
华北电力大学

硕士学位论文

微电网建模与仿真研究

The Microgrid Modeling and Simulation Studies

杭少松

2014 年 3 月

国内图书分类号：TK11+2
国际图书分类号：621.5

学校代码：10079
密级：公开

硕士学位论文

微电网建模与仿真研究

硕士研究生：杭少松

导师：林永君教授

申请学位：工学硕士

学科：控制科学与工程

专业：检测技术与自动化装置

所在学院：控制与计算机工程学院

答辩日期：2014年3月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TK11+2

U.D.C: 621.5

Thesis for the Master Degree
The Microgrid Modeling and Simulation Studies

Candidate:	Hang Shaosong
Supervisor:	Prof. Lin Yongjun
School:	School of Control and Computer Engineering
Date of Defence:	March, 2014
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《微电网建模与仿真研究》是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《微电网建模与仿真研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以下相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

在当今能源问题日趋严重的情况下，采用可再生能源的分布式发电技术成为未来能源发展的主要方向，但是由于分布式发电技术具有电压和频率不稳定的特点，易对大电网造成严重冲击，因此电网采用限制分布式发电并网的管理方式。这就造成了分布式发电商业化程度较低的结果，大大限制了该项技术的发展，阻碍了其形成规模化运行的进程。微电网技术的提出，能够大大改善分布式发电技术的现状，稳定其输出电能的频率和电压，减小对大电网的冲击；此外微电网也能在孤网运行方式下运行，在大电网故障时保证内部基本负载的电能供应，在充分利用可再生能源的同时增加供电可靠性。

微电网是由分布式电源和电力负荷构成，可以在并网与孤岛两种工作模式下运行，同时具有高度可靠性和稳定性。随着电力电子接口和现代控制理论的发展，微电网将额定功率几十千瓦的发电单元作为微电源与负荷、储能装置及控制装置等结合，成为单一可控的单元，同时向用户供给电能。大规模分布式能源可以通过基于微电网结构的电网并接入中低压配电系统，是一种解决分布式能源并网的有效方案。

本文借助 Matlab/Simulink 仿真软件，建立了各种元件的模型，仿真了微电网并网和孤网运行两种运行方式，在孤网运行部分的仿真中，加入了电源电压跌落工况的仿真。

仿真结果表明，在并网运行方式下采用电流双环控制，以及在孤网运行方式下采用 U/f 控制方式的策略，能够使微网运行良好，保证负载供电。

关键词：分布式发电；微电网；Matlab 建模与仿真

Abstract

Nowadays with the worse problems of energy shortage, Distributed Generation(DG) will be important energy technology in the future that use renewable resource. The Main Power Grid always adopts restraint distributed generation accessing because it owns the feature of unstable voltage and frequency that easily impacts the Main Power Grid. It leads to DG be in elementary degree of commercialization, thus restricts its development and process of conformation large-scale. It will improve greatly the present situation of DG to Micro-grid proposed. Micro-grid could stabilize frequency and voltage that DG exports and decrease the impact to Main Power Grid. Apart from this, micro-grid could run on island mode while the Main Power Grid is existing fault. It could ensure power supply of basic load in microgrid system. So micro-grid could plenty use renewable energy and increase the reliability of electricity supply.

Microgrid system consists of distributed generated and load, and it possesses favorable reliability and stability. Micro-grid could run in connecting operation mode and island operation mode. With the development of power electronic interface and modern control theory, micro-grid combines micro-power that rated power is several tens of kilowatt with load, energy storage devices and control devices as a single controllable unit while supply users with power electric. Micro-grid is an effective solution to make DG connecting grid, which links large-scale DG and medium-low voltage grid.

In this paper, with the help of Matlab/Simulink simulation software, the establishment of the various components of the model, simulation of micro-power grid and isolated operation of two operation modes, isolated operation part of the simulation, and the simulation of the supply voltage drop conditions.

Simulation results show that applying the current double-loop control in connecting operation mode, as well as in isolated operation mode using U/f control mode strategy, the micro-grid was running well to ensure that the load is powered.

Keywords: Distributed generation; Microgrid; Matlab modeling

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 分布式发电概况.....	1
1.1.1 分布式发电的概念.....	1
1.1.2 分布式发电技术	1
1.1.3 分布式发电的研究与发展	3
1.1.4 分布式发电的意义.....	3
1.2 本章小结	3
第 2 章 微电网技术	4
2.1 微电网的概念	4
2.2 微电网国内外研究现状	5
2.2.1 美国微电网的研究现状.....	5
2.2.2 日本的微电网研究现状.....	6
2.2.3 欧盟的微电网研究现状.....	7
2.2.4 我国的微电网研究现状.....	8
2.3 微电网的基本结构	8
2.4 微电网电源部分	9
2.4.1 风力发电机	9
2.4.2 微型燃气轮机.....	10
2.4.3 燃料电池	11
2.4.4 太阳能光伏发电.....	12
2.5 电力电子部分	12
2.5.1 锁相环（PLL）	13
2.5.2 逆变器	13
2.6 储能部分	14
2.7 本章小结	15
第 3 章 微电网建模	16
3.1 光伏电池的建模.....	16
3.1.1 光伏电池的电压电流特性	16

3.1.2 光伏电池的温度和光照特性.....	17
3.1.3 光伏电池的数学模型	17
3.1.4 光伏电池最大功率跟踪数学模型	19
3.1.5 光伏阵列的 Matlab 仿真模型	19
3.1.6 光伏电池输出特性仿真.....	22
3.2 风力发电机的建模	23
3.2.1 双馈风力发电机的运行原理和特性	23
3.2.2 双馈风力发电机的数学模型.....	25
3.2.3 双馈风力发电机的 Matlab 仿真模型	27
3.4 本章小结	30
第 4 章 微电网模型仿真研究	31
4.1 微电网并网运行控制仿真算例	31
4.2 微电网孤网运行控制仿真算例	33
4.3 本章小结	36
第 5 章 总结与展望.....	37
5.1 总结	37
5.2 展望	37
参考文献	39
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	42
致谢	43

第 1 章 绪 论

1.1 分布式发电概况

1.1.1 分布式发电的概念

近些年，以电力为中心的新一轮能源革命的序幕已经拉开，其目的是实现以智能电网为核心的低碳能源^[1]。在此背景下，电网的形态和功能定位正在发生深刻的变化，电网的发展面临着前所未有的机遇与挑战：能源与环境问题、安全可靠性与经济高效问题、电网开发与优质服务问题、技术创新与高效管理问题等。面对新形势、新挑战，必须大力开发低碳技术、推广高效节能技术、积极发展新能源和可再生能源，从而加强智能电网建设^[2]。

目前，对“分布式发电”这一新的发电形式的正式称谓还不统一。在英属国家里，习惯叫做“嵌入式发电”(Embedded Generation)；在北美，叫做“分散式发电”(Dispersed Generation)；在欧洲和亚洲的部分国家，叫做“非集中式发电”(Decentralized Generation)。另外，“分布式发电”的定义也尚未得到统一。一般认为：分布式发电(Distribute Generation, DG)指的是为满足用户特定的需要、支持现存配电网的经济运行或同时满足这两方面的要求，且在用户现场或靠近用户现场配置功率为数千瓦到 50MW 的小型、与环境兼容的发电系统。现在新出现的很多分布式发电大部分采用的是天然气、沼气、太阳能、生物质能、风能(小风电)或者水能(小水电)，通常采用热电联产或者热冷电联产的方式^[3-5]。

1.1.2 分布式发电技术

分布式发电技术主要包括光伏发电技术、风力发电技术、燃料电池发电技术、燃汽轮机/微型燃汽轮机/内燃机发电技术、生物质能发电技术以及分布式发电的储能技术等^[6]。

(1) 光伏发电技术

光伏发电技术是一种将太阳辐射能通过光伏效应、经光伏电池直接转换为电能的发电技术，它向负载直接提供直流电或经逆变器将直流电转换为交流电。光伏发电系统的建设成本至今仍很高，发电效率也有待提高^[7]。目前商业化单晶硅和多晶硅的电池效率为 13%到 17%，影响光伏发电技术的大规模应用。但由于光伏发电是在白天发电，与负荷的最大电力需求有很好的相关性，今后必将获得大量应用。目

前用于发电系统的光伏发电技术多为小规模、分散式独立发电系统或中小规模并网光伏发电系统，基本属于分布式发电的范畴^[8]。

(2) 风力发电技术

风力发电技术是一种将风能通过风力发电机转换为电能的发电技术。我国自 20 世纪 50 年代开始发展风力发电，最初是用于农村和牧区的家庭自用小风力发电机，之后在新疆、内蒙古、吉林、辽宁等地建立了一些容量在 10KW 以下的小型风电场，还在西藏、青藏等地建立了一些由小型风力发电、光伏发电和柴油机发电共同构成的联合发电系统^[9-10]。在国外，也有些在城市郊区建设少量大单机容量(1MW 以上)的风力发电机组，并入低压配电网。这些靠近负荷的小型风电场属于分布式发电的范畴。

