的仿真计算是电力系统的运行分析、规划设计的基本决策依据,其计算结果准确与否直接关系到电力系统能否安全稳定地运行。由于电力系统负荷具有随机性、分布性、时变性、多样性及高度非线性等特点,给电力系统综合负荷建模带来很大困难,目前电网仿真计算所用的综合负荷模型不够成熟,特别是分布式电源广泛接入以后,传统的负荷模型将发生变化。分布式电源(Distributed Generating Source, DGS)的大量出现,改变了传统配电网的负荷组成和拓扑结构,给电力系统分析与运行控制带来一系列新的亟待解决的理论方法与技术问题,考虑分布式电源影响的配电网综合负荷建模即是其中之一。光伏发电(Photovoltaic Cell, PV)和燃料电池(Fuel Cell, FC)发电的诸多优点,使得这两种直流电源的装机容量不断增加,因此,研究光伏发电和燃料电池发电系统的负荷建模具有重要的理论和实际意义。

本文首先比较分析了分布式发电和传统发电在经济性和环保性上的差别,分析了分布式发电系统对电网带来的影响;在此基础上,对燃料电池(Fuel cell, FC)发电系统的运行原理、各模块的数学模型和并网装置的控制策略进行了详细的阐述,并基于 Matlab/Simulink 仿真工具箱构建了完整的燃料电池发电系统,通过实验仿真对其运行特性进行了机理分析。通过对 FC 发电系统的稳态和动态运行特性的仿真分析,须将 FC 看作一个功率消耗为负的广义动态负荷,因此提出用二阶微分状态方程描述的 FC 等效模型;通过对不同扰动强度下的仿真建模比较分析,验证了该等效描述模型的有效性;通过模型适用性检验,验证了该模型良好的泛化能力和参数稳定性。

为研究包含光伏发电的配电网综合负荷建模,本文首先详细阐述了光伏电池仿真数学模型,并采用适合光伏电池的双环控制并网控制策略,在 Matlab/Simulink 仿真工具中构建了完整的 PV 发电系统;PV 作为典型的直流分布式电源,其受环境因素影响较大,白天有阳光,功率输出较大,夜晚基本没有功率输出,所以须通过 MPPT、DC/DC 和 DC/AC 变换控制,同时增加蓄电池模块平抑 PV 发电系统的出力波动,通过对 PV 发电系统的稳态和动态运行特性进行初步仿真分析,可以将 PV 看作恒功率的静态负荷,并验证了 PV 等效模型的自描述能力。

**关键词:** 电力负荷模型; 分布式电源; 光伏电池; 燃料电池; 广义动态负荷; 动态等效模型; 总体测辨法



## Abstract

The power system simulation is the main decision basis for power system analysis and planning. Accuracy of calculations is directly related to security and stability of power system. Because the power system load has the characteristics of randomness, distributivity and multiformity, the load modeling of the actual power system is very difficult. The current composite load modeling used in simulation is not mature yet, particularly, the traditional load modeling will be changed with distributed generation source(DGS) connected to the distribution network. Large numbers of DGS have changed the traditional load composition and topology of distribution network, and bring a series of new theoretical methods and technical problems demanding prompt solution to power system analysis and operation control, one of them is the composite load modeling of distribution network considering distributed generation. Photovoltaic cell (PV) and fuel cell (FC) power generation have many advantages, so the capacity of DC distributed power supply is increasing, and it has important theoretical and practical significance to study the modeling of PV and FC generation system.

Firstly, the economy and environmental protection of the traditional power and distributed generation are compared, the influence brought by distributed generation sources on power system is analyzed; this paper describes the principle of FC generating system, the mathematical model of each module and control strategy in detail, and then builds a complete FC power generation system based on Matlab/Simulink and analyzes its operating characteristics through the simulation. The analysis results of the steady and dynamic operating characteristics of FC show that FC can be considered as a generalized dynamic load with negative power consumption. The second order differential equation of state description equivalent model was presented. The validity, generalization of this equivalent description model and stability of the parameters were testified by comparison of simulation modeling with different disturbance levels.

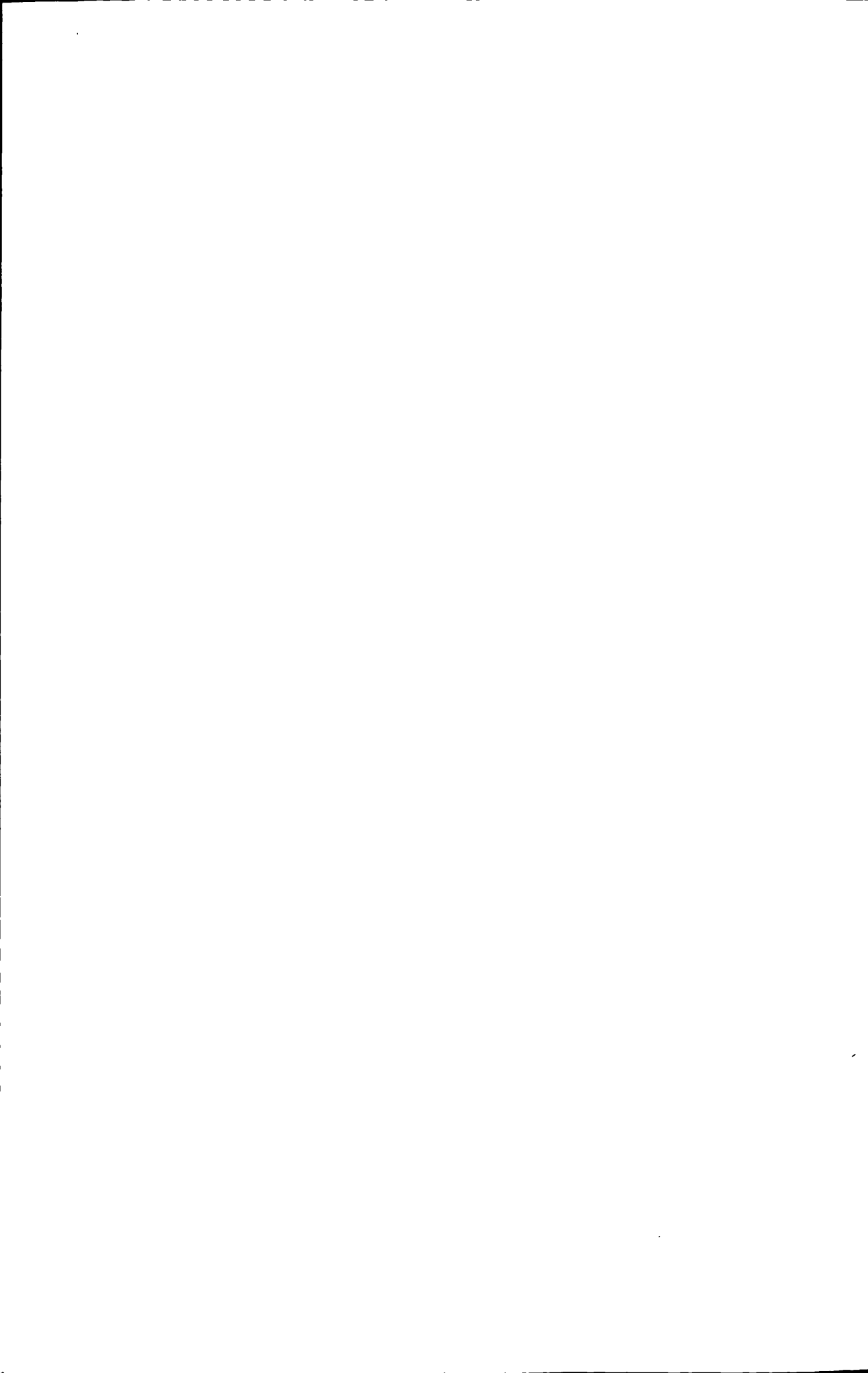
In order to study the composite load modelling of distribution network with PV, this paper describes the mathematical models of PV, and dual-loop control strategy fit for photovoltaic cells is adopted to build a photovoltaic power generation system in Matlab/Simulink. As a typical DC distributed power, PV is influenced by





environmental factors, there is a lot of power output at sunny day but there is little even no power output at night, so it is connected to power grid through the MPPT, DC/DC and DC/AC conversion control, besides, the battery module is also used to restrain the output fluctuations of PV power generation system. The constant power static load model can be used to describe the characteristics of PV by the preliminary analysis of the steady state and dynamic operating characteristics of PV power generation system. Finally, the description of the equivalent model is verified.

**Key Words:** Load model; Distributed generation source; Photovoltaic cells; Fuel cells; Generalized dynamic load; Dynamic equivalent model; Measurement-based method

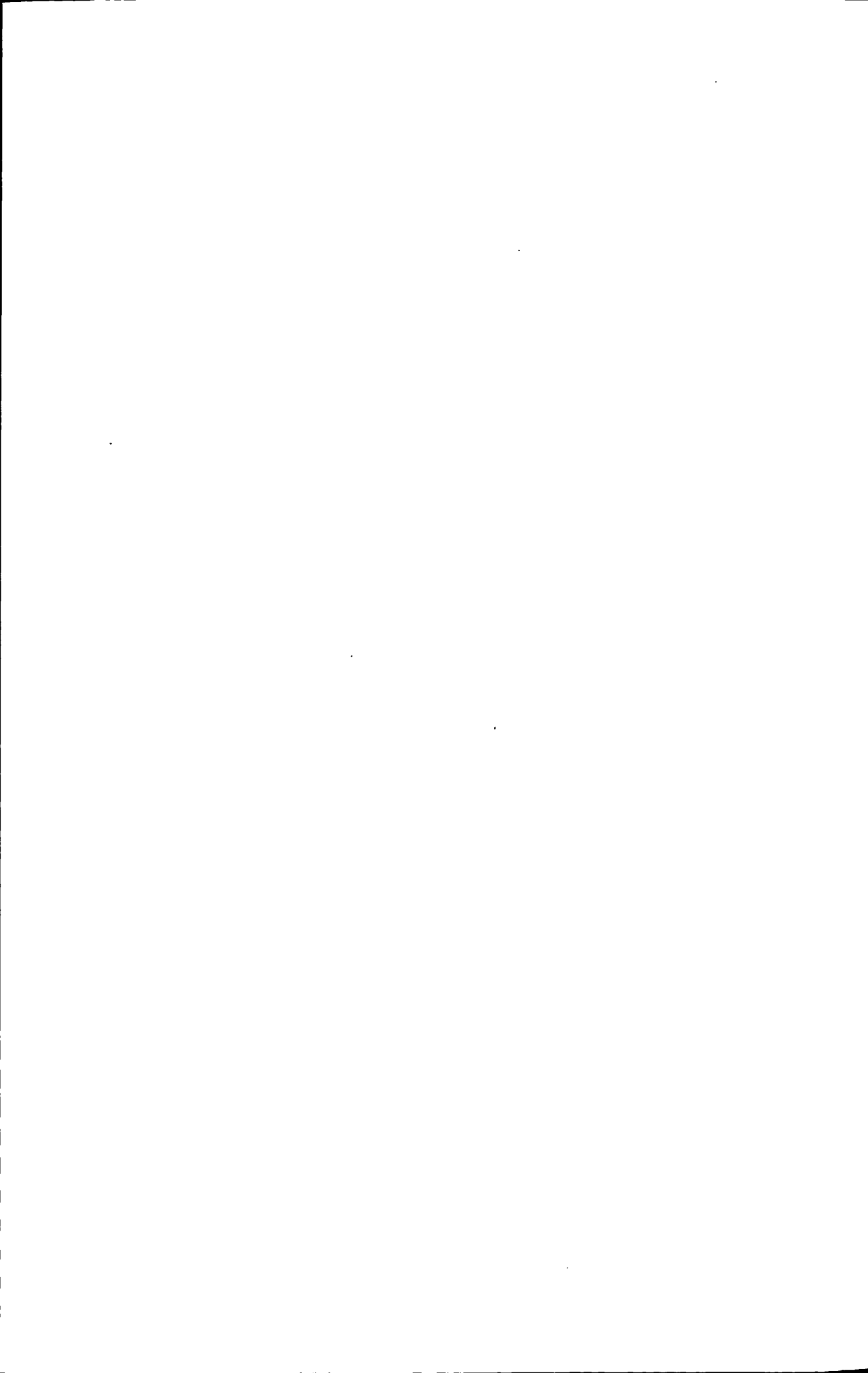


## 目 录

学位论文原创性声明和学位论文授权使用授权书 .....	I
摘 要 .....	II
Abstract.....	III
<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 本课题研究的背景和意义 .....	1
1.2 分布式发电和传统发电特性比较 .....	2
1.2.1 分布式发电的经济性 .....	3
1.2.2 传统发电对环境的影响 .....	4
1.2.3 分布式发电对环境的影响 .....	4
1.3 分布式发电系统的主要技术问题 .....	5
1.3.1 分布式智能控制 .....	6
1.3.2 分布式发电对电网影响 .....	6
1.3.2.1 分布式发电对电力系统电压的影响 .....	7
1.3.2.2 分布式发电对电力系统电能质量的影响 .....	7
1.3.2.3 分布式发电对继电保护的影响 .....	8
1.3.2.4 分布式发电对电力市场的影响 .....	8
1.4 分布式发电负荷建模 .....	9
1.5 本文的主要工作 .....	10
<b>第二章 燃料电池的数字仿真模型</b> .....	<b>11</b>
2.1 燃料电池的发展现状 .....	11
2.2 燃料电池的工作原理 .....	11
2.3 燃料电池发电系统 .....	12
2.4 燃料电池分类 .....	14
2.5 燃料电池发电系统建模 .....	15
2.5.1 SOFC 数学建模 .....	15
2.5.2 基于 Matlab/Simulink 的 SOFC 建模 .....	17
2.6 本章小结 .....	18
<b>第三章 燃料电池等效建模方法</b> .....	<b>19</b>
3.1 燃料电池发电系统的机电暂态等效描述 .....	19
3.1.1 暂态过程中 SOFC 的动态特性 .....	19
3.1.2 SOFC 的等值电路模型 .....	20



3.1.3 SOFC 的等值数学模型 .....	20
3.2 燃料电池发电系统建模校验 .....	22
3.2.1 模型参数辨识以及模型检验 .....	22
3.2.2 模型的描述能力 .....	24
3.2.3 模型的泛化能力 .....	25
3.3 模型的参数稳定性 .....	26
3.4 讨论 .....	26
3.5 本章小结 .....	27
第四章 光伏发电系统建模 .....	28
4.1 光伏电池的发展现状 .....	28
4.2 光伏电池的工作原理 .....	29
4.3 光伏电池发电系统建模 .....	31
4.3.1 光伏电池数学模型 .....	32
4.3.2 最大功率点跟踪控制 .....	34
4.3.3 PV 并网控制策略 .....	35
4.4 PV 的运行特性 .....	37
4.4.1 光照强度 $G$ 对输出功率影响 .....	37
4.4.2 电池温度 $T$ 对输出功率影响 .....	38
4.4.3 串联阻抗 $R_s$ 对输出功率影响 .....	38
4.4.4 并联阻抗 $R_{sh}$ 对输出功率影响 .....	39
4.4.5 光伏电池效率 .....	40
4.5 PV 发电系统的等效特性描述 .....	40
4.5.1 PV 的静态特性 .....	40
4.5.2 PV 的动态特性 .....	41
4.6 PV 的孤岛效应 .....	42
4.7 本章小结 .....	44
结论 .....	46
参考文献 .....	48
致谢 .....	53
附录 A (攻读学位期间所发表的学术论文目录) .....	54
附录 B (攻读学位期间所参加的科研项目) .....	55



# 第一章 绪论

## 1.1 本课题研究的背景和意义

由于工业的发展需求,人类对能源需求量日益增长,更多地开发利用洁净的可再生新能源成为关系到人类生存和发展的重大社会问题,新能源发电因此受到高度重视和快速发展,其装机容量在电网中所占的比例快速增长。我国经济的发展,对电力的需求也越来越多,用户对电能质量的要求也越来越高。但是只依靠传统的发电方式不能满足电力的发展和负荷的需求。首先,中国的电力目前主要依靠常规一次能源:煤、石油和天然气等获得,这些短期内不可再生的能源,其总量随着人们的大量开采开发及应用而逐步减少,发现和利用新的能源已是人类所共同需要解决的问题;其次,利用这些化石能源引起的酸雨、温室效应和臭氧层破坏等环境污染问题也已成为制约全球经济发展的重要因素,并且人类生存环境也因此日益恶化;再次,日益增长的电力需求已使现有的中心电站和输配电系统出现了过载现象。更为严重的是,近年来世界范围内的大电网故障以及战争造成的大面积停电事故使世界各国都开始认识到电力体制改革的重要性。随着电网规模的不断扩大,超大规模电力系统的弊端也日益凸现,规模庞大的电网成本高,运行难度大,难以适应用户越来越高的安全和可靠性要求以及多样化的供电需求。传统的电力生产更加难以满足现在各种各样用户对于电能质量和可靠性的需求,而分布式发电技术能够帮助缓解电力供应的紧张局面,提高供电质量和可靠性,因此成为传统发电技术的重要补充。

分布式发电<sup>[1-2]</sup>、微电网<sup>[3]</sup>、智能电网等概念和技术在此条件下应运而生。分布式发电主要优点是:发电方式灵活、不依赖电网运行状况、其分散存在可以弥补大电网安全稳定性的不足、操作简单(可快速投切,即插即用)、经济效益好等,构建自愈、坚强的智能电网需要这样的分布式电源;分布式发电大都是采用清洁的可再生能源,满足可持续发展需求,能有效地提高能源利用效率并且使得投资成本下降,而且具有友好的环境性。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,电网发展需要分布式发电,开展分布式发电的相关研究也成大势所趋。虽然分布式发电有着良好的经济性和对环境的友好性,潜力相当可观,但是目前对于分布式电源的运行机理,控制策略,运行控制等还有一系列的问题尚待解决,尤其是分布式电源接入配电网以后,将对传统的负荷模型产生很大的影响,描述该区域负荷的特性传统负荷模型就有可能不能很好的反映该区域的负荷特性,因此,研究含有分布式电源的综合负荷模型显得尤为重



要，这是分析和控制含有分布式电源的基础。

电力系统的数学模型是电力系统数字仿真的基础，模型的准确性直接影响到仿真的结果和以仿真结果为基础而产生的决策方案，进而关系到决策方案实施所产生的经济效益和社会效益，同时也关系到电网的安全稳定性，所以对电力系统进行建模是非常有必要的。随着我国主要电网的全国性互联进程的推进，电网规模不断扩大，复杂程度越来越高，电网的动态稳定性及电压稳定性问题更加突出，负荷模型对电力系统数字仿真结果的影响日益增大。因此，为了使系统分析结果更加可信，使分析拥有定量的作用，为电力系统规划、运行和控制提供准确的依据，有必要建立切实符合实际的负荷模型。分布式电源<sup>[4]</sup>的大量出现，改变了传统配电网的负荷组成和拓扑结构，给电力系统分析与运行控制带来一系列新的亟待解决的理论方法与技术问题<sup>[5]</sup>，考虑分布式电源影响的配电网综合负荷建模即是其中之一<sup>[6-8]</sup>。分布式发电中光伏发电和燃料电池发电是两种重要的技术，之所以把它们归类到一起研究分析是由于这两种电源都是直流型，都需经过逆变以后与大电网连接。