(3) 燃料电池发电技术

燃料电池是一种电化学设备，它直接、高效地将反应物的化学能转换为电能。目前燃料电池在技术上尚未完全过关，电池寿命有限，材料价格也比较高。尽管国外已有各种类型和容量的商品燃料电池可供选择，但目前在国内基本上处于实验阶段，尚无大规模的国产化、商业化产品可用。燃料电池发电技术在电动汽车等领域广泛应用，这种静止型发电技术的发电效率与容量大小几乎无关，因此在小规模分布式发电的应用中有一定的优势，是一种很有前途的分布式发电技术^[11]。

(4) 燃气轮机/内燃机/微型燃气轮机发电技术

燃气轮机/内燃机/微型燃气轮机发电技术是以天然气、煤层气或沼气等为常用燃料，以燃气轮机、内燃机、微型燃气轮机为发电动力。目前，内燃机发电技术已广泛应用在燃气、电力、供水、制造、医院、教育以及通信等行业。微型燃气轮机是指发电功率在几百千瓦以内(通常为 200KW 以下)，以天然气、甲烷、汽油、柴油为燃料的小功率燃气轮机。微型燃气轮机可长时间工作，且仅需很少的维护量，可满足用户基本负荷的要求^[12-14]。另外，微型燃气轮机体积小、重量轻、结构简单、安装方便、发电效率高、燃料适应性强、燃料消耗率低、噪音低、振动小、环保性好、使用灵活、启动快、运行维护简单。基于以上这些优势，微型燃气轮机正在得到越来越多的应用，特别适合于微电网。

(5) 生物质能发电技术

生物质能(Bio-Energy)是太阳能以化学能形式储存在生物质体内的一种能量形式，它以生物质为载体，直接或间接地源于植物的光合作用。生物质能发电技术主要包括生物质直接燃烧发电、气化发电、沼气发电、垃圾焚烧发电、混合燃烧发电的技术和生物质能电池等^[15-16]。我国《可再生能源法》的颁布促进了各种生物质发电的发展，大量的小型生物质能电厂在农村和中小城市接连投运。

(6) 储能技术

分布式发电并网运行时，一般不需要储能系统，但在孤岛运行时，为保持小型供电系统的频率和电压稳定，储能系统往往是必不可少的。分布式发电的储能技术主要包括蓄电池储能、飞轮储能、超级电容储能、压缩空气储能和抽水蓄能等^[17-18]。

1.1.3 分布式发电的研究与发展

近年来，我国分布式发电工程项目发展较快，但相关技术的研究和开发显得有些滞后，因此应加大研发力度，研制出具有我国自主知识产权的产品和系统，并降低它们的成本。未来对于分布式发电的研究重点集中在以下几个方面：分布式发电系统的数学模型和仿真技术研究、规划研究、控制和保护技术研究、电力电子技术研究、分布式电源并网规程的研究与制定等^[19-20]。

随着分布式发电技术水平的不断提高，分布式发电的成本将会不断降低，应用范围也将不断扩大，可以覆盖到包括工业区、农业区、学校、楼宇等多种场所。目前分布式发电在我国应用较少，但可以预计未来分布式电源不仅可以作为集中式发电的一种重要补充，而且将在能源综合利用上占有十分重要的地位^[21]。

1.1.4 分布式发电的意义

分布式发电技术的发展不仅能减少能源短缺，降低环境污染，还能提高现有电力系统的效率、可靠性和电能质量，并拥有减轻系统约束和减少输电成本的潜力。合理的选择分布式电源的位置和容量，可以有效地改善末端负荷点的电压，提高电能质量^[22]。而在夏天和冬天的负荷高峰期，大量分布式电源的使用，可以起到调峰的作用，例如使用冷热电联供技术，可以在供冷或供热的同时提供额外电力，满足负荷需求。一些边远的地方采用独立的发电供电方式，减小了输电成本等。

因此，可以预见分布式发电在克服了自身的技术阻碍以及成本问题后，在不远的将来，必将与常规集中式发电构成未来世界两种相辅相成的发电方式，并在电力系统中占据重要的地位。

1.2 本章小结

本章主要讲述了本论文的选题背景，介绍了分布式发电的概念及其技术。同时阐述了分布式发电的发展前景及意义，为下文的微电网技术做了铺垫。

第2章 微电网技术

2.1 微电网的概念

随着分布式发电渗透率的增加,其本身存在的问题也显现出来,分布式电源单机接入成本高、控制困难。一方面,分布式电源相对大电网来说是一个不可控源,因此大系统往往采取限制、隔离的方式来处置分布式电源,以期减小其对大电网的冲击。另一方面,目前配电系统所具有的无源辐射状运行结构以及能量流动的单向、单路径特征,使得分布式发电必须以负荷形式并入和运行,即发电量必须小于安装地用户负荷,导致分布式发电能力在结构上就受到极大的限制^[23-24]。

随着新型技术的应用,尤其是电力电子接口和现代控制理论的发展,微电网概念出现了。从系统的观点看,微电网是将分布式发电、负荷、储能装置及控制装置结合,形成一个单一可控的独立供电系统,同时向用户供给电能和热能,也可以看成是管理局部能量关系的基于分布式发电装置的小电网^[25]。基于微电网结构的电网调整能够方便大规模的分布式能源互联并接入中低压配电系统,提供了一种充分利用分布式能源发电单元的机制。

在不改变现有配电网结构的前提下,为了削弱分布式电源对其的冲击和负面影响,美国电力可靠性技术解决方案协会(The Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS)提出了一种能更好地发挥分布式发电潜能的一种组织形式—微电网(Micro Grid)^[26]。相应地把微电网中的分布式电源叫做微型电源(Micro Source),简称微源(MS)。微电网是规模较小的分散的独立系统,它采用了大量的现代电力技术,将燃气轮机、风电、光伏发电,燃料电池,储能设备等并在一起,直接接在用户侧。对于大电网来说,微电网可被视为电网中的一个可控单元,它可以在数秒钟内动作以满足外部输配电网的需求;对用户来说,微电网可以满足他们特定的需求,如增加本地可靠性、降低馈线损耗、保持本地电压稳定、通过利用余热提高能量利用的效率及提供不间断电源等。微电网和大电网通过 PCC 进行能量交换,双方互为备用,从而提高了供电的可靠性^[27-28]。

微电网解决了 DERS 并网的问题,并且由于所采用的先进的电力电子技术是灵活可控的,因此微电网可以利用 DERS 对微电网的潮流流动进行有效调节。概括起来微电网主要有以下几个优点^[29-32]:

- 1) 微电网提供了一个有效集成应用 DG 的方式,继承拥有了所有单独 DG 系统所具有的优点。
- 2) 微电网作为一个独立的整体模块,不会对大电网产生不利影响,不需要对大电网的运行策略进行修改。

- 3) 微电网可以以灵活的方式将 DG 接入或断开, 即 DG 具有“即插即用”(plug-and-play) 的能力。
- 4) DG 并网的许多问题都是由 DG 响应速度慢、惯性小的特点引起的, 多个 DG 联网的微电网增加了系统容量, 并有相应的储能系统(蓄电池储能系统、飞轮储能系统等), 使系统惯性增大, 减弱电压波动和电压闪变现象, 改善电能质量。
- 5) 微电网在上级网络发生故障时可以孤立运行继续保障供电, 提高供电可靠性。微电网作为对单一大电网的有益补充, 其广泛应用的潜力巨大。目前, 世界上一些主要发达国家和地区, 如美国、欧盟、日本和加拿大等, 都开展了对微电网的研究。

2.2 微电网国内外研究现状

美国、欧洲、日本等国家和地区在完善了微网相关基础理论的研究后, 建立了分布式能源及其微网的模型和仿真分析工具的开发, 在此基础上对微网控制策略、保护问题和通信协议进行了研究, 而且在实验室和实际工程现场进行验证, 完成了对理论问题的研究^[33]。在未来一段时期, 研究方向是关于微网的高级控制策略及多个微网同配电管理系统的相互作用的问题, 并且对微网控制策略进行标准化设计, 实现现场实验以进一步验证控制策略在实际微网中的运行效果, 并对微网技术对大电网造成的影响进行详细评估等。当前我国对微网技术的研究跟发达国家地区有显著的差距, 尚在起步阶段。