## 1.2 分布式发电和传统发电特性比较

各国的电网正向集中发电、远距离输电和大电网互联发展，这将是电能生产、输送和分配的主要方式，正在为全世界 90% 以上的电力负荷供电。但这种方式也存在一些弊端，主要有：①跟踪负荷变化的灵活性不好，例如夏季空调负荷的激增会导致电力供应短时不足，而为这种短时的峰荷建造专门的发输电设施是得不偿失的，因为其利用率极低，将会造成很大的浪费。②在大型的互联型电力系统中，局部事故极易扩散，由于故障导致大面积停电的可能性增大。同时，电力系统越庞大，事故(如遭受雷击造成短路等)发生的概率越高。因此，现有的电力系统不仅“笨拙”而且“脆弱”。为了能降低能耗、节省投资、提高电力系统可靠性和灵活性，世界许多能源学者和电力专家公认的办法是使用大电网与分布式发电(Distributed Generation, DG)结合供电的方式，这将是未来电网的发展方向。分布式发电指的是通过规模不大(几十 kW~几 MW)、分布在负荷附近(一般都是接入 10kV 以下的配电网)的发电设施实现高效、经济、可靠地发电<sup>[2-3]</sup>。按照采用发电使用技术的不同，分布式发电可以分为内燃发电机发电、光伏发电、燃料电池发电、微型燃气轮机发电、以及风力发电等。集中发电与分布式发电相结合的发电方式可以充分发挥两种方式的优点。目前采用主要形式是将投资省、发电方式灵活、与环境兼容分布式发电与大电网联合运行(如风力发电等等)，提高整个电力系统运行灵活性、可靠性和安全性。

### 1.2.1 分布式发电的经济性

经济性是分布式发电设计评估和系统运行应重点考虑的问题，一种分布式电源能否大范围使用，首先需要回答下述几个基本问题<sup>[7]</sup>：1)分布式发电系统到底应该多大，它是否能够承担所有的用电负荷，还是只能承担平均负荷。2)分布式发电生产的电能价格如何，能否与其他形式的能源竞争。3)分布式发电系统的经济利益如何，是否值得进行投资。4)对于一栋建筑物所需电力和燃油消耗率，是否值得安装一套分布式发电系统。分布式发电系统的费用基本为下述两种类型：1)初期投资—建立一个分布式发电系统的费用是多少，例如建立一套微型涡轮发电机系统的一次性投资。2)运行费用（即维持和运行一套系统的费用）。因此应该在一个统一的结构下，计算出一次性投资和运行费用，并将之折算为每年的总费用，同样，系统的赢利应考虑到分布式发电系统的经济寿命。简单地说，分布式发电系统的投资者希望其赢利大于其所投资的费用，这样的分布式发电系统才具有较好的经济型。分布式电源的成本包括以下几部分：1.装机成本；2.财务成本（即除自有资金外，分布式发电建设方可结合诸如债务融资、有限合伙、卖主融资、抵押贷款、一般义务债券、收入债券、租赁、节能费用合同、电力公司和政府计划、政府特许等多种形式来改善项目的现金流和收益。）；3.燃料成本。各种分布式电源的装机成本见表1.1。

表1.1 分布式发电装机成本比较

发电类型	装机成本/[万元·kW <sup>-1</sup> ]
柴油发电机—30kW	0.6
柴油发电机—200kW	0.18
柴油发电机—500kW	0.18
微型燃气轮机—80kW	1.2
微型燃气轮机—80kW(CHP)	1.35
燃气轮机—500kW	0.66
燃气轮机—1000kW (CHP)	0.67
燃料电池—PAFC 200kW	3
燃料电池—MCFC 250kW	3.5
燃料电池—MCFC 250kW(CHP)	3.5
风力发电	0.9~1
太阳能发电	6~10
联合循环燃气轮机—3×390 MW	0.35

从以上表格可以看出，分布式发电的装机成本偏高，直接影响了分布式电源的上网电价，但是，分布式电源的运行率很高，分布式发电应可以积极采用热电

联产或冷热电联产的方式来改善分布式电源的经济性。虽然现在分布式电源的初期建设投资比较大，但是大多数分布式电源都是利用可再生能源，而且运行费用比较少，长期的经济性是比较可观的。所以现在电网的发展方向应该是积极引导用户侧分布式电源的投资建设，尽量发挥其作用，用于降低网损以及延缓输配电投资。

### 1.2.2 传统发电对环境的影响

传统的电力工业（火电厂）是空气污染的主要根源，占 67% 发电量的化石燃料电厂释放的气体中，包含了许多直接对人类健康有害的成分，例如二氧化硫、一氧化碳、氧化氮、灰尘、挥发性的有机成分以及包括铅和水银的各种重金属等。另外，在太阳光和热的作用下，挥发性的有机成分与氧化氮化合将破坏臭氧层，这是造成现在臭氧空洞的主要原因。电力生产产生的废气如二氧化硫（ $\text{SO}_2$ ）、氧化氮（ $\text{NO}_x$ ）和二氧化碳（ $\text{CO}_2$ ）等分别占全社会废气排放量的 66%、29% 和 35%。火力、水力和核电三者相比，火力生产对环境的污染最大，治理的工作最重。可以将火电生产对环境的污染归纳为三类，即废水、废气、废渣（以上三项俗称三废）、废热、噪声 5 种形式。污染源有以下几种：粉尘、二氧化硫、粉煤灰、热污染、噪声（这一污染主要是针对电厂的工人）等等。随着自动化水平的提高。工人基本上不用在现场长期工作，故影响较少。此外，还有冲灰水的污染，随着电厂实现了废水的零排放，故影响较小。

按计划经济的市场结构运行对电力进行多年的调节，电力工业将面临巨大的改革，包括新的发电和输电技术以及竞争和规章有关的政策的转变，竞争的电力市场可能导致令人讨厌的污染排放的增加。如果更低的基本负荷电价使电力需求增加，则除了发电量的增加外，还将伴随着污染排放的增加。另外，不法商贩可能为了单纯贪图利益，重新启用陈旧的、污染非常严重的发电设备。电力工业的重组产生的环境影响不是简单的关系，最终产生的环境方面的效果取决于对下述两个方面的动态过程的平衡所作出的决定：第一个方面是电力需求的平衡。为了向新的建筑物或当前供电区域中不断增加的负荷供电，是对正在运行的发电设备进行增容还是开发和采用新涌现的发电技术如分布式发电技术；第二个方面是或者采用当前使用的环境保护规章制度，或者促进将来的环境保护规章制度的颁发的决定。

### 1.2.3 分布式发电对环境的影响

以天然气，沼气，煤层气或燃油为燃料的燃汽轮机，余热锅炉，溴化锂吸收式制冷机组组成的小型分布式能源，由于建在用户侧，减少电能输送损失，并能实现优势能源的梯级利用，因而效率极高。其二次能源以分布在用户端的电，热，冷联产为主，其他能源供应系统为辅，将电力，热力，制冷与蓄能技术结合，以

直接满足用户多种需求,实现能源梯级利用,并通过公用能源供应系统提供支持和补给。各系统在低压电网和冷、热水管道上进行就近支援,互相保证能源供应的可靠性,分布式能源系统将能源利用效率发挥到最大状态,从而能节约能源,保护环境。对于分布式发电技术,二氧化硫的排放可以忽略。几种分布式发电技术和常规的发电设备的空气污染排放如表 1.2 所示。

表 1.2 不同发电技术的空气污染量

采用的技术	污染物			
	NO <sub>x</sub> (g/kW.h)	CO <sub>2</sub> (g/kW.h)	CO(g/kW.h)	SO <sub>2</sub> (g/kW.h)
常规发电				
煤	0.1~2	55.9	—	0.07~2.55
天然气	0.005~1	31.7	—	0.3
残余燃料油	0.05~1	46.8	—	—
分布式发电				
微型涡轮发电机	0.4	119	0.11	0.0006
内燃发电机(汽油)	3.1	119	0.79	0.0015
内燃发电机(柴油)	2.8	150	1.5	0.3
燃料电池	0.003	—	—	0.0204

分布式发电设备的排放数值是通过理论计算或实验室测试得到的,每一种分布式发电技术实际的空气污染排放流量取决于分布式发电设备最终的设计特性和终端用户的特点。由表 1.2 可知,不同分布式发电技术的空气污染排放相差很大,燃料电池是最清洁的,微型涡轮发电机组和内燃发电机组次之。对所有污染物,燃料电池的空气排放非常低。除了二氧化碳排量比较大之外,微型涡轮发动机也有很低的空气污染排放。与常规的发电技术相比,分布式发电设备的每千瓦小时的空气污染排量减小了很多,说明了分布式发电的环境性较好。

### 1.3 分布式发电系统的主要技术问题

对于公开的电力市场而言,用户可按照自己的意愿从不同分布式电源买电和卖电这种新涌现的能源竞争环境来说,分布式电源的集中管理和控制是必不可少的。电力公司拥有的发电设备和变电站一般都装配了可对整个系统实现中央集中控制的 SCADA 系统,这些系统是专门设计的,已经在系统中运行了很长的时间。但是,这些系统并不是专门为动态的分布式发电而设计的。在动态的分布式发电市场中,拥有发电资产的用户可频繁地加入或退出电力网,电能的买卖因此会实时变化的,并且不同市场的参与者可以控制不同的分布式发电的潮流。管理分布式发电的通信和控制技术必须解决动态用户、多个供应商、市场产生的容量以及

变化的发电资源等方面带来的问题。一个运行良好的分布式发电市场更有可能更多地采用通常的相互交易的电子商务,而采用常规的电力公司的 SCADA 系统较少。这样的系统将具有对不同分布式发电技术产生实时价格的机制,以及为能源消费者提供全部的消费方案建立动态价值链的机制,能够满足这样柔性的、可升级的通信和控制系统需要的是分布式智能控制。

### 1.3.1 分布式智能控制

在当今的电力工业中,中心电厂仍将继续起到非常重要的作用,但对更小型的、清洁的分布式发电的需求量在不断地增加,这些分布式的发电技术都需要有能量存储系统。这样的系统基本上需要采用先进的电力电子控制技术,因为分布式发电系统复杂的连接关系将带来大量的信息和功率交换,因此采用先进的电力电子控制技术来处理这些信息是最基本的需求。从信息处理的方面来看,用作系统协调的单一的中央控制系统不能有效地满足分布式发电系统的控制要求,应设计能与分布式、多用户和动态分布式电源管理特性匹配的通信和控制系统。随着互联网的普及应用,最小型的嵌入式控制器都已具有很强的通信能力。

目前大部分卖主通过建立网络服务器将他们的产品在互联网上销售,网络服务器为个人的资产提供了远距离监视和控制接口,这是走向分布式智能控制的第一步。将各种各样的卖主组成的系统实现集中协调控制为分布式智能控制的第二步,在此需要进一步开发分布式计算、嵌入式控制和广域通信寻址等技术。最后一步是开发普遍适应的平台,将用户所需的服务送到用户的手中,而互联网提供了最广泛有效和增长最快速的平台。分布式智能控制应采用自底向上的设计方法,即基于将智能决策能力扩展到系统中每一个相关部分的高度可升级的控制方法。

### 1.3.2 分布式发电对电网影响

电网的发展主要经历了由分布到集中,再到集中与分布相结合三个阶段,目前正处在集中与分布相结合阶段的发展初期,与传统的集中式发电相比,分布式发电的优点很多,主要有以下几点:(1)投资省、运行成本低、见效快、资本风险小<sup>[7]</sup>。(2)发电方式灵活,提供的电能有较高的可靠性和电能质量。(3)环境污染少。文献[9]的研究表明,对于电力用户、电力公司、国家和社会也都具有很大的好处,是一个三赢的格局。(1)对于电力用户的好处:分布式发电有利于降低用户电价,提高电能质量和供电可靠性,同时满足用户多方面的要求,为用户提供更多的用电选择,保证优质服务,最终提高用户的生活质量和生活水平。

(2)对于电力公司的好处:分布式发电有利于电力公司减小投资、避免资金风险,同时扩展电力市场,提供更多的增值服务,形成新型的供电关系,促进整个电力行业的发展。(3)对于国家和社会的好处:分布式发电有利于打破垄断,引入竞争,为其他行业进入电力市场打开方便之门,从而提高能源利用率,促进环境保

护事业的发展，确保国家的安全和社会的稳定。当然，分布式发电不可避免地给电网带来了一些问题，下面将详细说明。

### 1.3.2.1 分布式发电对电力系统电压的影响

文献[10-12]详细研究了分布式发电对电网电压的影响，分布式电源主要接入10kV及以下的配电网，在接入DG之后，配电系统从单纯的用电端转变为含有微型电源的拓扑结构，潮流的大小和方向有可能发生巨大改变，使配电网的稳态电压也发生变化，使得原有的调压方案不一定能满足大量接入DGS后的配电网调压电压要求，因此必须评估分布式电源接入后对电力系统电压的影响，以保证在DGS应用越来越多的情况下不会给用户带来不良后果。潮流计算是对这种影响进行量化分析的主要手段，但传统的潮流计算方法和现有的仿真计算软件，由于缺乏对分布式发电的影响考虑，导致计算方法失效。文献[13-14]对异步发电机、无励磁调节能力的同步发电机和燃料电池等几种典型DGS进行建模和电力系统仿真实验，提出了基于灵敏度补偿的配电网潮流计算方法，适合与包含不同DGS的多电源配电网潮流计算。分布式发电对配电网电压的影响主要如下：

①分布式发电的接入会对配电网馈线上的电压分布产生重大影响，具体影响与分布式电源的容量大小、接入位置有很大的关系。

②同样渗透率(Penetration Level)的分布式电源集中在同一节点，对电压的支持效果要弱于分布在多个节点上。

③稳态情况下，由于馈线上传输功率减小以及DG输出的无功支持，使得沿馈线的各负荷节点处的电压被抬高。

以上讨论的都是分布式电源对配电网的影响。当分布式电源接入电力系统之后，由于某些分布式电源受环境因素影响较大（例如风力发电、太阳能发电等），具有随机性，特别是风力发电大多采用异步发电机，需从电网吸收大量无功功率，故很容易引起整个电网的电压稳定问题，甚至会导致整个电力系统的电压崩溃，而并不局限于所在配电系统。例如，美国加州Bakersfield的Seawest风电场就经常出现电压稳定问题导致电网无法接受风电，强迫风电场停机。

### 1.3.2.2 分布式发电对电力系统电能质量的影响

电力系统中最关心的是电能质量问题，科技的发展使得的用电设备对电能质量的要求日益提高。分布式电源含有大量的电力电子设备，即存在为数可观的整流站和逆变站，这些电力电子器件的非线性将会引起电网电流、电压波形发生畸变，引起电网的谐波污染，分布式发电对电能质量主要有两个方面的影响，文献[15-20]进行了详细研究：

①电压闪变。分布式发电引起电压闪变的因素包括：某个大型分布式单元的启动、分布式单元输出的短时剧变以及分布式单元与系统中电压反馈控制设备相

互作用而带来的不利影响。

②引入大量谐波。由于大量电力电子器件应用于分布式发电，所以不可避免地给系统带来大量谐波，谐波的幅度和阶次受到发电方式以及转换器的工作模式的影响。分析了分布式电源对电能质量的影响，针对大型配电网讨论引入分布式电源后一些重要母线的谐波电压水平，提出可以在谐波电压水平较高的母线上安装特殊滤波器来抑制谐波。虽然分布式发电的引入会造成电压闪变，并引入大量谐波，但是分布式发电也存在改善电能质量的潜力，当电网关联负载较大时，分布式发电可以快速投入使用，使系统尽可能减少故障，提高整个电网的稳定性，从而保证了电能质量。

### 1.3.2.3 分布式发电对继电保护的影响

配电网中接入了分布式电源之后，放射状网络将变成遍布电源和用户互联的网络，潮流不再单向地从变电站母线流向各负荷，而是随着负荷水平和环境因素改变的，因此，分布式发电将对配电网的继电保护产生较大的影响<sup>[18-20]</sup>：

1) DG运行时可能会引起继电保护的失效。DG产生的故障电流可能会减小流过馈线继电器的电流，从而使继电保护失效。

2) DG接入配电网后可能会使继电保护误动作。相邻馈线的故障有可能会使原本没有故障的馈线跳闸。

3) 改变了配电网的故障水平。故障水平提高还是降低取决于运行的分布式电源数量和种类，故障水平的提高要求开关设备的升级，故障水平的降低可能会给过电流保护带来问题。因此，若某配电区域的分布式电源容量很大，而使故障电流产生大幅度的变化，则必须提高其断路器的容量和升级保护装置。

### 1.3.2.4 分布式发电对电力市场的影响

文献[21-22]指出，配电网的开放，引入了电力零售市场，电力零售市场上电力供应竞争给企业自备电厂和用户自己安装的分布式电源带来商机，拥有分布式电源的用户在电力零售市场上面临三种选择：①从电网受电；②自己发电，自给自足；③自己发电并向电网卖电。根据发电竞争市场的电价信息和零售电力市场的需求信息，用户完全可以控制自己的分布式电源，让它发挥更大的作用，产生更大的效益，为自己或者附近用户提供供暖和供电服务。电力零售市场的建立将会确立电力零售机制，任何形式的发电商都可以作为电力供应商向零售电力市场提供电力产品，在零售市场上公平竞争。

此外，分布式发电一般不为调度中心所调度，因此分布式发电的运行和控制某种程度上存在盲目性和无序性，给整个电力系统的运行留下了一定的安全隐患。例如，分布式发电会给电力系统的无功补偿、电压控制等带来了不利影响；对配电网自动化和需求侧管理系统也带来了改变的要求；同时也要求制定和完善

相应的法律、法规和行业规范。

## 1.4 分布式发电负荷建模

分布式电源接入电网有两种方式——“集中式”和“分散式”。集中式指的是单一类型的 DGS 接入 10kV 及以上的电网,主要包括大型风电场或大型太阳能电场,由于集中性,此类负荷建模比较简单;“分散式”指的是类型各异、容量不同的 DGS 分散地接入 0.4kV 或 10kV 电压等级的配电网,这类负荷建模问题要复杂得多。电网仿真中的负荷模型指的是包括 110kV 及以下配电网在内的综合负荷的等效描述, DGS 加入电网以后,传统的负荷模型发生改变,此时的配电网综合负荷为“广义综合负荷”。因为每种 DGS 的自身特性、出力水平、控制方式、物理分布位置等都不同,所以对综合负荷特性产生的影响也不同;随着分布式电源容量的不断增大,这将成为决定配网侧综合负荷特性的重要因素。

分布式发电现在还处于发展阶段,未大规模推广使用,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;基于总体测辨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,仅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,计算机仿真更加适合考虑分布式发电的负荷建模研究,并且需要结合模型辨识方法。基于总体测辨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,所以必定会对配电网综合负荷特性及其模型结构产生较大影响。研究不同分布式电源的等效模型是构建含不同分布式电源的广义综合负荷模型类和考虑分布式发电的负荷建模研究的基础,本文目标是提出可以描述分布式电源的等效模型,具体研究思路如下:

①研究光伏电池和燃料电池的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,依据其数学模型,建立太阳能光伏电池和燃料电池这两种直流型分布式发电系统的仿真模型,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利用计算机仿真实验,研究不同分布式发电系统的稳态和动态特性,提出能准确描述其外特性的等效模型;

④利用计算机数字仿真,对模型进行综合性能检验,检验等效模型的有效性、内插能力和外推能力。

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。



## 1.5 本文的主要工作

论文首先论述考虑燃料电池和光伏发电的综合负荷建模的背景和意义，综述分布式发电的优点和发展状况，比较分布式发电和传统发电的特性；其次介绍分布式发电的主要技术问题和给电力系统带来的一系列问题；最后简单叙述了有关分布式发电的负荷建模问题。

第二章对燃料电池进行了详细的研究，系统阐述燃料电池发展现状并研究其发电原理，对燃料电池的种类和各种燃料电池的优缺点进行了一系列的比较，以SOFC为例，详细研究了SOFC的数字仿真模型及适合SOFC的滞环电流控制策略，在Simulink工具箱中构建了包括并网逆变装置的、完整的SOFC发电系统数字仿真模型。

第三章基于完整的SOFC发电系统的数字仿真模型，通过对其运行特性进行分析，提出了一个用二阶动态微分来等效描述SOFC发电系统的机电暂态模型，利用改进的遗传算法以及仿真实验数据，对等效模型的有效性和泛化能力进行详细建模检验。