2.2.1 美国微电网的研究现状

在美国电力可靠性技术解决方案协会(CERTS)的微网概念报告中, 阐述了微网的主要思想以及关键性技术问题, 并且介绍了微网系统中的两个关键部分: 具有自我调节能力的微型电源和静态开关。该报告涉及微网机构、运行控制和保护及其经济型评价等微网技术方面的问题^[34-36]。美国一家名叫 Walnut 的电力公司已经在其实验基地内验证了 CERTS 所提出的微网相关理论。美国的微网工程最成功的范例是曼德瑞沃(Mad River)微网, 该工程成功验证了关于微网的建模、运行控制和保护及经济效益等相关技术问题, 并且尝试制定微网运行调度规定。一份规划了未来数十年分布式能源以微网的形式形成规模性建设的文件由美国能源部(DOE)制定出台, 微网技术在未来的发展情况在该文件中有详细的规划。在美国北面的加拿大, BC 和 Quebec 两家水电方面的公司建设了示范性微网, 其主要成果是实现了微网主动孤岛检测方面的功能, 该项目下一阶段的目标是研究如何通过合理规划独立发电装置(Independent Power Producer, IPP)的安装以达到提高供电系统可靠性的目的。

美国国内对微网研究热潮是在 2003 年开始的,研究的资金主要来源于美国能源部和加州能源委员会。在美国所有研究微网的科学机构中,最著名的要数编写出《微网概念》的美国电力可靠性技术解决方案协会(CERTS)^[37-38]。该概念已经在威斯康星大学实验室进行了测试,结果证明该概念的准确可行。为了进一步验证概念的合理性和准确性,CERTS 于 2006 年 11 月开始进行微网的示范工程,在美国电力公司的多兰技术中心搭建微网实验平台。

2.2.2 日本的微电网研究现状

因为日本国内资源日益缺乏、负荷需求增长迅速等一系的列现实原因,因此日本在 21 世纪初开始微网的研究。日本政府一直重视可再生能源和清洁能源在其国内的研究和发展,所以日本国内建设了许多微网的示范性工程,其中新能源产业技术综合开发机构(NEDO)提供了主要的技术支持^[39]。网架拓扑结构和微网的集成控制是日本微网研究的重点,此外还重视电源高效热电联供能力的开发,这些都是进一步深入研究分布式电源独立供电的基础,为该技术应用工程实践提供了广阔空间。

从 2003 年 NEDO 开始在日本各地建设微网示范性工程,这些项目统统属于日本政府推动的增加可再生能源比重的地区配电项目。青森县八户市的微网工程中,电源部分全部使用可再生能源,利用太阳能和风能提供电能,将生物质能开发成热电联产的电源。具体电源构成为 3 台 170kW 的生物质燃气发电机,蓄电池组容量为 100kW,光伏发电 80kW,风力发电 20kW,共 710kW。负荷包括:市政厅 360kW,四所中小学 205kW,八户市供水管理局 38kW,共 603kW。由一个静态开关控制整个配电网络与大电网的通断。在 9 个月的运行期间,由于建立微网使可再生能源利用系数增加,从大电网的购电量减少,CO₂ 排放量也大幅降低。在为期一周的独立运行时间内,系统频率基本维持在(50±0.5)Hz 范围内,较好地实现了系统的稳定运行^[40]。

新能源产业技术综合开发机构(NEDO)于 2006 年在仙台完成了一项示范工程的建设,工程特色是电能质量的可靠性服务,即多种不同类型的电源能够满足不同用户需求。与我国不同,日本微网的研究也吸引了私人企业加入进来,促进了微网技术的推广和应用^[41]。日本微网的研究主要围绕如何在保证传统电网输电安全的情况下将利用新能源发电,并在此过程中保证供电安全性的问题展开^[42]。日本当前在各个领域将强对微网技术的检验,重点是体现该技术在能源方面的清洁性和经济性。尤其在经济评价标准方面,还有许多问题没有得到解决。

2.2.3 欧盟的微电网研究现状

欧洲从 2005 年开始提出了建设“智能电网”的口号，在审慎考虑了当地电力市场特点、供电可靠性和对环境的影响等因素后，于 06 年制定了关于该项计划的各种实现计划书。在该计划中设定了欧洲地区电力网络达到经济运行、可接入、供电可靠以及灵活运行的目标，对未来二十年电网发展具有指导意义。为达成该计划中的目标，需要将分布式发电技术、先进的电力电子技术和合适的控制技术相结合，将微网与集中式供电进行有效的互补，提高发电中清洁能源所占比例，增加供电系统的可靠性^[43-44]。此外，颁布相关政策，鼓励高校与相关企业参与到该计划中，积极探索和实践微网工程，这样就能使电力市场更加丰富，推动电力行业的发展。鉴于微网具有清洁高效，多元化的能量层级，尤其是其智能性的特点，注定要成为欧洲电力系统未来发展的重要部分。

目前，欧盟组织全力支持的微网项目：Microgrids 和 More Microgrids，如今已经完成了微网运行控制策略、保护措施及通信协议等相关基本理论的研究，并且在一些国家建立了规模不同的实验平台。规模最大的实验平台位于德国，是有德国太阳能研究所（ISET）建立的，平台容量为 200KVA，该实验平台安装有自行设计的能量管理系统。未来数年欧盟的研究机构会将主要精力放在采用可再生能源的微网系统的运行控制策略和多微网协调运行的方面，此外该技术的各项技术标准和商业运营规范的制定，运行性能的评估指标的建立也是研究的重要内容，这些工作完成后，将把采用可再生能源的分布式发电系统大规模以微网的形式并入电网，完成把传统电网转化为智能电网的目标。

希腊的 CRES 公司同样建有微网示范性工程，该项目在爱琴海南部的一个叫基斯诺斯的小岛上。小岛人口很少，只有 12 户居民，该项目负责为岛上居民供电。电源部分由光伏电池和柴油发电机组组成，并配有蓄电池组，充当储能设备，来提高供电的稳定性。另外约 2KW 的光伏电池安装在控制系统建筑的楼顶上，通过 SMA 逆变器和 32KW 的蓄电池组为监测和通信提供电源。当蓄电池组处于低电能状态下可以允许信息流向开关负荷控制器；当蓄电池组处于饱和情况下可以限制光伏逆变器功率组的功率输出。

在欧洲还有很多致力于微网研究的公司，且建有许多示范性微网工程，其中 OESTKRAFT、CESI、EDP 和 LABEIN 分别在丹麦、意大利、葡萄牙及西班牙建立了微网实验点。

2.2.4 我国的微电网研究现状

由于微网具有的广阔应用前景，所以当前在我国各个高等学校刮起了微网研究的热潮。目前在我国清华大学、天津大学、中国科学院电工研究所、东南大学、河海大学等单位相继开始了对微网的研究。最早将微网技术引用在工程实际中的清华大学，在与辽宁高科能源集团进行合作的过程中，累积了大量实践经验和实验数据。我国中国科学院电工研究所和天津大学的研究课题都获得了国家科研基金的资助。河海大学和英国格拉斯哥卡里多尼大学共同开展微网的研究^[45]。如今我国对微网的研究取得了一定程度的进展，但与欧美及日本等发达地区由制造厂商、电力公司和研究机构组成的庞大研究团队相比较，国内在研究力量和取得的成就上仍旧与之存在较大的差距，因此有必要加强在微网方面的研究。

2.3 微电网的基本结构

微网具有自己的电源，再加入控制装置，成为独立的系统，可以独立运行或间歇性与大电网并联运行。因此微网系统有很强的独立性，是保证供电安全性的重要保障。

微网通过静态开关与大电网进行连接，二者可以独立运行，也可以并联运行，这样即使在其中一方出现故障时仍旧能够保证电能供应^[46]。下图 2-1 展示了几种分布式电源作为微网电源的形式，其一大特点就是一部分电源能够同时提供电能和热能，这样对能源的利用率就得到显著的提高。

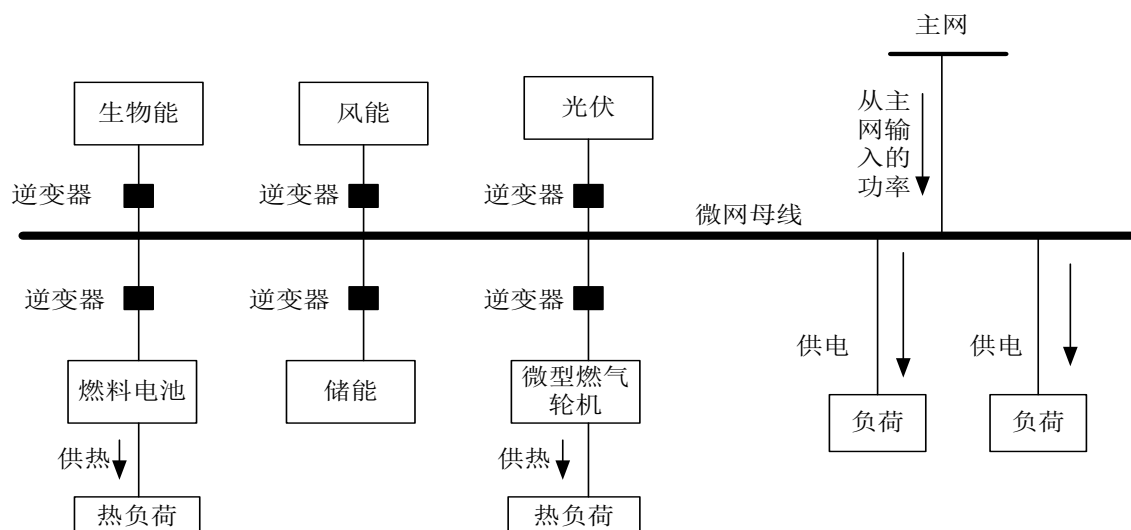


图 2-1 微网基本结构图

微网内的主要构成元件有：各种开关元件、可类型的分布式电源、储能设备和电力电子元件^[47]。

微网中的开关可以分为：用来把微网与大电网切除联系的静态开关和微网内部电源与各元件间的断路器。静态开关，又叫固态转换开关，在大电网存在故障或者扰动时，可以把微网隔离出来，待故障排除后，重新与主电网相连。静态开关安装在用户低压母线上，它的规划设计相当重要，要求具有可靠运行和一定预测性的能力，可以测量静态开关两侧的电压和频率以及通过开关的电流。微网内部故障与否和外部工况的好坏等问题的衡量标准都是以这些测量工作为依据的。而当同步性标准可以接受时，就可以使微网和大电网重新连上。所以静态开关也被归纳入智能控制的水平，将会连续监控耦合点的状态。

比较常见的储能手段有蓄电池储能、蓄电池储能和飞轮储能等。储能设备在微网系统中的主要作用是：当负荷需求远远低于微电源输出功率时，可以将多余能量储存起来，避免浪费；当微型电源发出功率不能满足负荷需求时，可以将存储在设备中的能量以恰当的方式释放出来及时维护系统供需平衡；当微网孤网运行时，储能设备是微网能否正常运行的关键性元件，它可以起到了一次调频的作用。电力电子部分主要有：负责变流、控制输出电能规格的变流器（包括整流器和逆变器），以及辅助设备（包括滤波器和斩波器等）。

2.4 微电网电源部分

在微网系统中的电源部分都是使用可再生能源发电的分布式电源，清洁高效是主要特点。由于电源容量小，也称作微电源。

2.4.1 风力发电机

风力发电是在各种新能源利用过程中最重要的一种形式。世界上第一台风力发电机是有丹麦人发明的，在十九世纪九十年代第一座风力发电站建成，揭开了人类开发风力的序幕。在这之后的一个多世纪中，各种各样的风力发电机陆续问世，深化风能的应用。依据运行方式的不同，风力发电机一般所用的发电机也不同。风力发电机组中采用独立运行方式的机组所用的发电机主要有直流发电机和永磁式交流发电机等。并网运行的风力发电机组中所用的发电机主要有同步发电机、异步发电机、双馈发电机、低速交流发电机等。

风力发电机是由风叶受风力作用带动传送轴转动，经过齿轮箱后提高转速，带动发电机转动，产生的电能通过变流器以适合的电能指标送入电网，这就是风力发电机的工作原理。当今风力发电技术最发达的地区是欧洲，其单机容量达到了6MW，其中3MW以上的风电技术为欧洲所独有的。这与该地区在财政政策上十分支持风力发电技术的使用和推广，截至07年底，欧洲风力发电装机容量占世界75%。

随着电力电子技术和微机控制技术的发展，双馈异步发电机（Doubly-Fed Induction Generator, DFIG）吸引了广泛的注意。因为 DFIG 具有两套绕组如图 2-2 所示，分别在定子和转子上，所以结构上和绕线式异步电机相似。在控制中，DFIG 转子一般由接到电网上的变换器进行交流励磁。但实际运行中发电机的定子和转子都起到了励磁作用，所以叫做双馈风力发电机。

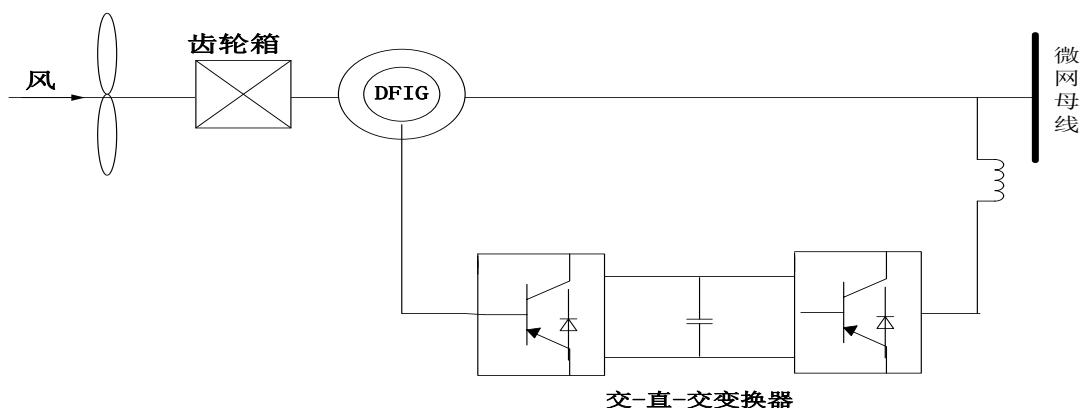


图 2-2 双馈风力发电机示意图

2.4.2 微型燃气轮机

先进的微型燃气轮机（Microturbine Generator）是一种新发展起来的小型热力发动机，由燃气轮机、压气机、燃烧室、回热器、发电机及电力控制部分组成，主要使用的燃料为甲烷、汽油、柴油或天然气。其功率范围在数百千瓦之下，采用回热式循环，发电效率在 30% 左右，如果采用热电联产的方式，效率能够达到 75%。下图 2-3 所展示的就是微型燃气轮机的工作流程：空气先进入压气机进行压缩，之后进入回热器将进行预热，提升空气温度，然后进燃烧室且与燃料充分混合之后进行燃烧，生成的高温气体后送入向心式涡轮进行做功，完成发电的过程。由于发电机发出的是高频交流电，这就需要变流器将电流变为高压直流电，最后变为 380V 的工频交流电。

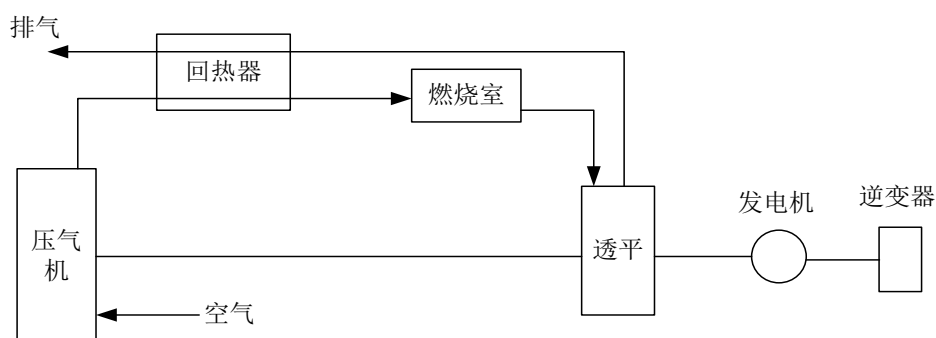


图 2-3 微型燃气轮机示意图

微型燃气轮机的尺寸和重量都很小，便于在各种环境中安装，其对燃料的要求广泛，工作时噪声和震动较小，利用在用户侧广泛使用，不需要冷却水和自诊断的功能使其维护简单，可靠性大大增加。当前该技术应用的主要难题是涡轮入口处高温耐热材料的研制问题，陶瓷成为了微型燃气轮机内部耐热部件主要材料的首选，逐渐得到了广泛的应用。

2.4.3 燃料电池

燃料电池由一个负充电的电极（阳极）、一个正充电的电极（阴极）和一个电解质膜组成。燃料电池能够将化学能直接转换成电能，与普通电池不同的是在普通电池中，用来提供化学能的物质在使用一段时间后，需再次充电才能继续使用，否则需换新的；而只要将“燃料”和氧化剂不断的向电极输送，就可以不间断的得到由化学能转化而来的电能。它像一个发电机，一面不断加入燃料，一面不停发电。燃料电池的整个发电过程是十分清洁的。燃料电池具有比传统的火力发电方式更高的热效率，加之其排放物无污染、燃料的来源途径广泛的优点，被公认为当前第四种可持续发电方式（排在水电、火电和核电之后），具有广阔的应用前景，发展潜力巨大。