第四章系统阐述光伏电池的发展现状和发电原理，在建立PV本体数字仿真模型的基础上，采用最大功率点跟踪控制和双环控制策略，构建了包括并网逆变装置的PV发电系统数字仿真模型。系统地研究了PV发电系统的运行特性，提出了其等效机电暂态模型的建模方案和技术思路。指出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发电系统可以等效为一个功率消耗为负的广义静态负荷，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。最后，本章介绍了PV的特殊问题——“孤岛效应”，并介绍了检测孤岛效应的方法，比较各种方法的适用场合。

最后对本文工作进行了总结并对今后的工作进行了展望。

## 第二章 燃料电池的数字仿真模型

### 2.1 燃料电池的发展现状

20 世纪 70、80 年代，随着世界能源危机问题日益严重，各国政府对燃料电池研究的支持进一步增加。加拿大、美国、日本、欧洲、中国等都制定了一系列发展计划并开始行动，很大程度上促进了氢能与燃料电池的发展，很多公司和政府部门开始认真地研究如何解决燃料电池大规模商业化的问题，其中大量研究工作都致力于开发燃料电池所需的材料，探索最佳燃料源，以及如何降低生产成本等等。进入 21 世纪以来，随着石油、煤炭等不可再生能源资源的日趋枯竭，环境污染严重以及由于能源缺乏引起的国家经济发展、国防安全问题已是 21 世纪各国面临的三大问题，人们对于燃料电池商业化的渴求也愈来愈强烈<sup>[7]</sup>。燃料电池发电是一种重要的新型发电方式，可以大大降低废气排放及解决电力供应、电网调峰调频等问题，目前，2MW、4.5MW、11MW 成套燃料电池发电设备已进入商业化生产阶段，各种容量的燃料电池发电厂相继在一些发达国家建成。

中国早在 20 世纪 50 年代就开始研究燃料电池，并且在燃料电池材料、技术的创新方面取得许多突破。中国政府一直以来都十分注重燃料电池的研究开发，陆续开发出百瓦级-几十千万级的氢氧燃料电池、燃料电池电动汽车等，使中国的燃料电池技术跨入世界先进国家行列。为进一步推动高效、清洁发电技术的研究与开发，“燃料电池发电技术”已被列入《科技发展“十五”计划和 2015 年远景规划（能源领域）》。燃料电池建设周期短、无污染、效率高、易维护以及低成本的潜能将引发 21 世纪新能源与环保的绿色革命。燃料电池发电正以良好的势头快步进入工业化阶段，将成为 21 世纪继火电、水电、核电后的第四代发电方式之一。

### 2.2 燃料电池的工作原理

文献[23-25]中指出，燃料电池清洁、反应效率高、安装灵活、可以热电联产，且具有高度模块化、噪声低、安装及维护简便等优点，是一种很有潜质的可再生能源，这是现在人们对它的兴趣日益增加的最主要原因。燃料电池的最主要优点如下：

- 1) 电池的反应效率高，而且在其整个过程中不产生二氧化碳等温室效应气体。
- 2) 燃料电池的安装有很大的灵活性。
- 3) 可以进行热电联产，也就是说在发电的同时，余热可以利用。
- 4) 燃料电池高度的模块化，安装简便，运行起来没有噪声，维修起来简便，

是一种很有潜质的可再生能源。

燃料电池的反应原理是氢和氧之间发生电化学反应生成水,同时释放出能量,发电原理与化学电源一样,电极提供电子转移的场所,阳极催化燃料(如氢)的氧化过程,阴极催化氧化剂(如氧)的还原过程,导电离子(正离子或负离子)在电解质(固态或液态)内迁移,形成一个电场,接入负荷后,电子通过外电路做功并构成电的回路,形成电流。导电离子在将阴阳极分开的电解质内迁移,电子通过外电路做功并构成电的回路。然而其工作方式又与常规的化学电源不同,它更类似于一个自动运行的化工厂,依靠化工过程原理,解决其中的工作场所及其内部的物质传递与分配等问题,从而将燃料和氧化剂中储存的能量连续不断地转化成电能和热能。这样的工作原理只决定燃料电池的输出功率的大小,其储存能量的大小则由储存在储罐内的燃料与氧化剂的量决定。总的化学反应式是: $2\text{H}_2+\text{O}_2=2\text{H}_2\text{O}$ 。电池有一个阴极和一个阳极,两个电极之间充满了电解液。根据电解液的不同,燃料电池分为不同的类型,但是反应原理基本相同<sup>[24-26]</sup>,如图 2.1 所示。

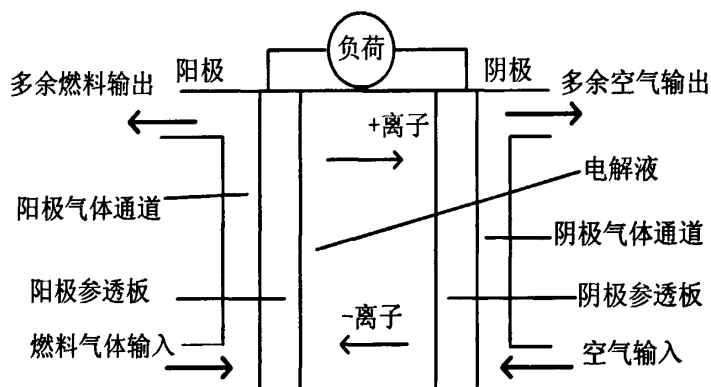


图 2.1 燃料电池原理图

只有一个燃料电池运行时,工作电压只有  $0.6\sim 0.8\text{V}$ ,这意味着,要产生足够的电压,需要把许多电池串联起来,构成一个电池组。要实现电池组的应用,还需要一系列分系统共同工作,包括燃料(如氢)供给的分系统,氧化剂(如氧)供应的分系统,水蒸汽热管理分系统和输出直流电升压、稳压分系统等。如果用户需要交流电,还需加入直流交流逆变部分构成总的燃料电池系统。因此,一台燃料电池系统相当于一个小型自动运行的发电厂,它高效、无污染地将储存在燃料与氧化剂中的化学能转化为电能。

### 2.3 燃料电池发电系统

燃料电池系统的核心是电池反应堆,它由电极、电解质和双极板组成。但其他辅助系统也经常占燃料电池总系统相当大的比例,包括供气系统、水蒸汽热管理系统、电输出管理系统等,我们把这些辅助系统称为设备平衡(Balance of Plant,

BOP)。在使用高温燃料电池的热电联供系统中，燃料电池组经常只占全部系统中很小的部分。电池需要的燃料大多数是氢气，天然气、甲醇、煤层气等燃料通常需要经过重整后才能使用。供气系统中燃料气通常由燃料罐储存气体，氧化剂通常采用压缩机或鼓风机将空气过滤后送入电池反应堆。燃料电池系统的电压和电流是由燃料电池堆的膜电极数量和面积决定的，输出管理系统则将产生的直流电经过 DC-DC 或 DC-AC 转换成所需的直流电或交流电供给负荷。电池反应过程中还释放热量，水蒸汽热管理系统除了将多余的热量排出系统外，还可以充分利用废热和废水进行热电联产 (Cogenerating Heat and Power, CHP)，提高系统的整体效率<sup>[7]</sup>。燃料电池并网系统如图 2.2 所示。



图 2.2 固体燃料电池发电系统供电模式

文献[27]指出，如何选择适合中小容量 DGS 并网运行方法，使其能够保持系统可接受的外特性是解决 DGS 应用的关键之一。美国对 DGS 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，DGS 最好能表现如“负荷”一般。从我国配电系统的实际情况角度考虑，中小型 DGS 以恒功率拟负荷的外特性连接到公共连接点 (Point of Common Coupling, PCC)，关系上类似负荷，但并不吸收功率，这样可尽量避免 DGS 直接参与馈线的电压调节。SOFC 出口侧是直流电，必须经过逆变器逆变、滤波之后连接隔离变压器上网。

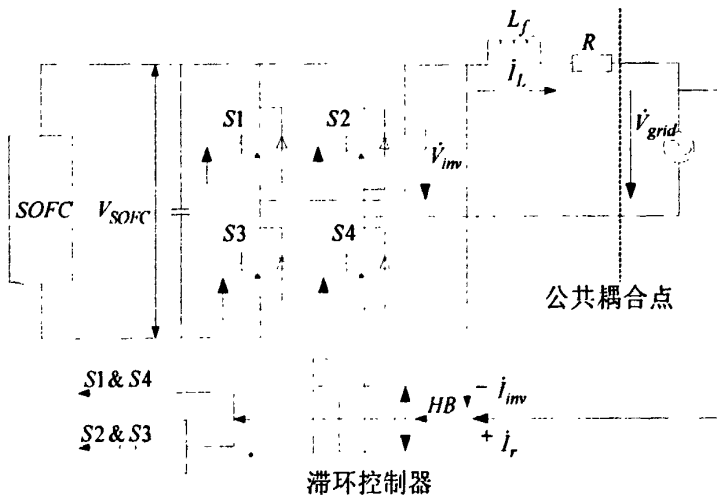


图 2.3 电流滞环比较方式原理图

每种分布式电源都需要选择合适的逆变器以及逆变控制策略，这也是分布式

发电中最重要的问题之一，本文中使用的逆变器是三相电压型桥式逆变电路。由于滞环比较方式硬件电路简单，属于实时控制中的一种，电流响应快，对负载的适应能力强，而且不需要载波，所以输出电压中不含特定频率的谐波分量；另外，这种控制方式还可提高直流电压利用率，增大逆变器的输出能力。鉴于以上优点，本文采用电流滞环比较方式的PWM来控制逆变器晶闸管的开断，详见文献[28-29]。滞环控制原理是当逆变器输出电流超过滞环上限时，下桥臂开关导通，逆变器输出电压 $u=-U_{SOFC}/2$ ，逆变器输出电流将减小；同理，当电流小于滞环下限时，上桥开关臂导通，逆变器输出电压 $u=U_{SOFC}/2$ ，电流将上升，电流滞环比较方式原理如图2.2所示。

## 2.4 燃料电池分类

燃料电池经过多年的发展，不考虑加工及成本等实际问题之外，燃料电池本身还存在两个重要的技术难题：反应速度低以及氢燃料的不易获取。从解决这两个难题出发，人们尝试过研究开发许多种燃料电池。概括起来主要有直接型和间接型两种，其中直接型燃料电池又可以按照温度分为低温(室温 $\sim 100^{\circ}\text{C}$ )燃料电池、中温( $100\sim 500^{\circ}\text{C}$ )燃料电池和高温( $500^{\circ}\text{C}$ 以上)燃料电池；间接型燃料电池又可以分为重整型燃料电池和生化型燃料电池。

目前最常用的分类方法是按照电解质不同来进行分类的，主要包括以下几种<sup>[30]</sup>：(1) 熔融碳酸盐型燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)，这种燃料电池是在 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 的高温下运转，其发电效率可达50%左右。它使用的是天然气燃料，不仅含氢，而且还含有一氧化碳，甚至还能使用煤气等含氢纯度低的燃料。(2) 固体电解质型燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)，可达 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的高温下运转，发电效率可达60%以上。(3) 碱型燃料电池(Alkaline Fuel Cell, AFC)，这类燃料电池必须使用纯氢作为燃料。(4) 磷酸型燃料电池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)，在 $200^{\circ}\text{C}$ 温度下运转，发电效率可40%左右，这类燃料电池是使用氢纯度极高的天然气或甲醇作燃料。(5) 质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)。(6) 血红蛋白型燃料电池，这种燃料电池所需要的氧是从海水中提取的，是利用一种经过遗传工程处理的“血红蛋白型”载体分子组成的亚铁基液体。(7) 细菌型燃料电池，这种燃料电池的介质成分主要是糖类，一种特殊细菌可将糖分子分解并使其具有电能量，使电子在细菌和阴极间流动，形成电流。细菌型燃料电池是通过让燃料分子中释放电子，接通外电路形成电流，无需燃烧燃料，清洁高效。虽然按电解质划分，直接甲醇燃料电池(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)也应该属于PEMFC，但由于其重要性大家习惯上把它单独划分出来。各种主要的燃料电池的类型及其特征详见表2.1。

表 2.1 按电解质划分的燃料电池的类型和特征

各种燃料电池特性比较						
电池种类	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	PEMFC	DMFC
电解质	KOH	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub>	PEM	PEM
燃料	氧气	天然气, 甲醇, 清油	天然气, 甲醇, 汽油	天然气, 甲醇, 石油	氢气	甲醇
导电离子	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>
操作温度	65~220℃	180~200℃	650℃	500-1000℃	室温~80℃	室温~100℃
质量比功率	35~105W/kg	100~220W/kg	30~40W/kg	15~20W/kg	300~1000W/kg	1~10W/kg
寿命 (h)	10000	15000	15000	7000	5000	1000
优点	启动快, 常温常压下可以正常工作	对 CO <sub>2</sub> 不敏感, 成本相对较低	可用空气作为氧化剂, 可用天然气或者甲烷作为燃料	用空气作为氧化剂, 燃料是天然气/甲烷	可用空气作为氧化剂, 固体电解质, 室温工作, 启动快	可用空气作为氧化剂, 室温工作, 启动快
缺点	需纯氧, 成本高	对 CO 敏感, 启动慢, 成本高	工作温度较高	工作温度过高	对 CO 敏感, 反应需要加湿	效率低, 寿命短, 管理困难
开发状态	宇宙航行	200kW 功率的工业用电池	280kW~2MW 实验电厂	100kW 电厂	家庭电源, 小汽车, 公共汽车, 热电联产	便携式计算机电源, 手机电源

## 2.5 燃料电池发电系统建模

基于上节分析, 适用于发电的燃料电池种类有 MCFC、SOFC 等, 本文以 SOFC 为代表, 详细分析了 SOFC 的数学模型, 在此基础上提出了燃料电池的等效描述模型, 并对模型的有效性进行了验证。为了构建适合于动态特性研究的 SOFC 仿真模型, 本文对 SOFC 采用以下理想条件假设: 1) 输入的气体都是理想气体, 即: 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) 不考虑水蒸气能量损失和湿度影响; 5) 可以用能斯特方程来计算固体燃料电池产生的电压。

### 2.5.1 SOFC 数学建模

参考文献[31-33]中指出, SOFC 产生的电压由能斯特 (Nernst) 方程计算得出, 同时要考虑激活电压损耗、电压浓度损耗以及欧姆损耗。固体燃料电池出口电压

如式 (2.1) 所示。式 (2.1) 中,  $i$  为电池输出电流;  $V_0$  为 FC 堆的理想输出电压, 按式 (2.2) 计算;  $\eta_{\text{con}}$ 、 $\eta_{\text{act}}$  分别为电压浓度损耗和活化损耗, 按 (2.6) (2.7) 计算;  $r$  用于模拟欧姆损耗电阻。

$$V = V_0 - ri - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{con}} \quad (2.1)$$

$$V_0 = N_0 \left( E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{1/2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (2.2)$$

式 (2.2) 中,  $P_{\text{H}_2}$ 、 $P_{\text{O}_2}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$  分别为氢、氧和水蒸气的气压系数, 各个气压系数按式 (2.3) 计算; 其它参数为 FC 电池特性参数, 参数的物理意义和典型取值见表 2.2。

表 2.2 燃料电池参数取值

SOFC 模型参数		
参数	物理含义	参数取值
$T$	电池工作温度	1273K
$F$	法拉第常数	$96.487 \times 10^6 \text{ C/kmol}$
$R$	通用气体常数	$8314 \text{ J/(kmol K)}$
$E_0$	理想标准电动势	1.18V
$N_0$	燃料电池堆的串联个数	1400
$K_r$	常数, $K_r = N_0 / (4F)$	$0.996 \times 10^{-6} \text{ kmol/(s A)}$
$U_{\text{opt}}$	最佳燃料电池利用率	0.85
$U_{\text{max}}$	最大燃料电池利用率	0.9
$U_{\text{min}}$	最小燃料电池利用率	0.8
$K_{\text{H}_2}$	氢气阀摩尔数	$8.43 \times 10^{-4} \text{ kmol/(s atm)}$
$K_{\text{H}_2\text{O}}$	水蒸气的阀摩尔数	$2.81 \times 10^{-4} \text{ kmol/(s atm)}$
$K_{\text{O}_2}$	氧气的阀摩尔数	$2.52 \times 10^{-3} \text{ kmol/(s atm)}$
$\tau_{\text{H}_2}$	氢气流的响应时间	26.1 s
$\tau_{\text{H}_2\text{O}}$	水蒸气响应时间	78.3 s
$\tau_{\text{O}_2}$	氧气流的响应时间	2.91s
$r$	单个燃料电池欧姆损耗	0.126 $\Omega$
$a, b$	Tafel 系数	$a=0.05, b=0.01$
$r_{\text{H-O}}$	氢与氧的比例	1.145

$$\begin{cases} P_{H_2}(s) = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2}}(N_{H_2}^m - 2K_r i) \\ P_{O_2}(s) = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2}}(N_{O_2}^m - 2K_r i) \\ P_{H_2O}(s) = \frac{1/K_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O}}(N_{H_2O}^m - 2K_r i) \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\tau_{H_2} = V/(K_{H_2} RT) \quad (2.4)$$

$$K_r = N_0/4F \quad (2.5)$$

电压浓度损耗用于模拟在电极处发生电化学反应时，内部液体流动而产生的电位差，按式 (2.6) 计算。

$$\eta_{con} = (RT/\eta_a F) \ln(1 - i/i_c) \quad (2.6)$$

激化损耗用于模拟由于电极表面的电化学反应速率不均匀而引起的内部电压损耗，按塔费尔公式计算，如式 (2.7) 所示。

$$\eta_{act} = a + b \log i \quad (2.7)$$

欧姆损耗电阻用于模拟电解液及电极材料中的带电粒子流动而造成的功率损耗，由式 (2.8) 计算。其中，当取电池的工作温度  $T$  等于参考温度  $T_0$  时， $r = 0.126$ 。

$$r = 0.126 \exp[-2870(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})] \quad (2.8)$$

### 2.5.2 基于 Matlab/Simulink 的 SOFC 建模

按照以上建立的数学公式以及参数，在 Simulink 工具包中建立 SOFC 的仿真模型，如图 2.3 所示。一个完整的 SOFC 发电系统除了燃料电池堆以外，还应该包括逆变器，逆变器控制回路，滤波回路，隔离变压器等等。在 Simulink 工具包中建立了完整的 SOFC 发电系统，见图 2.4。