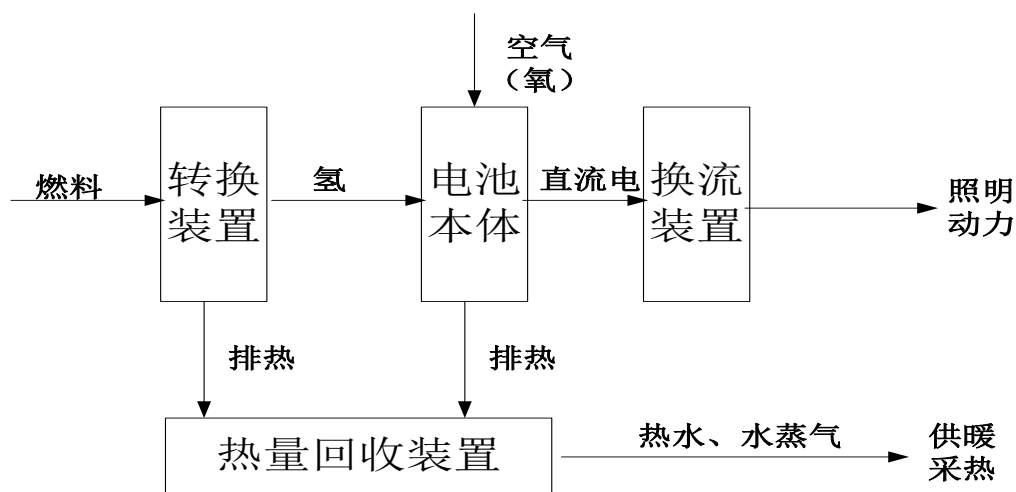


图 2-4 燃料电池发电系统图

氢燃料电池的主要原料是氢气和氧气，如图 4 所示，通过它们之间的化学反应来获得电能。燃料电池具有能量转换效率高，无污染，用水少，占地面积小，建设周期短，燃料多样化，承受负荷变化能力强等诸多优点；其最大的缺点是建设成本太高，当前无法大面积推广。

2.4.4 太阳能光伏发电

太阳能电池是将太阳的辐射能转化为电能的装置，实际太阳能发电系统常常将若干光伏电池进行串、并联，以获得需要的输出电压、输出电流。串连在一起光伏组件各自的电流容量必须相同，这样整个光伏阵列输出的直流电压就是各组件电压输出值的和；而采取并联方式的光伏阵列则要求各组件的输出电压等级相同，整个并联阵列输出的电流值为各组件的输出电流之和。通常情况下光伏电池的串联个数是 36 个或者 40 个，单个输出电压为 0.45V，因此，一般光伏组件的输出电压为 16~18V，如果想要得到更大的输出电压或者电流，则将光伏组件进行合理的串、并联。

太阳能电池的工作方式主要分为并网方式和离网方式，如图 2-5 所示，其中并网发电方式是推动光伏电池发电大规模入网的重要技术支持，这也就使该运行方式的研究成为众多学者的研究重点。并网运行的光伏电池需要逆变器和控制器等电力电子设备对输出电能的精准控制。逆变器负责将直流电转换为交流电，以便并入大电网中；而控制器的主要作用是负责最大功率点跟踪和逆变器输出电能的功率与波形的控制，从而使输送到大电网的功率与光伏电池所能发出的最大电能功率相平衡。

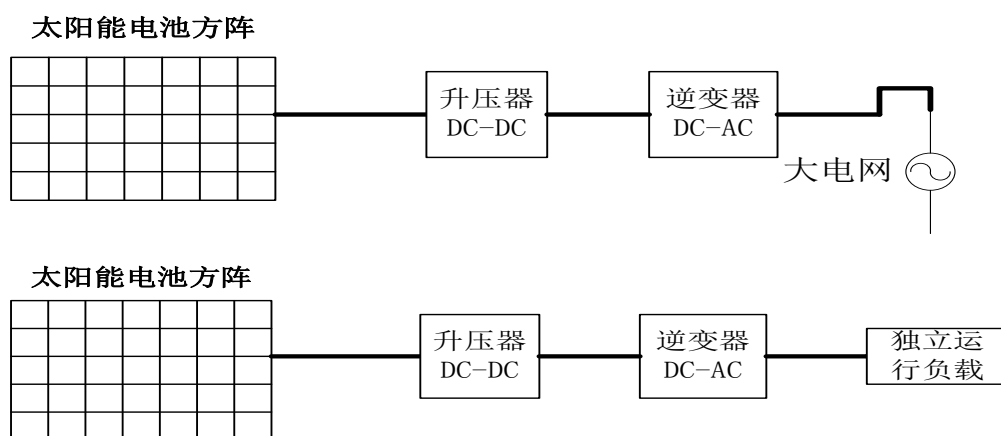


图 2-5 光伏电池两种工作模式

2.5 电力电子部分

微电网的电力电子部分主要包括整流器和逆变器等，主要作用是对微电源发出的电流进行整流和逆变，以达到微电网系统内部需要的标准电流。因此，在微网结构中，电力电子部分是连接微电源和微网的重要部分。逆变器和整流器的运行质量对微电网的安全性有很大的影响。下面主要介绍一下锁相环（phase-locked loop）和逆变器的部分。

2.5.1 锁相环（PLL）

锁相环（PLL: Phase-locked loops）是一种利用反馈（Feedback）控制原理实现的频率及相位的同步技术，其作用是将电路输出的时钟与其外部的参考时钟保持同步。当参考时钟的频率或相位发生改变时，锁相环会检测到这种变化，并且通过其内部的反馈系统来调节输出频率，直到两者重新同步，这种同步又称为“锁相”（Phase-locked）。

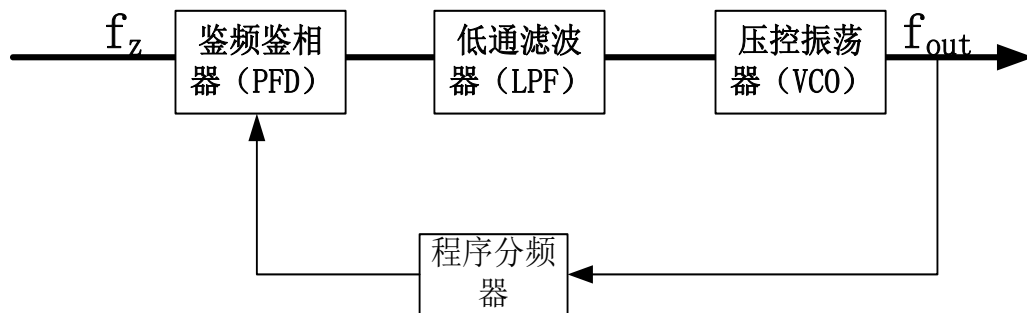


图 2-6 锁相环原理图

锁相环的基本工作原理如上图所示，压控振荡器的输出信号经过采集并加以分频，和外部基准信号同时输入到鉴相器，鉴相器通过比较上述两个输入信号的频率差，并把鉴频鉴相器的输出信号输入到低通滤波器进行滤波，然后输出一个直流脉冲电压信号来控制 VCO，并使它的频率发生改变。这样 VCO 在很短的时间内就能使输出稳定于某一期望值^[48]。该元件在本实验系统中用于多个微电源并联运行，是协调多个微电源共同工作的重要部分。

2.5.2 逆变器

逆变器是微网系统中的一个非常重要的模块，作用是将微电源发出的直流电变换为交流电。逆变器的直流输入源可以来源于以下任何一种电源：光伏发电组件，变速风力发电系统（整流后的直流输出），微电源所配备的蓄电池。

通常来说，逆变器是一种将直流电变成交流电的变流装置。假如，该装置是通过直流发电机组与交流发电机组来实现这种电能转变的，那就称之为旋转变流机；如果是通过半导体开关或电力电子器件等完成换流的，就成为静止逆变器，在电力电子中也成为逆变器。在可靠性、重量、体积和逆变效率等发面逆变器都比旋转变流器有更大的提升，是当前逆变器的发展方向。

逆变器主要分为主电路以及控制电路两部分。依据直流电源的不同类型，分为电压型逆变器和电流型逆变器；根据输出交流电压的不同性质，分为方波逆变器和恒频恒压正弦波逆变器，高频脉冲电压逆变器，变频变压逆变器；根据逆变电路的

不同结构，可以分为单相半桥、单相全桥、推挽式、三相桥式逆变器；根据开关器件及其关断方式不同，可以分为采用晶闸管半控型开关的强迫关断晶闸管逆变器和采用全控型开关的自关断换流逆变器两类。逆变器原理图如图 2-7 所示。

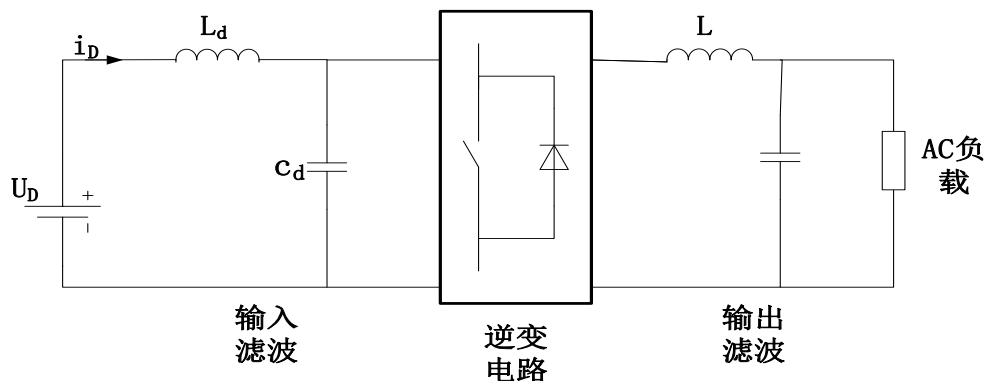
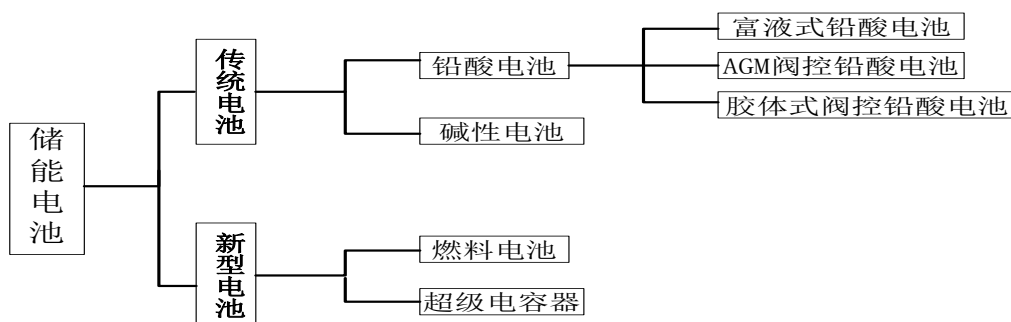


图 2-7 逆变器

2.6 储能部分

微网系统内有大量的分布式电源，而这些电源的输出电能都不是工频，所以系统内存在大量的电力电子元件，这就使微网系统缺乏惯性，同时可再生能源具有间歇性的特点，这就使得储能设备成为微网内不可缺少的配置^[49]。

(1) 蓄电池储能：铅酸蓄电池是最老也是最成熟的蓄电池储能技术，可是组成蓄电池组来提高容量，优点是成本低，缺点是电池寿命比较短，并且在制造过程中存在一定的环境污染。目前，钠硫电池和液流电池被视为新兴的、高效的且具有广阔发展前景的大容量电力储能电池，两项技术均已实现商业化运作，兆瓦级钠硫和 100kW 级液流电池储能系统已步入试验示范阶段^[50]。随着容量和规模的扩大以及集成技术的日益成熟，蓄电池储能的成本将进一步降低，经过安全性和可靠性的长期测试，有望在提高可再生能源系统的稳定性、平滑用户侧负荷及紧急供电等方面发挥重要作用。



(2) 超导储能：超导磁储能系统（SMES）是利用超导材料制成的线圈，有电

网（经变流器）提供励磁，在线圈中产生磁场而储存能量，在需要时可将此能量（经逆变器）送回电网或做其他用途。**SMES** 具有很高的转换效率（可达 95%）和很快的反应速度。但是超导储能的最大缺点是成本太高，而瓶颈。且需要压缩机和泵来维持液化冷却剂的低温，使系统变得更加复杂，维护过程繁杂。因此超导储能装置包括冷却装置、密封容器以及控制的电子装置。超导储能装置需要在温度极低的环境下工作，这是该技术当前的

（3）飞轮储能：飞轮储能将能量储存在高速旋转的飞轮中，所储存的能量和它的质量、旋转的速度平方成正比。飞轮储能具有能量密度高、工作效率高、循环使用寿命长、无环境污染的特点^[51]。

（4）超级电容储能：超级电容利用双电层原理直接储存电能，其容量可达数万法拉，是介于蓄电池和传统电容之间的一种新型储能装置。超级电容储存的能量 $E=0.5CU^2$ ，与容量 C 和工作电压 U 的平方成正比。超级电容体积小，质量轻，具有动态响应快、功率密度高、循环使用寿命长、环境友好、工作温度范围宽等有点，是一种非常有前途的储能器件。超级电容器储能技术实用化的关键是降低超级电容器的生产成本和提高超级电容的能量密度。

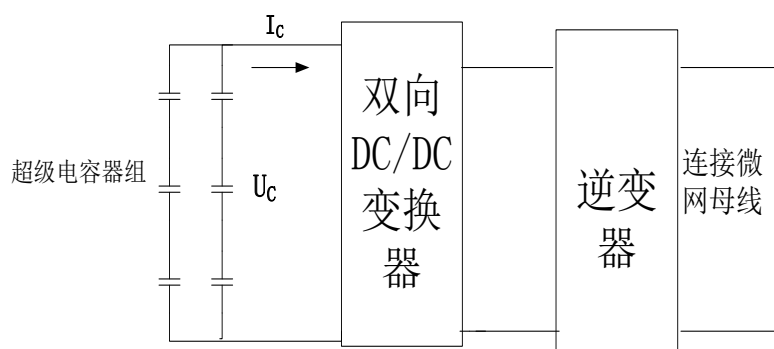


图 2-7 超级电容示意图

2.7 本章小结

本章首先介绍了不同部门对微网的不同定义，然后结合我国电网的实际情况，得出了适用于我国的微网定义。接着对微网的主要组成部分—电源部分、储能部分和电力电子部分进行了简单的介绍，其中对电源部分进行了详细的介绍，对多种类型的分布式电源进行了逐个的分析，阐述了各类分布式电源的优缺点。对实验仿真中常用到的电力电子元件进行了简单的叙述，主要是锁相环和逆变器的使用，最后对各种储能技术也有简单的介绍。

第3章 微电网建模

本文的建模与仿真都是基于 Matlab/Simulink 软件搭建而成的。Simulink 是 Matlab 的一个附加组件，为用户提供建模与仿真的工作平台。由于 Simulink 必须是在 Matlab 环境下运行，因此 Simulink 也被人称为 Matlab 的一个工具箱（Toolbox）。Simulink 可以实现动态系统建模与仿真的环境集成，并且能够根据设计及使用要求，完成系统的修改与优化，并提高系统的性能。

3.1 光伏电池的建模

分析光伏电池各方面的特性，建立数学模型，最后利用 Matlab 软件对光伏电池进行建模。

3.1.1 光伏电池的电压电流特性

光伏电池把接收到的光能转换成电能，其输出电流—电压特性，即 $I-V$ 曲线如图所示。在下图里面标注的各个点在标准状态（Standard Testing Condition, STC，是指光伏电池表面温度为 25°C ，光照强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ）下具有下面的含义：

最大输出功率（ P_m ）：最大输出工作电压（ V_{pm} ） \times 最大输出工作电流（ I_{pm} ）

开路电压（ V_{oc} ）：正负极间为开路状态时的电压

短路电流（ I_{sc} ）：正负极间为短路状态时流过的电流

最大输出工作电压（ V_{pm} ）：输出功率最大时的工作电压

最大输出工作电流（ I_{pm} ）：输出功率最大时的工作电流

图 3-1 中的最佳工作点是光伏电池发出最大输出功率时的工作点，此时最大输出功率 P_m 是 I_{pm} 与 V_{pm} 的乘积。但是在现实光伏电池的工作中，工作点与光照条件和负载有关，因此工作点偏离最佳的工作点。

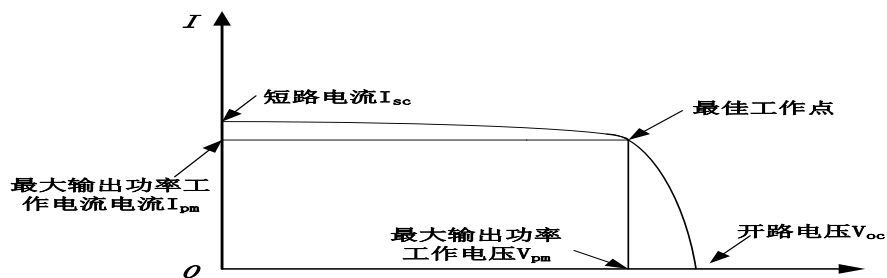


图 3-1 光伏电池电流电压特性

3.1.2 光伏电池的温度和光照特性

当光伏电池表面温度升高，而输出功率下降，呈现出负的温度特性。在晴天时受到光照的光伏电池的 surface 温度比外界的气温高 20—40℃，因此此时的电池输出功率比标准的状态输出功率低，此外，由于季节和温度的不断变化输出功率也在变化。如果光照的强度相同，冬季比夏季输出功率要大。温度特性和光照特性如下图 3-2 所示。在下图中可以发现，光照强度变化产生的影响比温度变化的影响要大得多。这对所有常用的 PV 材料都适用。这两种效应结合后的重要结果为：PV 电池的功率会随光照强度的降低或温度的升高而降低。