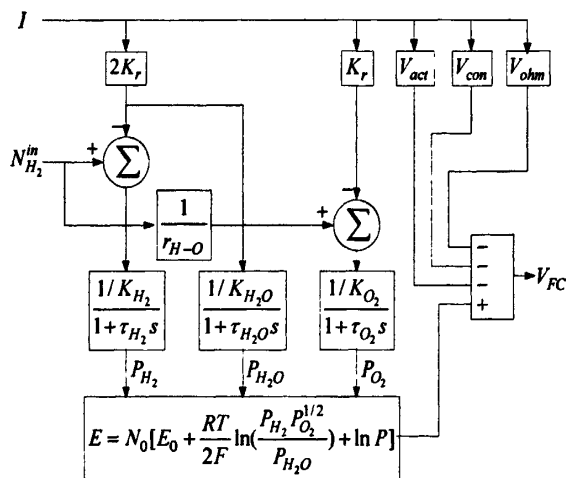


图 2.3 SOFC 动态模型



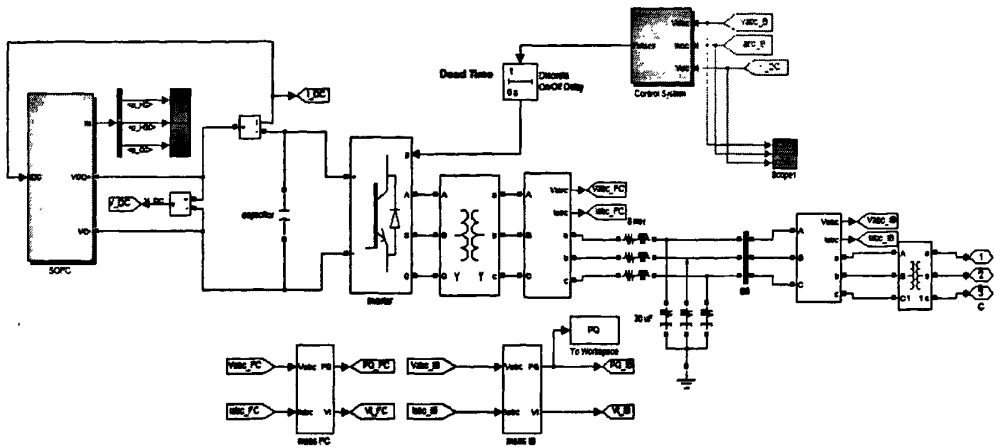


图 2.4 SOFC 发电系统

燃料电池发电系统一般可分为 3 部分：燃料处理器、发生器(燃料电池堆)和电能调节装置(DC/AC 转换器)。在燃料处理部分，燃料诸如煤、天然气等通过一系列燃料重整、分离和洁净的过程，产生富氢气体。富氢气体和氧气(一般采用空气)通过发生器产生直流电和热。能量发生器包括燃料电池堆和控制单元，燃料电池可由多台单个电池按串联、并联的组合方式，满足所需要的发电容量。燃料电池发出的直流电根据负载需要经过调节装置输出所需要的电压和电流。

## 2.6 本章小结

本章首先介绍了燃料电池的发展现状，接着以固体燃料电池为例，详细阐述了 SOFC 的工作原理，介绍了一个完整的燃料电池发电系统的构成；其次，介绍了各种燃料电池的分类以及适用场合；最后，基于 SOFC 完整的数学模型，在 Matlab/Simulink 中构建了含电力逆变器及其滞环电流控制模块的 SOFC 发电系统的数字仿真模型，为下一章研究燃料电池的机电暂态等效描述模型打下基础。

### 第三章 燃料电池等效建模方法

#### 3.1 燃料电池发电系统的机电暂态等效描述

如何建立描述固体燃料电池外特性的等效数学模型以适合于电网仿真的模型需求,是研究考虑 SOFC 的配电网综合负荷建模的基础。稳态运行情况下,SOFC 发电系统通过滞环电流逆变控制能向电网输送恒定功率,是一个输出功率恒定的电压源。但在扰动发生的暂态过程中,SOFC 发电系统是否还能保持这种恒功率特性值得深入研究。本节从机理分析入手,研究 SOFC 在暂态过程中所表现的动态特性,进而建立能准确描述其外特性的等效数学模型。

##### 3.1.1 暂态过程中 SOFC 的动态特性

基于 Simulink 工具箱,将 SOFC 系统接入如图 3.1 所示的四节点仿真系统进行研究,4 节点系统是 5MVA 配电馈线,系统等值以及负荷数值在图中标出,各节点负荷类型采用 60%感应电动机动态负荷并联 40%恒阻抗静态负荷,Simulink 工具包中的四节点仿真系统如图 3.2 所示。

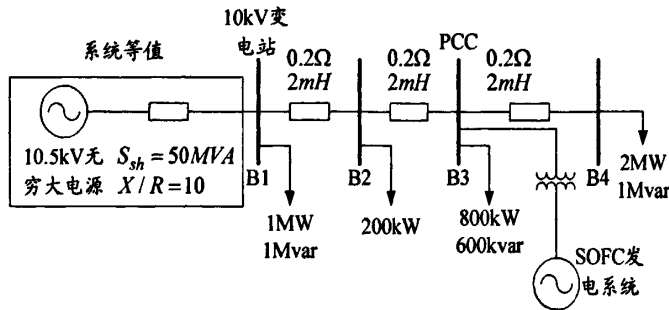


图 3.1 4 节点系统单线图

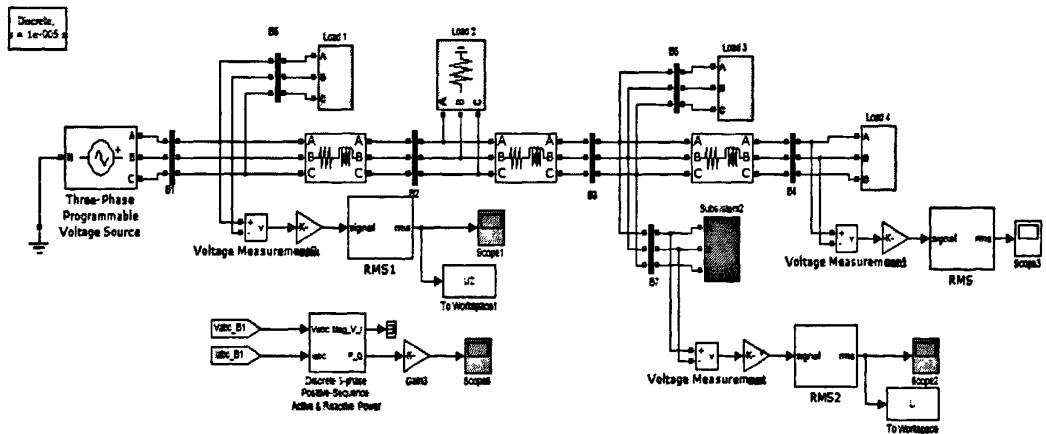


图 3.2 四节点仿真系统

假设 SOFC 接入的配电网侧（如母线 B1、B2）发生三相对称短路故障，使 SOFC 接入点即 B3 母线电压在 1.2~1.3s 时跌落 20%，通过观察 SOFC 发电系统 PCC 处的电压、有功和无功，分析暂态过程中 SOFC 的动态特性，如图 3.3 所示。图 3.8 直观表明，跟随母线 B3 电压跌落，暂态过程中，SOFC 系统的有功输出 P 发生显著变化，变化幅度达 20%；无功输出 Q 略有变化但不明显。随着母线 B3 电压的恢复，SOFC 的有功及无功输出逐渐恢复至稳态值。因此，在研究考虑 SOFC 的配电网综合负荷建模时，SOFC 系统不能作为广义上的静态恒功率负荷来处理，而是必须要考虑其动态过程，作为广义上的动态负荷来等效。

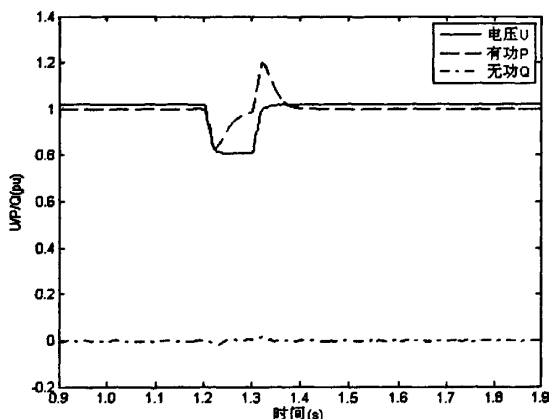


图 3.3 SOFC 动态特性

### 3.1.2 SOFC 的等值电路模型

上述分析表明，输出功率恒定的电压源静态模型显然不能描述 SOFC 的暂态特性，必须构建有效的动态数学模型来准确刻画其动态行为。深入研究 SOFC 的动态特性可知，SOFC 在其 PCC 点电压跌落后的暂态过程中，其电流变化规律类似于电感电路的充放电过程，所以构建用电压源、电感和电阻串联组合表示的 SOFC 发电系统等值电路，如图 3.4 所示，图中各量和下面的模型推导如无特殊说明均采用标幺值。

图 3.4 中， $I_L$  是逆变器的输出电流（即 SOFC 由 PCC 注入电网的电流）， $V_{inv}$  是逆变器的出口电压， $V_{grid}$  是 PCC 的上网电压， $R$ 、 $L_f$  分别为等值电阻和电感。

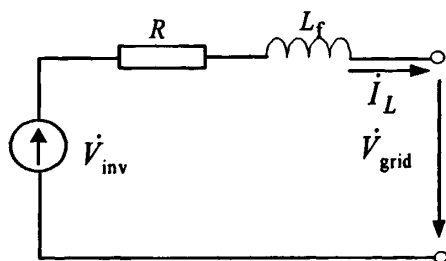


图 3.4 固体燃料电池等值电路

### 3.1.3 SOFC 的等值数学模型

根据图 3.4 构造的固体燃料电池的等值电路图，令状态向量  $x = [i_{L.a} \quad i_{L.b}$

$i_{L.c}]^T$ ; 模型参数相量  $\theta = [m \ R \ L_f]^T$ ; 输入相量  $u = [u_{\text{grid.a}} \ u_{\text{grid.b}} \ u_{\text{grid.c}}]^T$ ; 输出相量  $y = [P \ Q]^T$ , 则固体燃料电池等效模型写成状态方程的一般形式如式 (3.1) 所示。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, \theta, u) \\ y = h(x, \theta, u) \end{cases} \quad (3.1)$$

式 (3.1) 中第一式是燃料电池的动态微分方程, 第二式是燃料电池的输出方程。动态微分方程的具体形式如式 (3.2) 所示。

$$\frac{di_L}{dt} = f(x, \theta, u) = \frac{1}{L_f} (\dot{V}_{\text{inv}} - \dot{V}_{\text{grid}} - i_L R) \quad (3.2)$$

其中,

$$V_{\text{inv}} = m V_{\text{SOFC}} \quad (3.3)$$

$V_{\text{SOFC}}$  是燃料电池的输出电压, 由于固体燃料电池的重整器和堆动态时间常数一般达到数十秒甚至百秒级, 相对电力系统暂态过程毫秒级的时间常数而言,  $V_{\text{SOFC}}$  可以认为是不变的常数, 由稳态运行条件决定,  $m$  是逆变器的调制度。由此可知, 图 3.4 所示等效电路中的  $V_{\text{inv}}$  为恒定电压源。

SOFC 的入网电流和 PCC 电压用电网同步坐标下的相量表示, 分别如式 (3.4)、(3.5) 所示。

$$\dot{I}_L = I_{L.x} + jI_{L.y} \quad (3.4)$$

$$\dot{V}_{\text{grid}} = V_{\text{grid.x}} + jV_{\text{grid.y}} \quad (3.5)$$

取 PCC 电压为参考相量, 即  $\dot{V}_{\text{grid}} = V_{\text{grid}} \angle 0 = V_{\text{grid.d}}$ , 从而逆变器的出口电压表达如式 (3.6)。

$$\dot{V}_{\text{inv}} = V_{\text{inv.x}} + jV_{\text{inv.y}} \quad (3.6)$$

利用电压降落公式, 可求得  $\dot{V}_{\text{inv}}$  如式 (3.7)、(3.8) 所示。

$$V_{\text{inv.x}} = V_{\text{grid.x}} + \frac{PR + Q\omega L_f}{V_{\text{grid}}} \quad (3.7)$$

$$V_{\text{inv.y}} = V_{\text{grid.y}} + \frac{P\omega L_f - QR}{V_{\text{grid}}} \quad (3.8)$$

进而可以进一步求出电路中的电流, 如式 (3.9)、(3.10)、(3.11) 所示。

$$\dot{I}_L = I_{L.x} + jI_{L.y} = \frac{1}{R + j\omega L_f} (\dot{V}_{\text{inv}} - \dot{V}_{\text{grid}}) \quad (3.9)$$

$$I_{L.x} = \frac{(PR + Q\omega L_f)R}{[R^2 + (\omega L_f)^2]V_{\text{grid}}} + \frac{(P\omega L_f - QR)\omega L_f}{[R^2 + (\omega L_f)^2]V_{\text{grid}}} \quad (3.10)$$

$$I_{L.y} = \frac{(P\omega L_f - QR)R}{[R^2 + (\omega L_f)^2]V_{\text{grid}}} - \frac{(PR + Q\omega L_f)\omega L_f}{[R^2 + (\omega L_f)^2]V_{\text{grid}}} \quad (3.11)$$

其中,  $P$ 、 $Q$  即 SOFC 发电系统的上网有功和无功。

对式 (3.2) 进行简单的派克 (Park) 变换, 即可得如式 (3.12) 所示的、以 SOFC 入网电流之 d-q 轴分量为状态变量的二阶动态微分方程。

$$\begin{cases} \frac{dI_{L,d}}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_{inv,d} - V_{grid,d} - I_{L,d}R) - \omega I_{L,q} \\ \frac{dI_{L,q}}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_{inv,q} - V_{grid,q} - I_{L,q}R) + \omega I_{L,d} \end{cases} \quad (3.12)$$

对式 (3.12) 进行派克反变换, 即可求出同步坐标下的电流  $I_{L,x}$ 、 $I_{L,y}$ , 进而即得 SOFC 的上网功率, 如式 (3.13) 所示。

$$\begin{cases} P = V_{grid,x} I_{L,x} + V_{grid,y} I_{L,y} \\ Q = V_{grid,y} I_{L,x} - V_{grid,x} I_{L,y} \end{cases} \quad (3.13)$$

已知稳态时的激励  $U_0 = [V_{grid,x} \ V_{grid,y}]^T$  和响应  $y_0 = [P_0 \ Q_0]^T$ , 由式 (3.7) ~ (3.11) 即可求出逆变器出口侧的电压  $V_{inv,x}$ ,  $V_{inv,y}$ , 以及电流响应的初值  $[I_{L,x} \ I_{L,y}]^T$ , 之后由式 (3.13) 可以求出 PCC 的有功和无功响应。

式 (3.12)、(3.13) 即构成了形如式 (3.1) 的 FC 二阶等效模型的完整形式。在上述模型中, 逆变器调制度  $m$  是由稳态条件决定的非独立待辨识参数,  $R$ 、 $L_f$  则为独立待辨识参数。

## 3.2 燃料电池发电系统建模校验

### 3.2.1 模型参数辨识以及模型检验

文献[34-38]指出, 电力负荷辨识方法大体可以分为线性和非线性两大类, 其中线性类方法包括最小二乘估计、卡尔曼滤波等。目前, 非线性系统的参数辨识方法大都以优化为基础, 其主要目标是寻找一组最优的参数向量, 使得预定的误差目标函数达到最小, 其误差目标函数见式 (3.14)。

$$\min J(x(t), u(t), \alpha, \beta) = \min \sum_{k=0}^N [(y(k) - y_m(k))^T (y(k) - y_m(k))] \quad (3.14)$$

其优化算法包括遗传算法、模式搜索法、单纯形法和粒群算法等<sup>[24-26]</sup>, 本文使用的是改进的遗传算法。遗传算法是一种非线性的优化方法, 是基于自然选择与遗传机理的随机搜索算法<sup>[39-40]</sup>, 其基本思想是: 按照一定的规则生成基因编码的初始群体, 然后从这些代表问题的可能潜在解的初始群体出发, 挑选适应度强的个体进行交叉和变异, 从而发现适应度更佳的个体, 如此一代代地演化, 得到一个最优个体, 将其经过解码, 发现适应度更佳的个体, 如此一代代地演化, 得到一个最优个体, 将其经过解码, 该最佳个体编码则对应问题的最优解或近似最优解。流程图如图 3.5 所示, 辨识步骤如下:

- 1) 给定实测样本（仿真测量得到） $u(k), P(k), Q(k), k=0, 1, 2, \dots, L$ 。
- 2) 给定独立待辨识参数迭代初值 $R, L_f$ 。
- 3) 设定迭代次数 $i=1$ ，将实测样本代入稳态方程和参数约束方程求状态变量初值及非独立参数，将状态变量值 $i_L$ 通过派克变化到同步坐标系d、q轴，代入模型状态方程和输出方程进行模型动态过程仿真模型响应序列 $P_m(k), Q_m(k)$ 。

4) 计算目标函数值 jks。

$$jks = (P - P_m)^2 + (Q - Q_m)^2 \quad (3.15)$$

5) 判断目标函数值是否满足终止条件，是就转第8步，否就利用遗传算法求解第 $i$ 次最优化问题 $\min J \rightarrow \alpha(i)$ ，令 $i=i+1$ ，转第4步。

$$\min J(x(t), u(t), \alpha, \beta) = \min \sum_{k=0}^L \left[ (P(k) - P_m(k))^T (P(k) - P_m(k)) + (Q(k) - Q_m(k))^T (Q(k) - Q_m(k)) \right] \quad (3.16)$$

令 $\alpha = \alpha(i-1), \beta = \beta(i-1)$ ，输出参数 $\alpha, \beta$ 以及模型响应序列 $P_m(k), Q_m(k), k=0, 1, 2, \dots, L$ ，相对误差 $E_r$ ，用于画后面的拟合效果图来进行模型检验，相对误差的计算式如式（3.17）所示，总体测辨法的计算流程图如图3.5所示。

$$E_r = \sum_{k=0}^L \sqrt{(P(k) - P_m(k))^T (P(k) - P_m(k)) + (Q(k) - Q_m(k))^T (Q(k) - Q_m(k))} / L \quad (3.17)$$

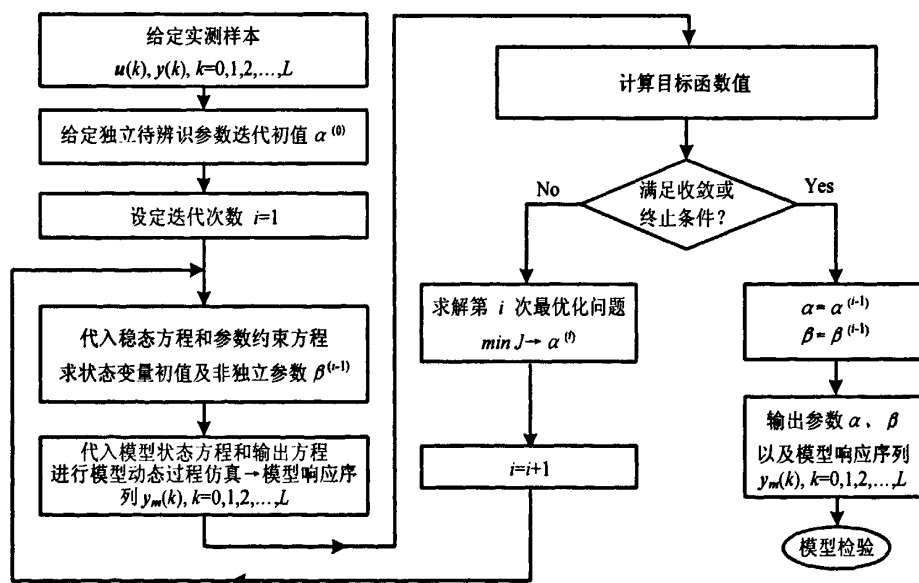


图 3.5 总体测辨法流程图

电力系统运行分析离不开系统仿真这个工具，电力系统规划的方案是靠仿真得到的，同时新元件的接入、运行方式的确定是以仿真结果作为依据的；新装置设计、新方法研究、参数确定都需要用仿真来确认。电力系统仿真的准确程度主要取决于电力系统各元件的模型及其参数的准确性，但是过去对仿真结果准确度不够重视，很少进行各种模型有效性的验证，尤其对负荷模型在仿真中所起的作

用以及如何起作用估计不足, 这导致对负荷建模研究的重视不够, 所以仿真结果的可信度不大。

由于以前技术限制, 电网中较少安装动态检测装置, 而且缺乏全网的统一时钟, 难以获得系统故障时全网统一时标的数据, 所以使得仿真准确度的研究缺乏依据, 仿真所用模型的有效性无法的得到验证。随着全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 技术在电力系统的应用, 随着广泛地在电网中安装动态测量装置, 当系统发生动态事故时, 可以获得带有同步时标的故障过程数据, 这为电力系统仿真准确度的研究提供了依据, 模型的有效性验证也成为可能。