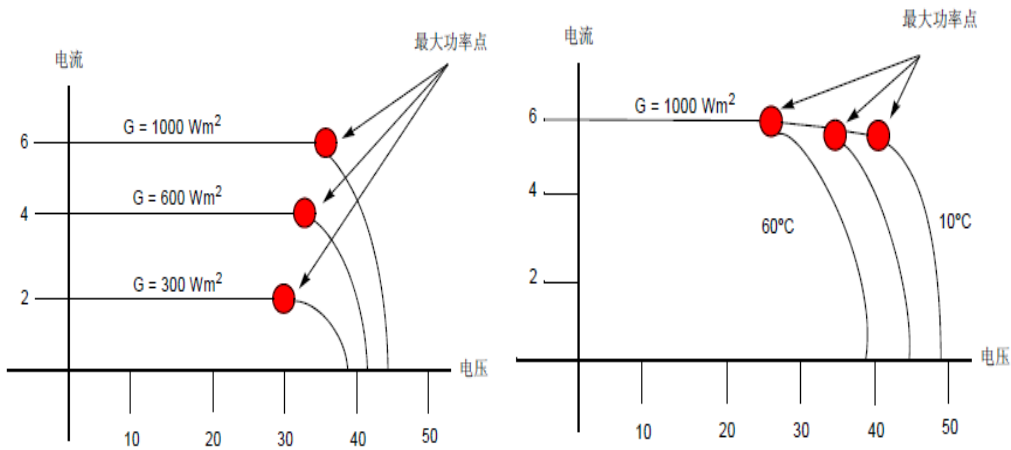


图 3-2 光伏电池光照温度特性

3.1.3 光伏电池的数学模型

在本文中用于 Matlab 里建模的光伏阵列的数学模型如下：任意的太阳辐射强度 R ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) 和环境温度 T_a ($^\circ\text{C}$) 的条件下，光伏电池的温度 T_c ($^\circ\text{C}$) 为：

$$T_c = T_a + t_c \cdot R \quad (3-1)$$

其中， R 是光伏阵列的斜面上的总的太阳辐射； t_c ($\text{degW}^{-1} \cdot \text{m}^2$) 是太阳能电池模块的温度系数。

设在参考的条件下， V_{oc} 为开路电压， I_{sc} 为短路电流， V_{pm} ， I_{pm} ，为最大功率点的电压和电流，则当光伏阵列的电压为 V ，对应点的电流则为 I ：

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left(e^{\frac{V}{C_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right) \quad (3-2)$$

式中：

$$C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) e^{-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}} \quad (3-3)$$

$$C_2 = (V_m / V_{oc} - 1) / \ln(1 - I_m / I_{sc}) \quad (3-4)$$

考虑到太阳辐射的影响和温度变化时：

$$I = I_{sc}(1 - C_1(e^{\frac{V-DV}{C_2 V_{oc}}} - 1) + DI) \quad (3-5)$$

式中：

$$DI = \alpha \cdot R / R_{ref} \cdot DT + (R / R_{ref} - 1) \cdot I_{sc} \quad (3-6)$$

$$DV = -\beta \cdot DT - R_s \cdot DI \quad (3-7)$$

$$DT = T_c - T_{ref} \quad (3-8)$$

T_{ref} , R_{ref} , 是光照温度和太阳辐射的参考值, 一般取值为 1kW/m^2 , 25°C ;

α 为在参考光照条件下, 电流变化温度系数 ($\text{A}/^\circ\text{C}$)

β 为在参考光照条件下, 电压变化温度系数 ($\text{V}/^\circ\text{C}$)

R_s 为光伏模块的串联电阻 (Ohms), 由下式决定:

$$R_s = \frac{N}{N_p} R_{s, ref} = \frac{N}{N_p} (A_{ref} \ln(1 - \frac{I_{m, ref}}{I_{sc, ref}}) - V_{m, ref} + V_{oc, ref}) / I_{m, ref} \quad (3-9)$$

$$A_{ref} = \frac{T_{c, ref} \mu_{V_{oc}} - V_{oc, ref} + \varepsilon N_s}{\frac{U_{I_{sc}} T_{c, ref}}{I_{Lref}} - 3} \quad (3-10)$$

式中, ε 为材料带能, $\varepsilon = 1.12\text{eV}$ (硅);

$I_{m, ref}$, $V_{m, ref}$ 为在参考条件下的光伏阵列的最大功率点电流和电压,

$I_{sc, ref}$, $V_{oc, ref}$ 为在参考条件下的光伏阵列的短路电流与开路电压,

$\mu_{V_{oc}}$, $\mu_{I_{sc}}$ 为在参考条件下的开路电压和短路电流的温度系数,

N 为光伏阵列模块的串联数, N_s 为光伏阵列模块的单元串联数, N_p 为光伏阵列的模块的并联数;

$T_{c, ref}$ 为在参考条件下的光伏电池的温度, 一般情况下为 25°C 。

3.1.4 光伏电池最大功率跟踪数学模型

为了使光伏阵列可以总是工作在最大功率点附近，以便充分发挥光伏电池的作用，这就需要对光伏电池进行控制。光伏电池的最大功率点会随着温度和光照强度的变化而变化，而光伏电池的工作点也会跟着负载的电压变化而变化。假如不采取任何控制措施，将光伏电池直接与负载相连，就很难保证光伏电池工作在最大功率点附近，光伏电池就不可能发挥其应有的输出功率。最大功率跟踪的作用就是采用直流变换电路和寻优控制程序，使得无论温度、光照强度和负载特性怎样变化，始终让光伏电池工作在最大功率点附近，使光伏电池的效能得到充分发挥，这种方法就叫做“最大功率点跟踪”，MPPT（maximum power point tracking）。

光伏阵列处于任意的光照强度和环境温度下的输出功率为：

$$P = IV = (I_{sc}(1 - C_1(e^{\frac{V-DV}{C_2V_{oc}}} - 1)) + DI)V \quad (3-11)$$

根据极值条件， $\frac{dP}{dV} = 0$ 得：

$$I_{sc}(1 - C_1(e^{\frac{V-DV}{C_2V_{oc}}} - 1)) + DI - VI_{sc}C_1e^{\frac{V-DV}{C_2V_{oc}}} / (C_2V_{oc}) = 0 \quad (3-12)$$

(3-12) 是一个超越方程，使用牛顿迭代法求出最大功率点的电压 V_{max} ：

$$\begin{aligned} V_{k+1} &= V_k - P'(V_k) / P''(V_k) \\ &= V_k - \frac{I + V^k(-I_{sc}C_1\frac{1}{C_2V_{oc}}e^{\frac{V^k-DI}{C_2V_{oc}}})}{(2 + \frac{V^k}{C_2V_{oc}})(-I_{sc}\frac{C_1}{C_2V_{oc}}e^{\frac{V^k-DI}{C_2V_{oc}}})} \end{aligned} \quad (3-13)$$

当 $|V_{k+1} - V_k| < \varepsilon_1$ 时， $V_{max} = V_{k+1}$

上式中， V_{k+1} 和 V_k 分别是 V 的第 $k+1$ 次和第 k 次的迭代值。 ε_1 是迭代精度。 $P'(V_k)$ 和 $P''(V_k)$ 分别是第 k 次迭代下 P 对 V 的一阶和二阶的导数。将所有的 V_{max} 代入 (3-2) 式，得到 I_{max} ，从而得到最大功率 P_{max} ：