通常情况下, 用一个综合动态负荷模型(感应电动机+静态模型)能够较准确的反映负荷的动态特性, 然而, 现实的电力系统负荷是由各种特性不同的用电设备组成的, 导致负荷特性和负荷结构都相当复杂, 有时综合动态负荷模型(感应电动机+静态模型)与实际的负荷特性相差较大, 此时如还继续用它来描述负荷就不准确, 实际的负荷特性就得不到真实描述, 此时就需要根据实际情况来验证所建立的负荷模型。文献[41-45]指出, 大量研究结果表明负荷特性对电力系统仿真结果有重要影响, 具体表现在不同的负荷特性对电力系统的电压稳定性、暂态稳定性、低频振荡等具有不同程度的影响, 在临界情况下, 计算结果可能发生质的变化。

### 3.2.2 模型的描述能力

为验证上面建立的动态模型对 SOFC 发电系统等效描述的有效性, 以图 3.1 所示系统为仿真实验对象, 在配网内设置三相短路故障, 使 B3 节点电压跌落在 10%~60%之间, 测得 PCC 处母线电压和 SOFC 系统注入 PCC 母线的功率共 8 组数据样本, 分别作为建模激励和实测响应, 对 SOFC 系统进行辨识建模。模型结构如式 (3.20)、(3.21), 参数辨识采用综合改进的遗传算法, 详见参考文献[37]。8 组数据样本的模型参数辨识结果列于表 3.1; 响应及其对应的模型响应曲线如图 3.6 所示。

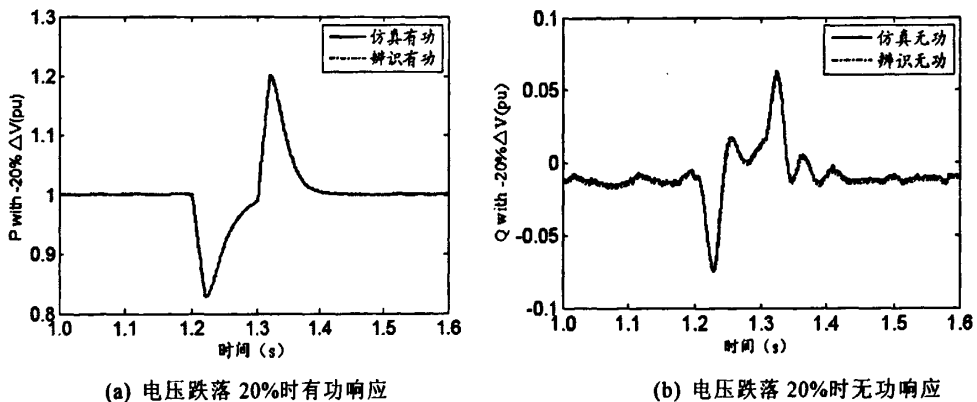


图 3.6 等效描述模型拟合效果

图 3.6 所示结果表明, 暂态过程中, 模型响应均能较好地拟合仿真实验数据,

说明本文提出的 SOFC 模型对数据样本的逼近效果较好,具有较强的自描述能力。表 3.1 的 SOFC 等效描述模型的辨识参数以及残差正好说明了这一点。因此,通过上面的分析充分说明,采用 3.1.3 节所建立的二阶微分方程描述的等效模型能较好地描述 SOFC 发电系统的特性。

表 3.1 SOFC 模型参数辨识结果

编号	电压降	$R$	$L_f$	$m$	残差
1	10%	0.27788	0.046472	0.2613	0.000088
2	15%	0.32232	0.049926	0.2613	0.000104
3	20%	0.31302	0.048984	0.2613	0.000128
4	25%	0.27493	0.047414	0.2613	0.00017
5	30%	0.23083	0.03611	0.2613	0.000189
6	35%	0.23902	0.037366	0.2613	0.000225
7	40%	0.33	0.047728	0.2613	0.000273
8	60%	0.30549	0.050554	0.2613	0.000448

### 3.2.3 模型的泛化能力

将 B3 母线电压跌落分别为 10%~30%时的电压激励依次施加于 20%电压跌落时辨识所得模型,比较相应的模型响应对仿真实测响应的拟合程度。图 3.7 为 10%和 15%内插响应曲线,图 3.8 为 25%和 30%外推响应曲线,响应拟合残差如表 3.2。检验结果表明,虽然拟合样本与建模样本的电压激励幅度相差较大,但模型具有良好的内插和外推特性,因而具有良好的泛化能力。

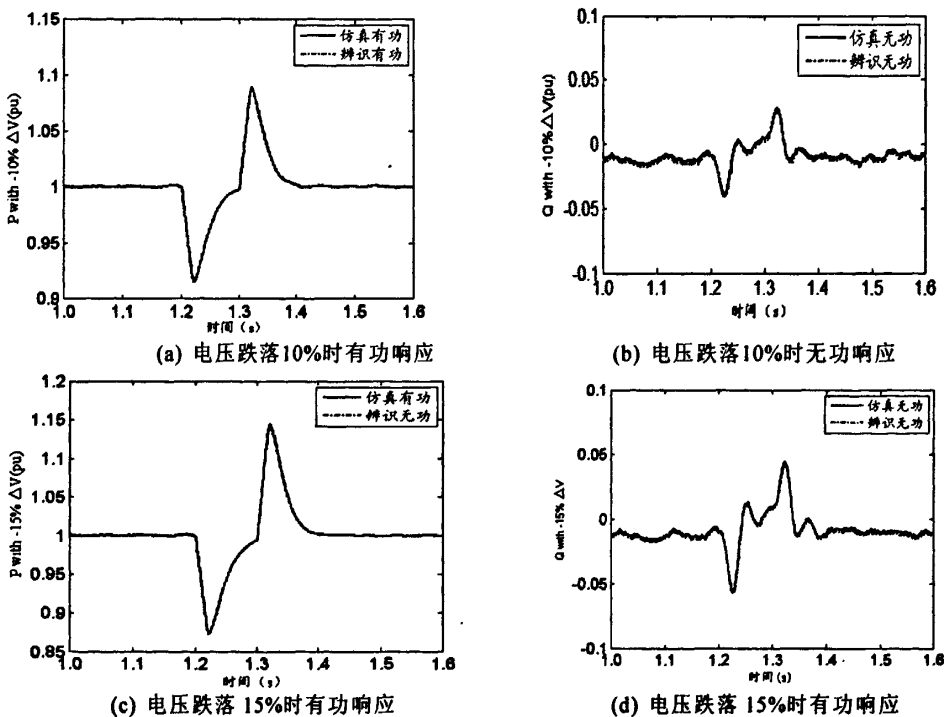


图 3.7 内插能力验证



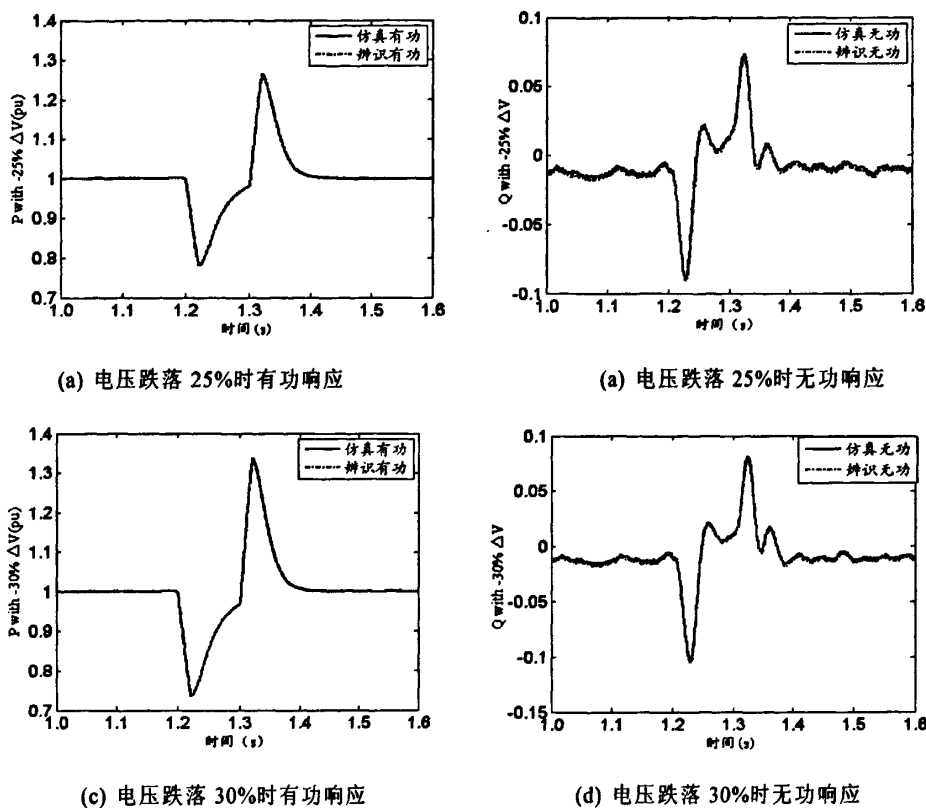


图 3.8 外推能力验证

表 3.2 内插、外推响应残差

残差			
内插 10%	内插 15%	外推 25%	外推 30%
0.000021	0.00026	0.000039	0.00047

### 3.3 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地检验模型的参数稳定性，即模型具有可辨识性。只有参数稳定性好的模型才具有真正的实用化意义。从表 3.2 列出的 8 组辨识参数分析，尽管它们对应的电压激励相差悬殊（最大相差 50%），但各同名参数的分散性较小，从而模型具有较好的参数稳定性。

### 3.4 讨论

(1) 模型的物理意义。就燃料电池本体而言，因决定其动态响应速度的有关时间常数为数秒至数十秒，远大于 PCC 点接入网络的电磁暂态时间常数，因此在网络故障扰动后的暂态过程中，FC 仍可视作恒压源；但此时 FC 发电系统经变流器上网的滤波环节不可避免地因回路电流变化而呈现出暂态过程，忽略滤波回路

对地电容条件下,其动态特性即可用 R-L 电路等效,此即本文所提出之动态等效模型的物理背景。同时,尽管变流器的快速跟踪控制使 FC 发电系统稳态无功输出为零,但正是由于暂态电流的变化使滤波回路电感在 PCC 点电压跌落瞬间向外释放磁场能量,故而造成其暂态无功输出变化,只是变流器的快速跟踪控制使这种暂态无功变化很小。

(2) Park 变换的必要性。3.1.3 节构建动态微分方程时,对同步坐标下的动态方程式 (3.10) 经 Park 变换得到 d-q 坐标下的表达形式,从而使模型具有描述对称故障和非对称故障扰动下之暂态过程的普遍适应性。否则,为了适应于非对称故障将大为增加模型的复杂程度。

(3) 暂态电压跌落幅度对 FC 运行性能的影响。研究表明,电压跌落越大,系统恢复时间越长,暂态过程中无功变化越剧烈;PCC 点电压跌落 83% 是一个临界点,当电压跌落大于 83% 时,电压不可恢复,系统将崩溃。这种现象类似于风电系统的低电压穿越问题。

(4) 模型对变流器控制模式及控制参数的适应性。作者研究了电流滞环控制和电压外环、电流内环的双环控制模式对 FC 发电系统暂态过程的影响。结果表明,两种控制模式的暂态响应基本一致,模型对其均有同样的描述能力。同时,变流器控制参数对 FC 发电系统的暂态过程有明显影响,但模型对不同控制参数下的暂态响应都有良好的拟合效果,说明模型对控制参数的适应能力强。

(5) SOFC 建立稳态时间和受干扰能力。对于 SOFC 而言,从零时刻开始,经过 0.6s 电压输出稳定,即 SOFC 建立稳态的过程需要 0.6s。SOFC 电压跌落的临界点是  $\Delta P=83\%$ ,此时允许电压跌落的持续时间是 0.1s (1.2s~1.3s),如果持续时间大于 0.1s 的话,暂态后电压不可恢复,系统崩溃;当电压跌落是  $\Delta P=50\%$  时,允许电压跌落的持续时间是 0.3s (1.2s~1.5s);当电压跌落是  $\Delta P=20\%$  时,无论电压跌落持续多长时间,暂态结束之后系统电压都可以恢复,只是在暂态过程中的电流与稳态时相比较较大。

### 3.5 本章小结

在第二章搭建的详细 SOFC 发电系统数字仿真模型的基础上,对 SOFC 发电系统的运行特性进行分析;提出了适合于电网仿真计算需求的 SOFC 发电系统的二阶微分方程动态等效模型,进而指出在负荷建模的研究中把 FC 发电系统看作一个功率消耗为负的广义动态负荷;通过不同扰动程度的仿真建模比较分析,验证了本文提出等效描述模型的有效性,并验证了模型的泛化能力和模型参数的稳定性。

## 第四章 光伏发电系统建模

### 4.1 光伏电池的发展现状

PV 发电系统利用硅光电池阵列的特性，直接将太阳能转换为电能，不需要使用热力发动机，所以不需要消耗化石能源。光伏发电装置是由电子器件组成，所以其设计简单，坚固耐用，基本上不需要维护。光伏电池发电系统的优点是它既可独立运行，也可并网运行，输出功率范围为微瓦级到兆瓦级。太阳能电池不仅可以为计算器、钟表、乡村住宅、卫星和太空运载工具提供电能，也可建立兆瓦级的光伏发电厂，发出电能以后输出功率到大电网。由于其重量轻、采用模块化的结构、不需要燃料，故光伏电池发电系统适合于其他分布式发电技术不能实现的环境。在 20 世纪 90 年代，光伏电池发电系统已经采用独立运行的工作模式为建筑物供电的，1997 年安装在居民建筑物上的光伏阵列已经可以并网运行，而且总的发电系统容量已经与独立运行的光伏电池发电系统相当，这是因为政策法规和技术方面的改进使得光伏电能与常规电能有足够的竞争力。在电网能够覆盖的地区，光伏电能的价格仍然比由常规电网提供的电能价格高 2~5 倍，这是由于技术限制，硅材料制作成本较高，使得目前太阳能电池的生产成本高；在没有电网的地区，考虑到长距离输电线损耗、运行和维护费用，光伏电能成为了最便宜的电能资源。随着光伏电池发电系统造价的下降(见图 4.1)，光伏电池发电系统的装机容量逐年上升，到 1998 年，光伏电能的价格第一次下降到  $4\$/W^{[30]}$ 。

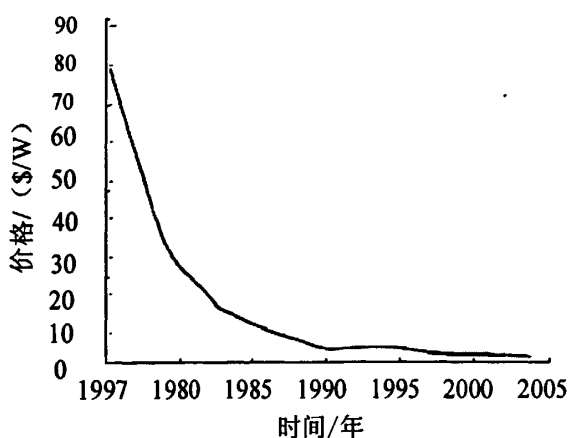


图 4.1 1975-1998 年光伏电池发电系统模块的平均出厂价格

现在世界各国都在支持光伏产业的发展，因此光伏电池的产量不断上升，技术的发展也使得光伏电池的价格会越来越便宜。2009 年全世界全年的太阳能电池产量达到 10431MW，比 2008 年增长 42.5%。目前，太阳能光伏发电的成本大约

是燃煤电厂发电成本的 11~18 倍，因此目前各国光伏产业的发展基本上都是依赖政府的补贴，政府的补贴程度决定着该国的光伏产业的发展规模。目前，德国、西班牙、法国、美国、日本等发达国家政府的补贴力度上最大。2008 年，西班牙推出了优厚的光伏产业补贴政策，使其国内光伏产业出现了爆发式的发展，一年之内一度占据世界光伏电池产量的三分之一强，到 2009 年为止，德国光伏组件安装量高达 3200MW，占全球总安装量的一半还多（确切的的比例是 50.4%）<sup>[30]</sup>。

光伏发电系统在全世界范围内都受到重视，因为光伏系统的体积相当小，运作起来没有噪声，利用的是太阳能不会产生废气，所以光伏发电系统是分布式电源中是一个很有吸引力的可再生资源。光伏发电技术还有一个引人注目的优点，随着负荷的增加，可以增加更多的光伏单元（扩大光伏阵列）来满足负载的需求，运行方式很灵活。光伏发电的主要优点如下<sup>[46]</sup>：

- 1) 从设计到开始建立一个光伏发电站所需要的时间很短。
- 2) 具有高度的模块化，因此光伏发电站的经济利益不再受规模大小的限制。
- 3) 功率的输出与漏阻抗的需求匹配得很好。
- 4) 是一个静态的模型，没有运动的部分，所以没有噪音。
- 5) 每单元的功率容量很大。
- 6) 因为没有运动的部分，所以寿命很长，而且基本上不需要对其进行维护。
- 7) 因为重量很轻，所以它有高度的移动性和便携性。

总之，光伏发电具有不需燃料、环境友好、无转动部件、维护简单、高度模块化、可大可小等突出优点，作为无电地区的离网型小型独立电源，以及城市中心与居民区的分散的小型联网电站（如屋顶电站）已得到了实际应用，单个电站最大功率达几千千瓦。2004 年全世界光伏发电总用量已达 430 万千瓦，年产量 120 万千瓦。光伏发电技术日益成熟，现在广泛运用于向离配电网很远的地方供电，不久的将来即将发展装机容量较大的光伏发电站，成为人类理想的新能源。

## 4.2 光伏电池的工作原理

太阳能发电有热发电和光伏发电两种。太阳能光伏发电技术是将太阳光辐射能通过光伏效应直接转换为电能，它是一种可再生的无污染的发电方式；太阳能热发电是利用集热器收集太阳能产生的热量，将太阳辐射能转换成热能，产生水蒸汽，进入汽轮发电机组发电。本文研究的是光伏发电，是直接把太阳光的能力直接转换为电能。

光伏电池的工作原理：对于太阳能电池的功能最初的理解可以把它看成一个光电二极管，光能是以适当能量水平的光子存在的。光子打击在晶体硅上会产生电子—空穴对，电子—空穴对在内置静电场的作用下，各自向相反方向运动，离开势垒区，结果使得 P 区电势升高，N 区电势降低，P—N 结两端因此形成一个光

生电势，这就是 P—N 结的光生伏特效应。由于光照产生的非平衡载流子各向相反方向漂移，从而在内部构成自 N 区流向 P 区的光生电流，在 P—N 结短路情况下构成短路电流。在 P—N 结开路情况下，P—N 结两端建立起光生电势差，这就是开路电压，如将 P—N 结与外电路接通，只要有太阳光存在，就会不断地有电流流过电路，P—N 结起了电源的作用，接上外电路的话就可以向外部输出能量。这就是光电池的基本工作原理。显然，光电池之所以能在光照下形成电流密度、短路电流密度、开路电压等，都是由于材料内部存在内建静电场的缘故<sup>[46-48]</sup>。光电池与负载连接的示意图如图 4.2 所示。

简而言之，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世界各国大力的推广使用。太阳能光伏系统，将太阳光能转换为电能，技术上已较成熟。主要优点是：不排放有害气体、无温室效应、无噪音、可靠、寿命长等，是一种清洁的可再生能源。主要应用于为城乡住宅、荒漠地区供电，也可联网为工业供电。在无电或缺电地区，光伏和风力发电可组成离网混合分布式电力系统。太阳能光伏发电系统一般由太阳能电池整列、蓄电池组、太阳能控制器、直流—交流逆变器和交流配电设备等组成。

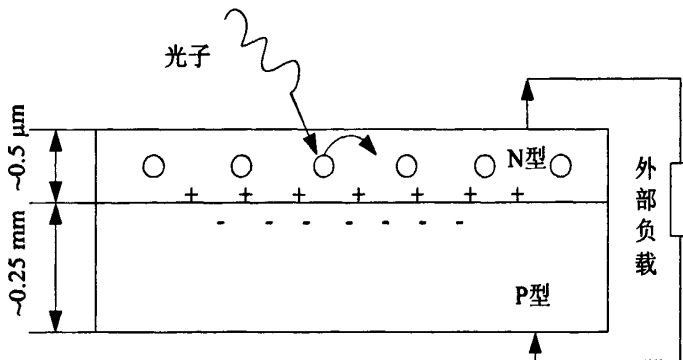


图 4.2 光电池与负载连接的示意图

如图 4.2 所示，一般地，典型的晶硅电池中，N 区的厚度为  $0.5\ \mu\text{m}$ ，P 区的厚度为  $0.25\text{mm}$ 。一个光子的能量可由式 (4.1) 计算得到：

$$E_p = h\nu \quad (4.1)$$

式中， $h$  为普朗克常数， $h=6.6260693(11)\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ ； $\nu$  为太阳光的辐射频率，与太阳光的波长和速度有关，关系为  $\nu=c/\lambda$ ，代入之后可得式 (4.2)。

$$E_p = hc/\lambda \quad (4.2)$$

半导体硅的能带宽度为  $1.11\text{eV}$ ，因此太阳能辐射的光波长为  $1.2\ \mu\text{m}$  或更短，有利于在硅中产生电子空穴对，从而产生电流。对于 PV 电池的半导体材料而言，可用的能带宽度如表 4.1 所示，最优的能带宽度在  $1.5\text{eV}$  左右。

表 4.1 可用于 PV 电池的半导体能带宽度

半导体材料	能带/eV	半导体材料	能带/eV
Si	1.11	CuInTe <sub>2</sub>	0.90
SiC	2.60	InP	1.27
SdAs <sub>2</sub>	1.00	In <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	1.20
CdTe	1.44	In <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.80
CdSe	1.74	Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>	1.60
CdS	2.42	ZnTe	2.20
CdSnO <sub>4</sub>	2.90	ZnSe	2.60
GaAs	1.40	AlP	2.43
GaP	2.24	AlSb	1.63
Cu <sub>2</sub> S	1.80	As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	1.60
CuO	2.00	Ge	1.20
Cu <sub>2</sub> Se	1.40	Se	0.67
CuInS <sub>2</sub>	1.50	—	1.60
CuInSe <sub>2</sub>	1.01	—	—

### 4.3 光伏电池发电系统建模

光伏电池发电是在一定条件下使太阳能直接转化为电能，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，目前可以掌握并使用的太阳能电池有单晶硅电池、多晶硅电池和薄膜电池三种，本章研究以单晶硅为例<sup>[49-50]</sup>。

光伏电池发电的一个主要特点就是受天气条件（如光照强度、温度等）因素影响，大面积应用还存在两个主要问题，首先由光伏电池产生的电能价格比其他的分布式发电系统高（由于其初期投资较大）；其次是输出的功率是断续的，只能白天发电，晚上不能工作，不能与负荷完全匹配，因此需要蓄电池或其他辅助系统，使得其成本增大。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、DC/AC 变换器、光伏并网逆变器等部件构成的光伏电池发电系统对用户进行供电。在光伏并网系统中，并网逆变器是技术核心，目前并网型系统的研究主要集中于 DC-DC 和 DC-AC 两级能量变换的结构，DC-DC 变换环节调整光伏阵列的工作点使其跟踪最大功率点；而 DC-AC 逆变环节主要使输出电流与电网电压同相位，同时获得单位功率因数。其中 DC-AC 是系统的关键设计。光伏发电的供电模式如图 4.3 所示。



高，在实际应用中并不常见；第3种是既考虑并联电阻，又考虑串联电阻的较精确仿真模型，其等效电路如图4.5所示<sup>[51-54]</sup>，本文研究使用第3种等值电路模型。

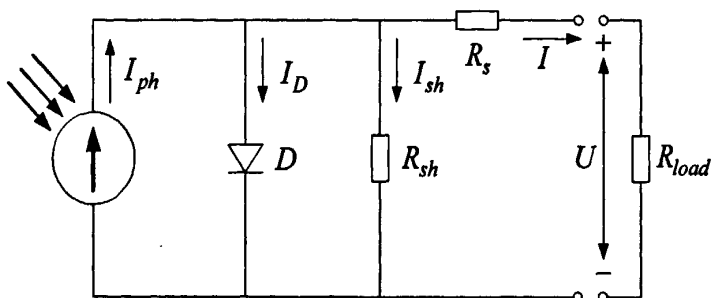


图 4.5 光伏电池的等效电路

单个光伏电池（一个 P-N 结）的输出电流由以下数学表达式来描述：

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (4.3)$$

式 (4.3) 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，可以用下式求出：

$$I_{ph} = \frac{G}{1000} [I_{SCR} + K_1(T - T_r)] \quad (4.4)$$

式中： $G$  为太阳日照强度，单位是  $W/m^2$ ； $I_{SCR}$  为在太阳日照强度等于  $1000W/m^2$ 、参考温度等于  $25^\circ C$  时的电池短路电流，单位是  $A$ ； $K_1$  为电池短路电流温度系数，单位是  $A/^\circ C$ ； $T$  为电池温度，单位是  $^\circ C$ ； $T_r$  为参考温度，一般地，参考温度  $T_r=25^\circ C$ 。

式 (4.3) 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光伏电池的开路电压有关，可表达为：

$$I_D = I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{qU_{oc}}{AKT} \right] - 1 \right\} \quad (4.5)$$

其中：

$$I_{os} = I_{or} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_{GO}}{BK} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.6)$$

$$U_{oc} = U + IR_s \quad (4.7)$$

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

式 (4.3) 中  $I_{sh}$  指的是电池对地的泄漏电流，即  $R_{sh}$  上流过的电流，如图中所示，可以用式 (4.8) 求得：



$$I_{sh} = \frac{U_{oc}}{R_{sh}} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (4.8)$$

式中  $R_{sh}$  为电池的等效并联电阻，单位  $\Omega$ 。

将式 (4.5) ~ (4.8) 带入 (4.3) 可以得到：

$$I = I_{ph} - I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{q(U + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{(U + IR_s)}{R_{sh}} \quad (4.9)$$

一个光伏阵列通常由几个光伏电池串联或并联而成，因此，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  $I$  的关系如下所示：

$$U_{pv} = n_s U, \quad I_{pv} = n_p I \quad (4.10)$$

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 (4.10) 带入式 (4.9) 可以得到一个光伏阵列输出的电流型通常可以表示为式 (4.11)，此时把光伏电池看成为电流源（也有文献把光伏电池写成电压的形式，即把光伏电池看成电压源，文中未作研究）：

$$I_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s/n_p)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{(n_p U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \quad (4.11)$$

光伏阵列的输出功率是光伏电池输出电流与终端电压的乘积（利用  $P = UI$ ），其数学表达式为：

$$P = n_p I_{ph} U_{pv} - n_p I_{os} \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s/n_p)}{AKT} \right] - 1 \right\} U_{pv} - \frac{(n_p U_{pv}/n_s + I_{pv}R_s) U_{pv}}{R_{sh}} \quad (4.12)$$

### 4.3.2 最大功率点跟踪控制

光伏电池发电系统中，PV 的输出功率受多种因素影响，如日照强度和环境温度等等，在不同的环境下，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 4.6 所示。

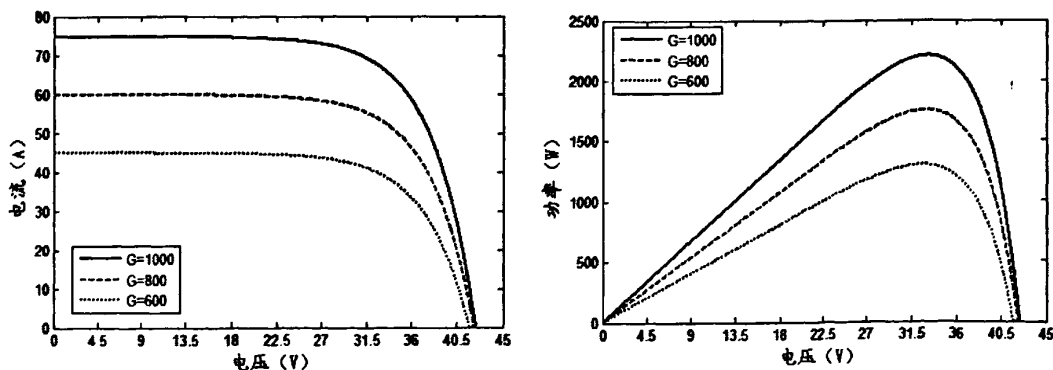


图 4.6 PV 的 U-I 曲线和 P-U 曲线

从图 4.6 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, 功率曲线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压。因此若想最大限度地提高 PV 的输出功率, 可以通过调节 PV 的输出电压使其趋近最大功率点, 即实现最大功率点跟踪。

根据文献[55-61]所述, 目前常用的最大功率点跟踪算法有定电压跟踪、扰动观察法、滞环比较法、电导增量法、最优梯度法、间歇扫描法、模糊控制法、实时监控法、神经网络预测法等。本文选择使用电导增量法为 MPPT 的控制方法, 电导增量法(Incremental Conductance, IC)是 MPPT 控制常用的算法之一<sup>[59]</sup>, 通过光伏阵列 P-V 曲线可知功率到达最大值  $P_{\max}$  处, 曲线的斜率为零, 所以有:

$$P_{\max} = UI \quad (4.13)$$

$$dP/dU = I + U dI/dU = 0 \quad (4.14)$$

$$dI/dU = -I/U \quad (4.15)$$

式(4.15)为达到最大功率点的条件, 即: 当输出电导的变化量等于输出电导的负值时, 光伏阵列工作在最大功率点, 电导增量法程序如图4.7所示, 此方法需要时刻读取同步采集的电压和电流信息。

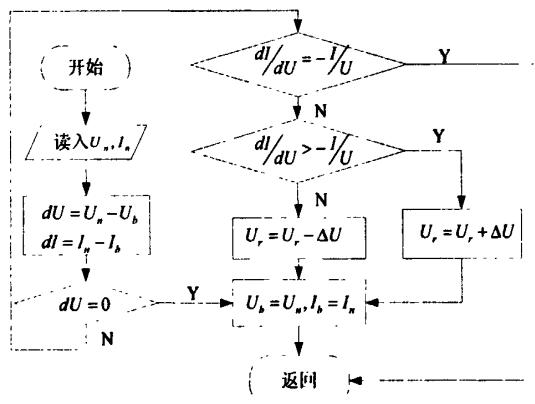


图4.7 电导增量法计算程序

### 4.3.3 PV 并网控制策略

直流分布式电源应用的关键技术之一是选择合适的逆变并网运行控制方法, 使其能够保持电力系统可接受的外特性<sup>[62-64]</sup>。美国对分布式电源应用和市场前景的调查表明: 从电网安全稳定的角度来考虑, 电力公司普遍认为分布式电源最好能表现的如“负荷”一般, 即分布式电源都不参与电网的电压调节和频率调节。从我国配电系统的实际情况考虑, 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, 电气特性上类似负荷, 但并不吸收正功率, 反而发出功率, 这样可尽量避免分布式电源直接参与馈线的电压调节。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) 来控制光伏电池逆变器, 使得光伏电池能按照设定的值向电网输送恒定的功率, 同时保持 PCC 的电压在期望的、恰当的范围。控制系统结构如图 4.8 所示, PWM 调节的双环串级 PI 控制框图如图 4.9 所示<sup>[65-67]</sup>。

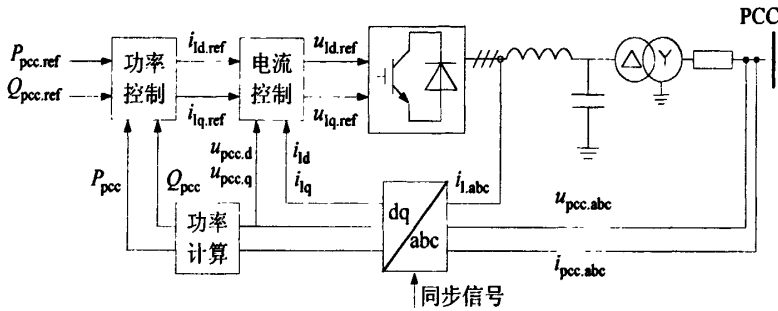


图 4.8 直流分布式电源逆变并网控制系统结构

图 4.8、4.9 中的逆变器控制系统外环为功率、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, 响应速度比较慢; 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。

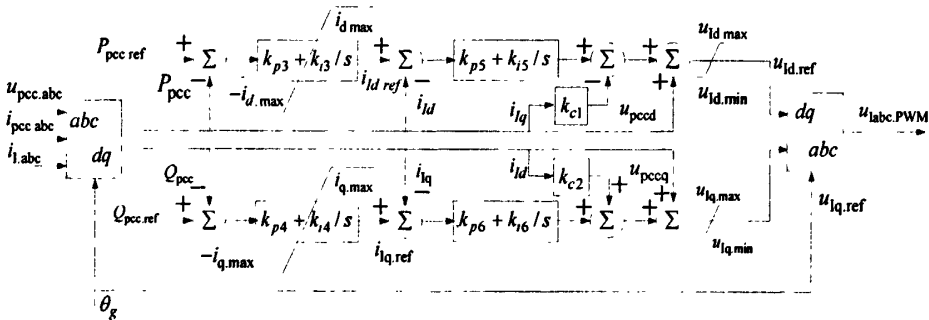


图 4.9 PWM 调节的双环串级 PI 控制框图

图中:  $u_{pcc.abc}$ 、 $i_{pcc.abc}$  分别为注入 PCC 的三相电压、三相电流;  $i_{l.abc}$  为逆变器交流侧三相电流;  $P_{pcc.ref}$ 、 $Q_{pcc.ref}$  分别为有功和无功参考值;  $P_{pcc}$ 、 $Q_{pcc}$  分别为实际注入 PCC 的有功、无功;  $i_{d.ref}$ 、 $i_{q.ref}$  分别为逆变器交流侧  $d$  轴、 $q$  轴电流参考值;  $i_{d}$ 、 $i_{q}$  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;  $u_{labc.PWM}$  为逆变器三相脉宽调制信号。

另外, 任何逆变器输出都存在较大谐波, 所以光伏电池逆变器出口侧要经电感-电容 (LC) 滤波器滤波后, 再通过隔离变压器连接到 PCC。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。

### 4.4 PV 的运行特性

对于 PV 而言，从零时刻开始，经过 2s 左右电压输出稳定，即 PV 建立稳态的过程需要 2s。PV 电压跌落的临界点是  $\Delta P=18\%$ ，此时允许电压跌落的持续时间是 0.1s (3.2s~3.3s)。根据式 (4.12)，可以计算光伏电池输出的功率大小。从中可看出，光伏电池的输出受环境因素（光照强度和环境温度）的影响，同时还受自身因素（串并联个数  $n_s$  和  $n_p$ ，串联电阻  $R_s$  并联电阻  $R_{sh}$ ）的影响。本文对此进行了相关研究。

#### 4.4.1 光照强度 G 对输出功率影响

根据式 (4.12)，可知光伏电池的输出功率受到几个因素影响，其中光照强度是一个主要因素，对光伏电池输出功率影响较大，本文对此进行了详细研究，选择 PV 发电系统如下所述：单个光伏电池以 BP Solar 公司 BP350J 型单晶硅电池为对象，其主要参数为： $V_m=17.3V$ ， $I_m=2.89A$ ， $I_{SCR}=3.17A$ ， $U_{oc}=21.8V$ ， $P_{mpp}=50W$ ， $R_{sh}=300\Omega$ ， $R_s=0.409\Omega$ ，光伏电池阵列由 36 个光伏电池串联组成，只有 1 个并联组，即  $n_s=36$ ， $n_p=1$ ，整个电池阵列总长 839mm，宽 537mm，厚 50mm，重 6.5kg，假设电池温度维持 40℃ 不变，研究光照强度变化时光伏阵列的 U-I 曲线和 P-U 曲线如图 4.10 所示。

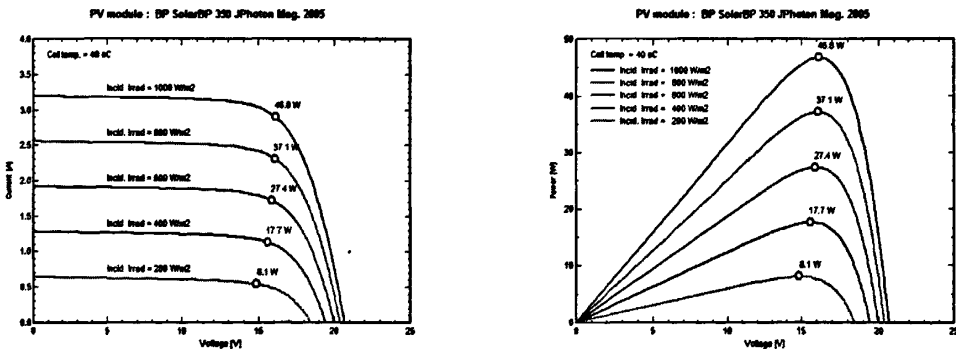


图 4.10 光照强度变化时光伏电池的 U-I 曲线和 P-U 曲线

图 4.10 的曲线中，光照强度至上而下分别为  $1000W/m^2$ （输出的最大功率为 46.8W）， $800W/m^2$ （输出的最大功率为 37.1W）， $600W/m^2$ （输出的最大功率为 27.4W）， $400W/m^2$ （输出的最大功率为 17.7W）， $200W/m^2$ （输出的最大功率为 8.1W）。仿真结果表明，光伏阵列的输出特性（即 P-I 曲线和 P-U 曲线）呈非线性，说明光伏阵列是非线性元件，每条曲线都有唯一一个最大功率点，在图中以圆圈表示，表示光伏阵列能输出的最大功率  $P_m$ 。随着日照强度的增强，光伏阵列输出功率越大，曲线越高，光伏电池的最大输出功率  $P_m$  也不断增大，说明日照强度越大，光伏电池的输出功率就越大。

#### 4.4.2 电池温度 T 对输出功率影响

根据式 (4.12), 可知光伏电池的输出功率受到电池温度的影响, 本文对此进行了详细研究。同样地, 取 4.3.1 节的光伏电池仿真系统, 研究当光照强度维持  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  不变, 光伏电池温度变化时得到光伏电池的 U-I 曲线和 P-U 曲线如图 4.11 所示。

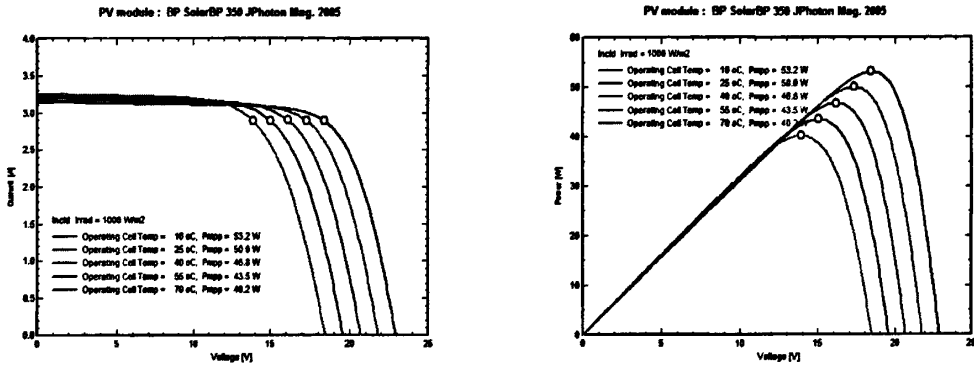


图 4.11 电池温度变化时光伏电池的 U-I 曲线和 P-U 曲线

图 4.11 的曲线中, 光伏单元的温度至上而下分别为  $10^{\circ}\text{C}$  (输出的最大功率为  $53.2\text{W}$ ),  $25^{\circ}\text{C}$  (输出的最大功率为  $50\text{W}$ ),  $40^{\circ}\text{C}$  (输出的最大功率为  $46.8\text{W}$ ),  $55^{\circ}\text{C}$  (输出的最大功率为  $43.5\text{W}$ ),  $70^{\circ}\text{C}$  (输出的最大功率为  $40.2\text{W}$ )。仿真结果可见, 电池温度越高, 光伏电池的输出功率就越低, 所以要使得光伏电池的输出功率较高, 利用率较大的话, 必须考虑光伏电池的散热问题, 把光伏电池组件的温度控制在一定范围之内。

#### 4.4.3 串联阻抗 $R_s$ 对输出功率影响

根据式 (4.12), 可知光伏电池的输出功率也受到串联阻抗这个因素的影响, 本文对此进行了详细研究, 同样地, 取 4.3.1 节的光伏电池仿真系统, 研究标准情况下: 即  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $R_{sh}=300\Omega$ , 串联电阻  $R_s$  变化时光伏电池的 U-I 曲线和 P-U 曲线如图 4.12 所示。

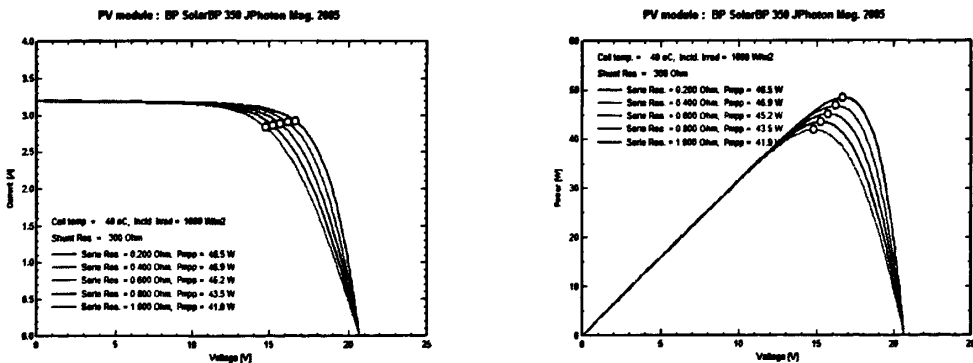


图 4.12 串联电阻变化时光伏电池的 U-I 曲线和 P-U 曲线

由于太阳能光伏阵列本身存在电阻，当有工作电流流过光伏阵列时必然会引起电池板内部的串联损耗，从而引入串联电阻  $R_s$  来描述此损耗。由式 4.12 可知，串联电阻越大，线路损失就越大，光伏电池的输出功率就会降低，从而导致输出效率的降低；反之，光伏电池的输出功率将增加，输出效率会增大，仿真结果也证明了这点。图 4.13 的曲线中，光伏单元的串联电阻至上而下分别为  $0.2\Omega$ （输出的最大功率为  $48.5W$ ）， $0.4\Omega$ （输出的最大功率为  $46.9W$ ）， $0.6\Omega$ （输出的最大功率为  $45.2W$ ）， $0.8\Omega$ （输出的最大功率为  $43.5W$ ）， $1.0\Omega$ （输出的最大功率为  $41.9W$ ）。图中曲线表明，光伏电池的输出特性呈非线性，每条曲线都有一个最大功率点，也即光伏电池的最佳工作点，光伏阵列运行在此点时效率最高。 $R_s$  值越小，开路电压越大，光伏电池的最大输出功率值越大，光伏电池的输出特性曲线中平缓线段越长，弯度越大；随着  $R_s$  的增大，平缓线段缩短，弯度减小，开路电压与最大输出功率也随之减小。

#### 4.4.4 并联阻抗 $R_{sh}$ 对输出功率影响

根据式 (4.12)，可知光伏电池的输出功率受到并联阻抗这个因素影响，并联电阻用于模拟泄露电流  $I_{sh}$  产生的损耗，本文对它的影响性大小进行了详细研究，同样地，取 4.3.1 节的光伏电池仿真系统，研究标准情况下：即  $T=25^\circ C$ ， $G=100W/m^2$ ， $R_s=0.409\Omega$ ，并联电阻  $R_{sh}$  变化时光伏电池的 U-I 曲线和 P-U 曲线如图 4.13 所示。

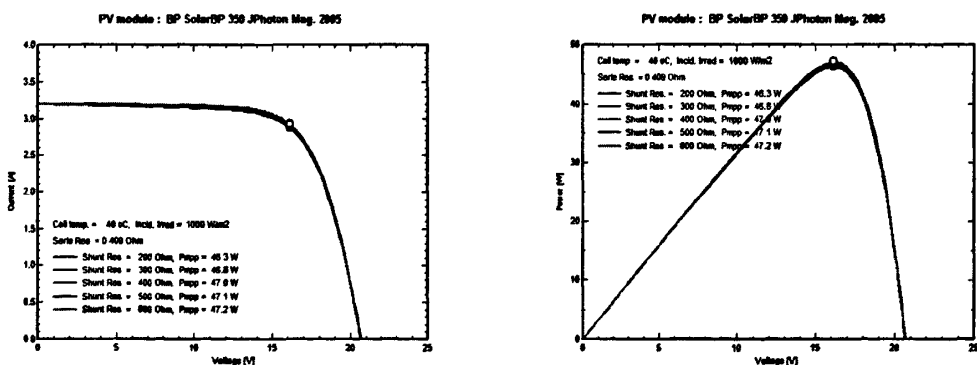


图 4.13 并联电阻变化时光伏电池的 U-I 曲线和 P-U 曲线

图 4.13 的曲线中，光伏单元的并联电阻至上而下分别为  $200\Omega$ （输出的最大功率为  $46.3W$ ）， $300\Omega$ （输出的最大功率为  $46.8W$ ）， $400\Omega$ （输出的最大功率为  $47.0W$ ）， $500\Omega$ （输出的最大功率为  $47.1W$ ）， $600\Omega$ （输出的最大功率为  $47.2W$ ）。仿真结果说明，并联损耗阻抗  $R_{sh}$  对光伏电池的输出特性影响不大（并联电阻最大值和最小值之间相差 200%，但是最大功率的最大变化范围才 1.94%），取不同的  $R_{sh}$ ，光伏电池的 U-I 曲线和 P-U 曲线几乎重合。

#### 4.4.5 光伏电池效率

研究过程中发现,光伏电池的效率同样受环境因素(光照强度和环境温度)的影响,同时还受自身因素(串联电阻  $R_s$  并联电阻  $R_{sh}$ )的影响。温度不变时,光照强度越大,光伏电池效率越大;光照强度不变时,光伏电池组自身温度越低,光伏电池的效率越大;标准情况下:即  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ , 串联阻抗越小,光伏电池的效率越大;标准情况下:即  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ , 并联阻抗越大,光伏电池的效率越大,但是效果不明显。

#### 4.5 PV 发电系统的等效特性描述

电力系统负荷建模不仅是为电力系统处于稳态时分析电力系统服务,而且要为电力系统暂态仿真服务,因此在建立能准确描述光伏阵列外特性的等效数学模型时,不仅需要从静态特性进行分析,而且需要对其动态特性进行综合分析,这样得到的模型才有实际应用价值。基于 Simulink 工具箱,将 PV 发电系统接入如图 4.14 所示的四节点仿真系统进行研究,4 节点是 5MVA 配电馈线,系统等值以及负荷数值在图中标出,各节点负荷类型采用 60%感应电动机动态负荷并联 40%恒阻抗静态负荷。

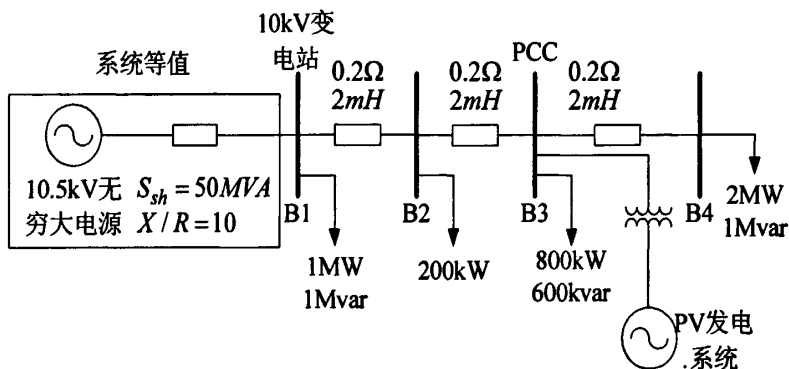


图 4.14 4 节点系统单线图

假设 PV 接入的配电网侧(如母线 B1、B2)发生三相对称短路故障,使 PV 接入点即 B3 母线电压在 1.2~1.3s 时跌落 20%,通过观察系统中 B1 节点处的电压、有功和无功,分析 PV 发电系统的运行特性。

##### 4.5.1 PV 的静态特性

由图 4.6 可知, PV 的电压-电流特性近似为矩形,当光伏电池输出电压较低时(小于开路电压),光伏电池可近似等效为一恒流源,接近开路电压时近似为恒压源。经过 MPPT 跟踪控制和单向 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,特别是在夜间没有太阳光的作用时,光伏阵列几乎完全停止工作,没有功率输出。电网中为了保证电力系统运行的稳定性,同时也为很好地保证 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。白天日照较强时,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,蓄电池处于充电状态;夜间,则使蓄电池处于放电状态,向负荷供电,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 4.4.2 节的控制方法,可以实现恒定的交流功率输出。

#### 4.5.2 PV 的动态特性

根据上面的稳态情况分析可知,由于 PV 是一个直流型电源,没有旋转机械,其输出功率仅与环境因素(光照和温度)有关,但是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,当外部系统发生故障时,这个暂态过程的时间常数是 ms 级的,就负荷建模而言,在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中所表征的负荷特性。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 具有动态特性与稳态运行的静态特性基本一致。

综上所述,PV 作为典型的直流分布式电源,通过 MPPT 跟踪控制、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。下面以稳态运行情况下,系统电压受外部干扰下降 20%,持续 0.1s 恢复为例,分别对四节点系统 B1 母线处的各状态量进行比较分析,结果如图 4.15 所示。

由图 4.15 可知,基于 4.5.2 节提出的等效模型,模型响应均能较好地拟合仿真实验数据,说明本文提出的 PV 模型对数据样本的逼近效果较好,具有较强的自描述能力。接入 PV 系统等效模型对出口电压影响不大,有功和无功稍微有所差别,但整体稳态拟合效果和暂态趋势还是基本一致;接入 PV 系统和等效模型对其节点电压、注入有功、无功的影响几乎没有。因此,从综合负荷特性的角度,恒功率控制的电压源和 PV 发电系统无论在稳态还是暂态过程,均能表现出一致的拟负荷



外特性，即用恒功率控制的电压源能较好地等效描述PV发电系统。根据逆变型直流分布式电源的这种拟负荷外特性，当研究考虑PV发电系统的配网侧综合负荷建模时，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发电系统看作一个功率消耗为负的静态恒功率负荷。

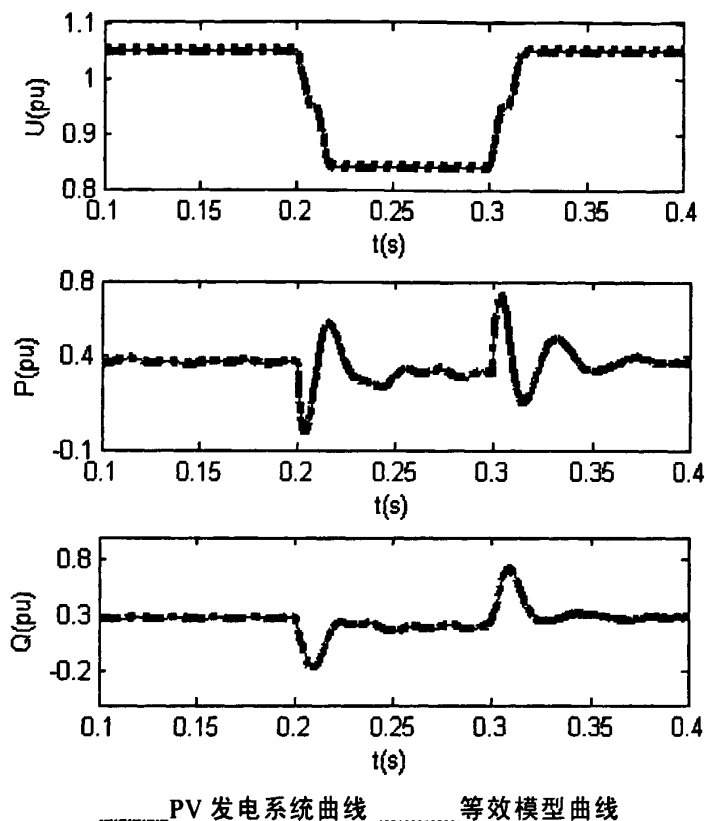


图 4.15 B1 电压、有功和无功

## 4.6 PV 的孤岛效应

光伏电池存在一个特殊的问题——“孤岛效应”，所谓孤岛效应就是当电力系统因电气故障、误操作、自然因素或停电维修等原因而停止工作时，电网由于继电保护作用中断供电，但是安装在用户端的光伏并网发电系统不能即时检测出停电状态迅速将自身脱离市电网络，各个光伏并网发电系统仍会继续运行，并且与本地负载连接处于独立运行状态，因而形成了一个由光伏并网发电系统向周围负载供电的一个电力公司无法掌握的自给供电孤岛现象。从用电质量和用电安全等方面考虑，孤岛状况是不允许出现的，所以，光伏并网发电系统都应具有检测出孤岛状态并快速有效停止并网运行的能力。

孤岛效应会带来以下几点危害：1) 光伏电池处于孤岛效应时，其电压和频率无法由主网进行控制，可能会对电设备造成损坏；2) 孤岛中的线路仍然带电，维修人员不知情的情况下，会对维修人员造成人身危害；3) 当电网检修完成，准备恢复正常供电时，有可能造成非同相合闸，导致线路继电保护再次跳闸，对光伏

并网逆变器和其他用电设备造成损坏；4) 孤岛效应时，若负载容量与光伏并网器容量不匹配，会造成对逆变器的损坏。

逆变器可采用两种“孤岛效应”检测方法，即被动式检测和主动式检测两种。被动式检测方法指实时检测电网电压的幅值、频率和相位，当电网失电时，会在电网电压的幅值、频率和相位参数上，产生跳变信号，通过检测跳变信号来判断电网是否失电。主动式检测方法指对电网参数产生小干扰信号，通过检测反馈信号来判断电网是否失电。其中一种方法就是通过测量逆变器输出的谐波电流在并网点所产生的谐波电压值，通过计算电网阻抗来进行判断，当电网失电时，会在电网阻抗参数上发生较大变化，从而判断是否出现了电网失电情况。此外，在并网逆变器检测到电网失电后，会立即停止工作，当电网恢复供电时，并网逆变器并不会立即投入运行，而是需要持续检测电网信号在一段时间（如90s）内完全正常，才重新投入运行。电网正常工作时，由于大电网自己有一定的平衡作用，检测不到这些扰动。电网出现故障以后，逆变器输出的扰动将快速累积并超出允许范围，从而触发孤岛效应检测电路。该方法检测精度较高，不能检测的范围小，但是控制方法较复杂，降低了电能质量，目前并网逆变器的反孤岛策略都采用被动式检测和主动式检测方案相结合的方式。

主动频率漂移检测法（Active Frequency Drift Detection, AFD）原理如图 4.16 所示。周期扰动孤岛效应检测法原理如图 4.17 所示。

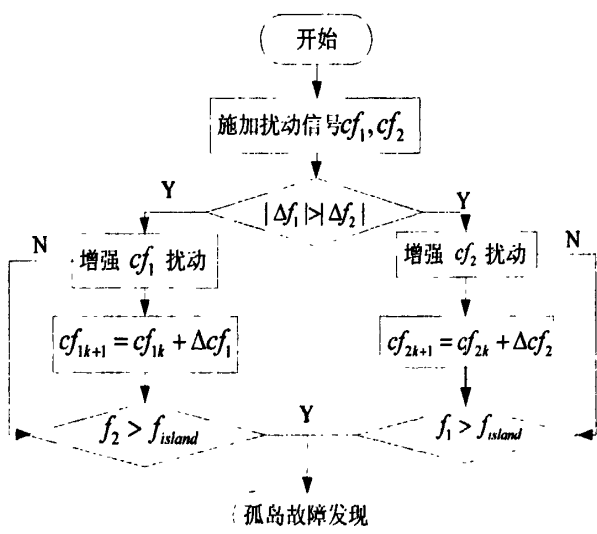
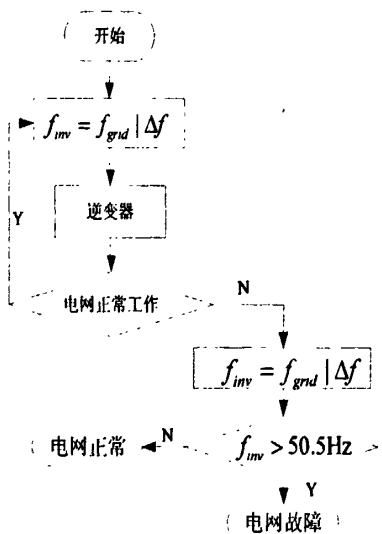


图 4.16 AFD 孤岛检测方法控制原理

图 4.17 周期扰动孤岛检测方法原理图

需要指出的是，任何一种孤岛效应的检测的方法均具有其局限性，不能百分之百地消除孤岛效应带来的危害，要同时从电站管理上来杜绝检修人员伤亡事故的发生，当停电时需要对设备和线路进行检修时，必须先断开并网逆变器，切实保证线路不带电的情况下在对线路和设备进行维修，而且保证百分之百接地。同时，逆变器均带有隔离变压器，使得逆变器的直流输入和交流输出之间电气隔离开来。直流侧的光伏组件阵列为“浮地”，正负极与地之间都没有电气连接，且

逆变器在运行过程中, 随时检测直流正负极的对地阻抗, 从而保证逆变器直流侧的短路故障不会影响到电网。表 4.2 总结了各种检测方法的优缺点以及适用场合。

表 4.2 孤岛检测方案的特点及适用场合

检测方法	特点	适用场合
被动检测法	1. 输出电压/频率检测	有些电量不能直接测量需要通过比较复杂算法计算
	2. 电压谐波检测	入电压谐波, 输出有功等
	3. 相位偏移检测	当负载和输出功率匹配, 存在较大的检测盲区, 检测时间长
主动检测法	1. 自动频率/相位偏移法	对纯阻性负载不存在检测盲区, 而 RLC 并联负载也仅在特定的相角区域存在盲区; 检测响应时间短; 由于频率相位的偏移, 导致输出功率因数不为 1, 给电网注入谐波, 影响供电质量
	2. 电压/频率正反馈法	检测盲区小; 检测速度快; 该方案的实施关键在于确定反馈增益; 既要保证在并网过程中系统稳定, 又要在孤岛产生时能破坏系统平衡
	3. 输出有功扰动	控制思想简单, 易于实现; 当孤岛时刻负载有功需求恰好与扰动输出有功匹配, 那么孤岛检测失败
	4. 输出无功补偿	检测时间长; 输出电流受无功功率控制, 算法复杂; 固定无功补偿功率控制有可能与负载需求一致, 只部分补偿负载无功还要对本地负载无功需求进行
孤岛检测	1. 运用远程通讯监控线路	对电网正常运行无影响
	2. 自动投切阻抗	需要额外安装监控或者阻抗投切设备, 成本比较昂贵

## 4.7 本章小结

由以上的分析可知, 光伏电池发电系统具有良好的经济效益、社会效益和环境效益, 光伏电池是绿色的可再生资源, 满足可持续发展的要求, 所以必将广泛运用于电力系统中为负荷提供电能。但是由于目前技术的限制, 光伏电池还不能

大规模地运用在电力系统中，所以逆变器和充电器的拓扑结构以及其控制策略是急需解决的问题，尽管如此，鉴于其优异性，光伏电池必将受到重视。

本章首先基于 PV 的数学模型，在 Simulink 中构建 PV 发电系统，建立了面向负荷建模的 PV 模型，并对适合于用作 PV 这种分布式电源的逆变并网控制进行了详细的阐述；经过对 PV 工作原理、控制方式和运行特性的研究，提出可以利用恒功率的拟负荷外特性等效描述模型来等效 PV 发电系统，进而指出在负荷建模的研究中可以将 PV 发电系统看做功率消耗为负的恒功率广义静态负荷；将系统故障，电压下降 20%，持续 0.1s 恢复为例，验证了模型的自描述能力，得出本文提出的等效模型的自描述能力较好。含有蓄电池模块并考虑了 MPPT 和 DC/DC 变换控制之后的 PV 发电系统可以看作一个功率消耗为负的静态恒功率负荷。除此之外，本章还对光伏电池存在的特殊问题——“孤岛效应”进行了一定的分析，总结了检测孤岛效应的方法，选择合适的方法并将其实践是下一步工作的内容。

## 结论

### 本文的主要研究内容和成果

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。随着我国主要电网全国性互联进程的推进和大受端系统的形成,我国电网的复杂程度增加,电网规模不断扩大,电网的稳定性等安全问题更加突出,负荷模型对系统计算结果的影响已愈益不容忽视,由于电力负荷具有地域分散、结构复杂、随机时变和非线性等特点,负荷建模是世界性难题,其研究具有重要的理论意义。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,将成为未来大型电网的有力补充,是未来电力系统的发展趋势之一。随着分布式电源容量的增加,分布式电源对电网负荷模型产生的影响越来越大,传统的负荷模型将不能描述电网综合负荷,所以研究含有分布式电源的负荷模型成为热点。本文分析了负荷模型的理论方法和分布式发电技术,燃料电池和光伏发电的数学模型,对燃料电池和光伏发电接入配电网之后对负荷模型的影响这一课题进行了研究。

在研究燃料电池发电原理的基础上,以 SOFC 的数学模型为代表,在 Matlab/Simulink 中搭建 SOFC 的模型,研究 SOFC 自身机理特性和运行控制方式,基于 Matlab/Simulink 工具箱构建了适合作为分布式电源的燃料电池发电系统和光伏电池发电系统,并进行了一系列稳态和暂态仿真计算。提出能准确模拟 SOFC 发电系统外特性并满足电网计算要求的 SOFC 发电系统机电暂态仿真模型,该模型的数学模型以 PCC 点电压和电网频率为激励,以 SOFC 发电系统向电网注入的  $d$ 、 $q$  轴电流为状态变量的二阶微分—代数方程组,在不同的扰动下,对 SOFC 发电系统进行一系列的数字仿真,得到大量的建模样本,采用综合改进的遗传算法对模型进行辨识建模,获得等效模型参数。对模型的描述能力(内插、外推)进行检验,并研究了模型在不同控制策略、不同控制参数下的适用性,表明模型具有较好的描述能力和泛化能力且模型对控制策略和控制参数的适应能力都很强。本文还研究了光伏电池的发电原理,对其数学模型进行了详细描述,选择适合光伏电池的逆变控制方法。PV 作为典型的直流分布式电源,通过 MPPT 跟踪控制、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;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。

本文对光伏电池和燃料电池的特性进行了一定分析,发现电压跌落程度和电压跌落持续时间对暂态后电压、有功和无功的恢复过程都有影响。并分析了光伏电池和燃料电池建立稳态的时间和受干扰的能力,从分析可以看出,SOFC 建立稳态所需的时间比 PV 要短,SOFC 承受电压扰动的能力比 PV 强,即 SOFC 的稳定性比 PV 强。

## 后续工作展望

不同类型的分布式电源因各自的工作原理不同,具有不同的运行特性和控制方式,它们之间将会产生相互作用从而相互影响,这种相互作用和相互影响的大小与电源点之间的物理位置、容量比例、气候条件、负荷水平以及所受到的外部扰动条件有关,相互关系十分复杂。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,很难利用某一种模型结构来描述不同影响因素组合下的综合负荷特性;另一方面,相同的模型结构对于不同影响因素组合下的综合负荷特性的描述能力也具有差异性,而且这种差异性存在很大的不确定性。

所以,对于燃料电池的下一步研究工作重点将在进一步完善 FC 发电系统等效模型的基础上,考虑配网侧的综合负荷,研究燃料电池发电系统对配电网侧负荷建模的影响,研究含 FC 发电系统的配电网广义综合负荷模型结构及其总体辨识建模,研究 FC 接入不同的地理位置、不同的容量比例的时候对配网侧综合负荷的影响。对于光伏电池,要进一步验证“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”这个结论的合理性。然后考虑光照强度和温度等环境因素对光伏电池发电系统的影响,研究光伏发电系统对配电网侧负荷建模的影响,研究含光伏发电系统的配电网广义综合负荷模型结构及其总体辨识建模,研究光伏发电系统接入不同的地理位置、不同的容量比例的时候对配网侧综合负荷的影响。

220kV 及以上电压等级主网仿真时,所需要的不是分布式电源的个别特性描述,而是它们的综合等效描述描述,即电网的综合负荷模型。接入配网侧的分布式电源的容量比例、物理位置、运行方式乃至气候条件和负荷水平等都是影响其综合特性的主要因素,它们既有各自的随机不确定性,也有综合等效的统计规律性。应当在研究其统计规律性的基础上建立具有准确描述能力的“综合分布式发电模型”。所以,工作的最终目的是将所有的分布式电源进行综合等效,提出等效的模型描述,建立具有准确描述含有分布式电源配电网综合负荷的“负荷动特性+负荷静特性+综合分布式发电”特性结构的机理类综合负荷特性模型,进而提出综合客观的性能评价原则、指标与方法,进行模型的综合性能评价,形成实用化的、适应于含有分布式电源配电网的综合负荷建模的系统理论与方法。

## 参考文献

- [1] 刘杨华, 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
- [2] 王燕, 谢志远, 聂恩旺. 分布式发电及其并网逆变器拓扑结构的发展现状. 中国电力教育(研究综述与技术论坛专刊), 2006(S1): 205-207
- [3] 盛鸥, 孔力, 齐智平, 等. 新型电网—微电网 (Microgrid) 研究综述. 继电器, 2007, 35(12): 75-81
- [4] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响. 继电器, 2007, 35(13): 25-29
- [5] 王吉利. 分布式发电对区域负荷建模的影响: [华北电力大学硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2006, 2-10
- [6] 陈勇. 增强电力系统抗灾能力, 发展分布式电源和微电网. <http://www.cas.cn/html/Dir/2008/04/02/15/66/86.htm>
- [7] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评. 中国电机工程学报, 2009 Vol. 29(34): 1-8
- [8] 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): 100-106
- [9] 殷桂, 杨丽君, 王珺. 分布式发电技术. 北京: 机械工业出版社, 2008, 5-45
- [10] Scott N C, Atkinson D J, Morrell J E. Use of load control to regulate voltage on distribution networks with embedded generation. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 510-515
- [11] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40
- [12] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60
- [13] Ackerman T, Anderson G, Seder L. Distributed generation: A Definition Electric Power System Research, 2001, 57(6): 195-204
- [14] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4
- [15] Matos M A, Hatziaargriou N D, Pecas Lopes J A, et al. Multicontingency steady state security evaluation using fuzzy clustering techniques. Power Systems, IEEE Transactions on, 2002, 8 (6): 177-183
- [16] Price, W.W, Wirgau K.A. Load modeling for power flow and transient stability

- computer studies. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 3(1): 180-187
- [17] 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
- [18] Righter R W. Pioneering in wind energy: The California experience. Renewable Energy, 1996, 9 (1-4): 781-784
- [19] Ackermann T. Wind Power in Power Systems. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005, 745-746
- [20] Dolezal J, Santarius P, Tlustý J, et al. The effect of dispersed generation on power quality in distribution system. In: Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/IEEE PES International Symposium. Canada: 2003, 204-207
- [21] Dugan R C, McDermott T E. Operating conflicts for distributed generation on distribution systems. In: Rural Electric Power Conference. Arkansas: 2001, 1-6
- [22] YU Jing, ZHOU Jian-zhong, YANG Jun-jie, et al. Agent-based retail electricity market: Modeling and Analysis. In: Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Shanghai: 2004, 95-100
- [23] Zhu Y, Tomsovic K. Development of models for analyzing the load-following performance of micriturbines and fuel cells. Electric Power Systems Research, 2002, 62 (1): 1-11
- [24] Y. H. Li, S. S. Choi and S. Rajakaruna. An Analysis of the Control and Operation of a Solid Oxide Fuel-Cell Power Plant in an Isolated System. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 20, NO. 2, JUNE 2005
- [25] Cai sheng Wang, and M. Hashem Nehrir. A Physically Based Dynamic Model for Solid Oxide Fuel Cells. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 4, DECEMBER 2007
- [26] J. Padulles, G. W. Ault, J. R. McDonald. An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation. Journal of Power Source, 86(2000): 495-500
- [27] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响. 电力系统自动化, 2001, 53-56
- [28] 戴训江, 晁勤. 光伏并网逆变器自适应电流滞环跟踪控制的研究. 电力系统保护与控制. 2010, 38(4), 25-30



- [29] Hatziadoniu 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
- [30] US Department of Energy. *Fuel Cell Handbook*. Morgantown: EGG Services Parsons Inc, 2000, 3-24
- [31] 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
- [32] Hatziadoniu 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
- [33] ZHU Y, TOMSOVIC K. Development of models for analyzing the load-following of microturbines and fuel cells. *Journal of Electric Power Systems Research*, 2002, 62(1): 1-11
- [34] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与实践. *电力系统自动化*, 1999, 23(19): 1-7
- [35] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论与应用. 北京: 科学出版社, 2002, 70-253
- [36] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化. 北京: 清华大学出版社, 2004, 85-125
- [37] 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
- [38] 章健. 电力系统负荷模型与辨识. 北京: 中国电力出版社, 2007, 25-144
- [39] 金群. 负荷模型辨识算法与模型结构研究: [湖南大学硕士学位论文]. 湖南长沙: 湖南大学, 2006, 28-35
- [40] 李欣然, 贺仁睦, 章健, 等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据. *中国电机工程学报*, 1999, 19(4): 26-30
- [41] 段献忠, 包黎昕. 电力系统电压稳定性分析和动态负荷建模. *电力系统自动化*, 1999, 23(19): 25-28
- [42] 李欣然, 陈元新, 蒋铁铮, 等. 电压稳定研究中的负荷模型及其建模方法. *电力系统及其自动化学报*, 2000, 12(6): 9-13
- [43] 包丹. 感应电动机负荷电压稳定性的研究与仿真. *东北电力技术*, 2000, (1): 1-4
- [44] D. J. Hill. Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies. *IEEE Trans on PWRs*, 1993, 8(1): 166-176
- [45] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Standard load model for power flow and dynamic performance analysis. *IEEE Trans on*

- Power Systems, 1993, 8(2): 472-482
- [46] Lalouni S, Rekioua D. Modeling and simulation of a photovoltaic system using fuzzy logic controller. In: Second International Conference on Development in eSystems Engineering. Dhahi, 2009, 23-28
- [47] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4
- [48] Koutroulis E, Kalaitzakis K, Voulgaris N C. Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system. IEEE Transaction on Power Electronics, 2001, 16(1): 46-54
- [49] 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 modelation scheme. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51 (2): 410-418
- [50] 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
- [51] 李安定. 太阳能光伏发电系统工程. 北京: 北京工业大学出版社, 2001
- [52] 郑诗程, 丁明, 苏建徽, 等. 光伏发电系统及其孤岛效应的仿真与实验研究. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 3085-3088
- [53] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究. [合肥工业大学博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学电气与信息工程学院, 2003, 15-20
- [54] 廖志凌, 阮新波. 一种独立光伏发电系统双向变换器的控制策略. 电工技术学报, 2008, 23(1): 97-103
- [55] Koutroulis E, Kalaitzakis K, Voulgaris N C. Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system. IEEE Transaction on Power Electronics, 2001, 16(1): 46-54
- [56] 粟秋平, 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
- [57] 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
- [58] Shmilovitz D. On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2005, 152(2): 239-248
- [59] 黄瑶, 黄洪全. 电导增量法实现光伏电池发电系统的最大功率点跟踪控制. 现代电子技术, 2008, 22: 18-19
- [60] 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

- [61] 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
- [62] 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
- [63] 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
- [64] 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

## 致谢

从课题的选题、研究到本论文的撰写，我尊敬的导师李欣然教授对我进行了悉心指导，论文的字里行间无不浸透着导师的心血和汗水。三年来，无论是在从学业上，还是在做人做事上，导师及师母何青老师的关怀和教诲使我终生受益。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。借此论文完成之际，向我的恩师李欣然教授和师母何青老师表达我最诚挚的敬意和最衷心的感谢。

研究生的学习生涯即将结束，在三年的科研学习中，遇到很多的挫折和坎坷，使我认识到在攀登科学高峰的道路上永远没有坦途，有的只是充满荆棘的崎岖山路，这三年的学习生活正如同这崎岖山路，虽然有许多的艰辛，但同时也充满了欢乐，因为我有一个充满激情、和蔼又不失严肃的导师，有一个团结向上的学术团队，感谢这个大家庭给了我一个良好的学习氛围。

首先我要感谢李欣然老师三年来对我的辛勤指导，让我学会了严肃认真地对待科研。在李老师的指导下，我不仅发表了学术论文，更为重要的是我学到了科研的方法。当我在科研学习中遇到的问题和困难时，李培强老师，实验室的师兄等给予了无私和热心的帮助，使我能够尽快的克服困难，少走很多弯路。其次，我要感谢我的父母，他们不仅在物质上支持我，更在精神上激励我，使我能够坚持不懈的完成我的三年学业，取得今天的的成绩。再次，还要感谢我的同窗好友马亚辉，张永旺，毕正军，郝元钊，孙谦，三年的研究生生活我们一起走过，在学习上互相讨论，在生活上互相帮助，使我度过了快乐而充实的三年时光。最后我要感谢我们实验室的李小菊等师妹师弟，谢谢他们的帮助，使我顺利的完成我的硕士论文，能够顺利毕业。我还要感谢所有关心支持我的朋友和同学。

在千年学府文化的熏陶中，我三年的硕士学习生涯张弛有度、苦乐相依、收获颇丰，我拥有一个充实而快乐的三年生活。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，我将以此作为一个新的起点，继续前行，在新的工作岗位上不断地努力，为母校增光彩。

本文得到国家自然科学基金和湖南省自然科学基金的资助，在此致以诚挚的感谢。

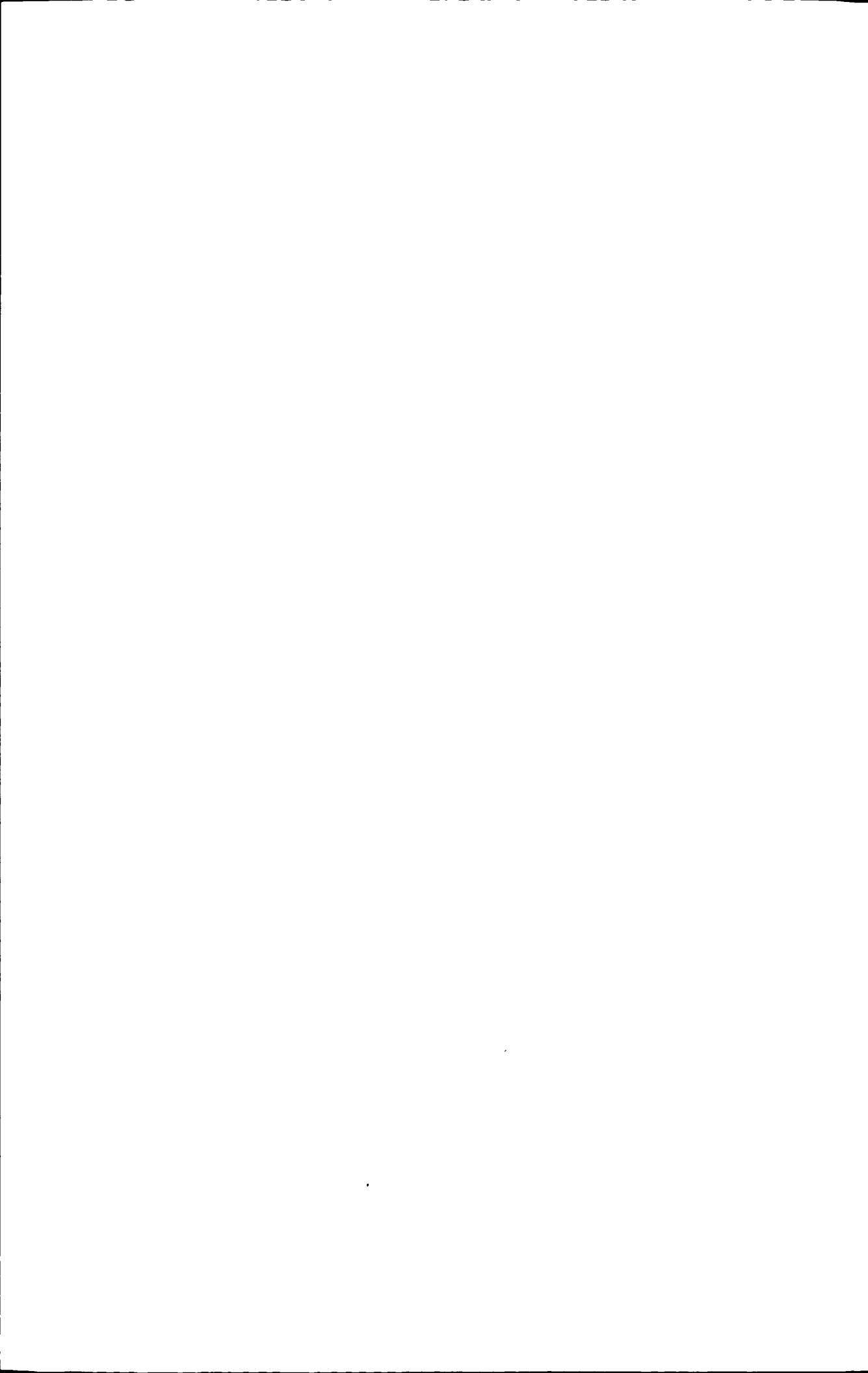
王玲

2011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目录

- [1] 王玲, 李欣然, 马亚辉, 等. 燃料电池发电系统的机电暂态等效模型. 中国电机工程学报, 已录用, 发表时间未定; 录稿时间: 2009年4月13日
- [2] 王玲, 李欣然, 马亚辉, 等. 光伏电池和燃料电池建模及其在负荷建模中的等效描述. 中国高等学校电力系统及其自动化26届年会论文集, 125
- [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)
- [4] 马亚辉, 李欣然, 王玲, 等. 微型燃气轮机发电系统及其在负荷建模中的等效描述. 中国高等学校电力系统及其自动化26届年会论文集, 124
- [5] 毕正军, 李欣然, 王玲, 等. 风力发电在不同运行方式下对配网综合负荷特性影响. 中国高等学校电力系统及其自动化26届年会论文集, 125
- [6] 毕正军, 李欣然, 王玲, 郝元钊. 考虑风力发电影响的综合负荷特性及其等效描述. 电力系统及其自动化学报, 已录用, 录稿时间: 2011年3月2日
- [7] 钱军, 李欣然, 马亚辉, 王玲. 面向负荷建模的微型燃气轮机建模及其等效描述. 电力系统及其自动化, 2010,34(19): 81-85



## 附录 B 攻读学位期间所参加的科研项目

- [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》
- [2] 郴州市桂阳县电力局资助项目《郴州市桂阳县电网规划 2009-2030》