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (3-14)$$

3.1.5 光伏阵列的 Matlab 仿真模型

下根据以上所述的数学模型，使用 Matlab 软件中的 Simulink 工具箱进行建模，

完成光伏阵列模型的建立。图 3-3 为封装后的光伏电池模块和该 Matlab 仿真模块的内部结构。

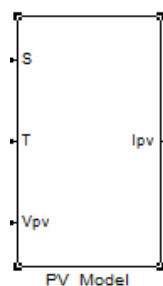


图 3-3 光伏电池模型封装

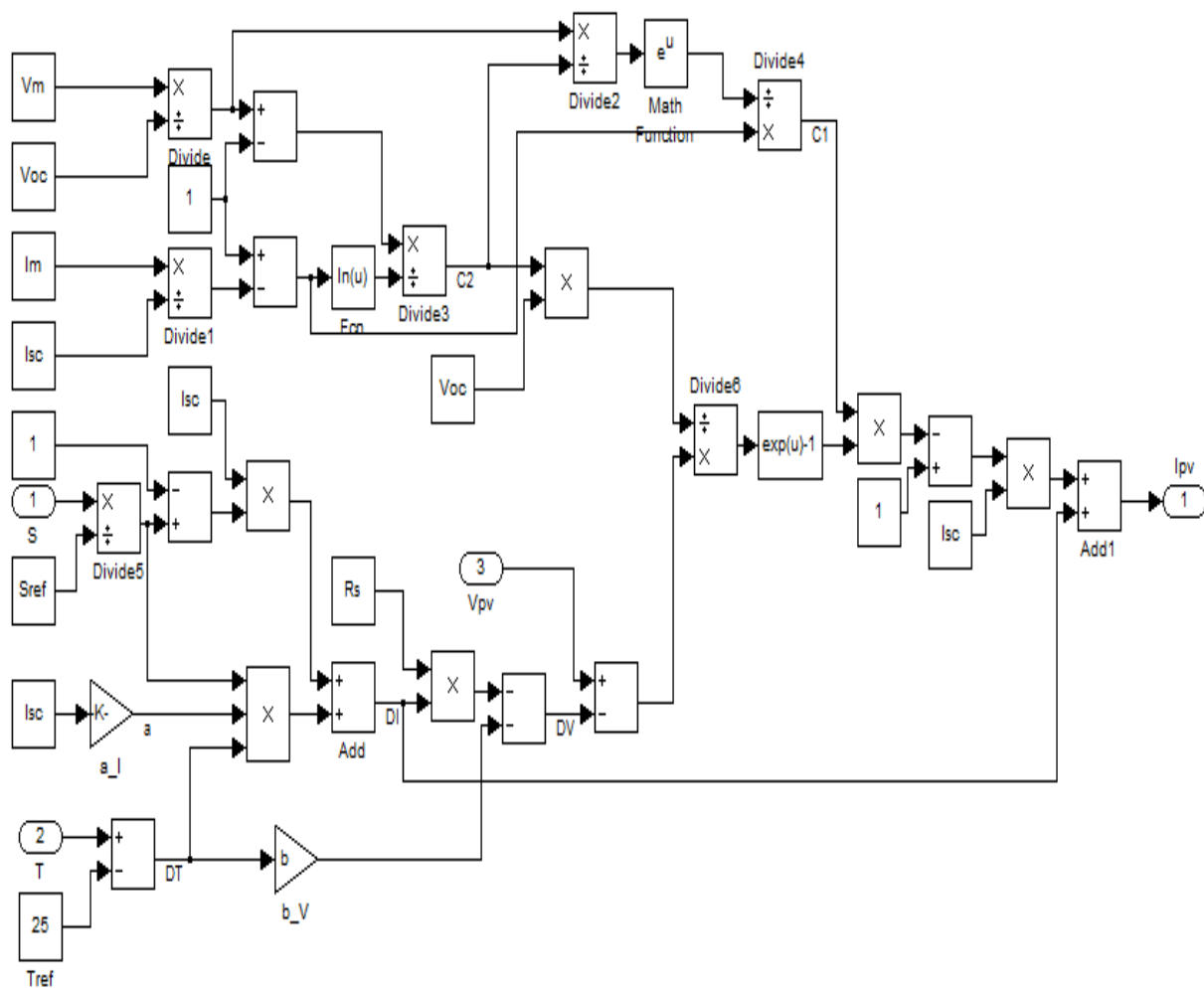


图 3-4 光伏电池模型

在图 3-4 中输入 1 模块 S 为外部光照强度，输入 2 模块 T 为光伏电池外部环境温度，输入 3 模块 V_{pv} 为光伏阵列的工作电压。输出 1 模块 I_{pv} 为光伏电池的输出电流。由于输出 1 为数字信号，所以在封装后该输出控制一个受控直流电流源，使得输出由数字信号变为直流电信号。为了方便地设置光伏电池在新的测试条件下的 I_{sc} 、 U_{oc} 、 I_m 、 U_m 的值，设置了其参数界面，如图 3-5 所示。

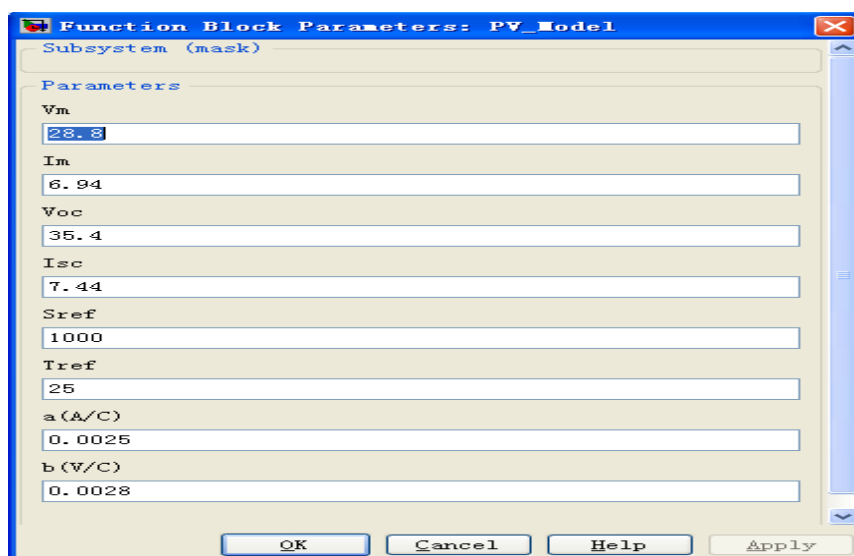


图 3-5 光伏电池参数设置

上图 3-5 是光伏阵列的设置对话框，在对话框中可以对光伏电池的各个参数进行设置， a (A/C) 栏是在参考光照条件下电流变化温度系数的参数设置， b (V/C) 是在参考光照条件下电压变化温度系数的参数设置，最后一行是 R_s 即光伏模块的串联电阻 (Ohms) 的参数设置。

对于 MPPT (最大功率点跟踪) 控制，就要求对光伏电池的工作电流和工作电压进行同时采样，通过相乘运算得到功率数值，通过不停与上一采样值比较，使光伏电池工作在最大功率点附近。同时要把光伏电池的工作电压 V_{pv} 的信号反馈到控制电路，使光伏电池的工作电压始终工作在某一恒定的电压值。最后，带有 MPPT 和升压电路的光伏电池的模型如图 3-6 所示。

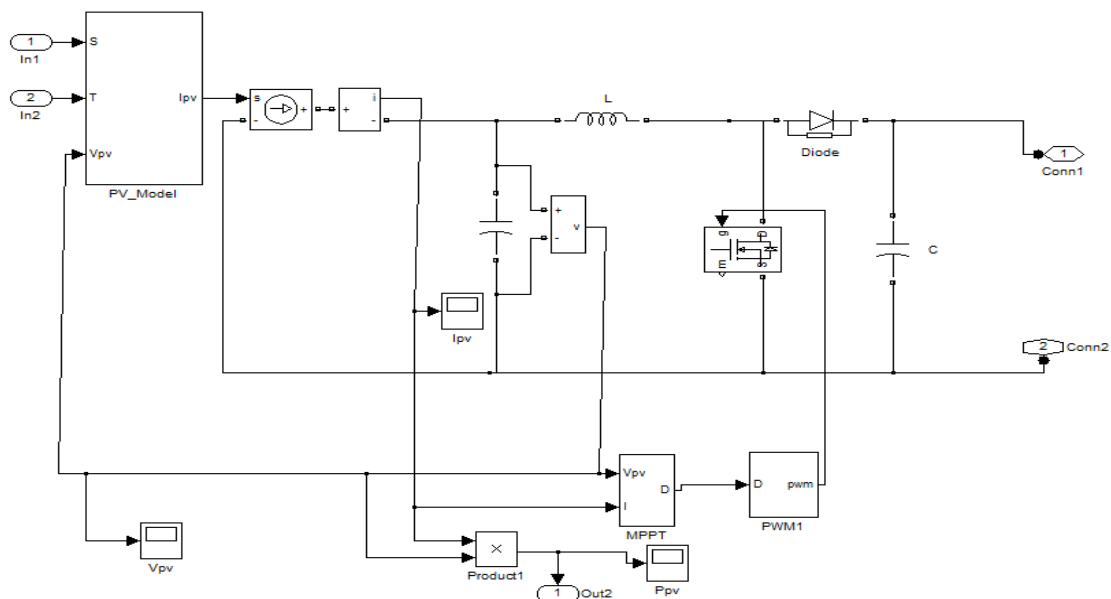


图 3-6 带 MPPT 的 PV 模型

3.1.6 光伏电池输出特性仿真

在不同环境条件下对光伏电池仿真模型进行仿真实验,分别得到 I-V 与 P-V 特性曲线。光伏电池的参数选取为: $I_{sc}=7.44A$, $U_{oc}=35.4V$, $I_m=6.94A$, $U_m=28.8V$ 。

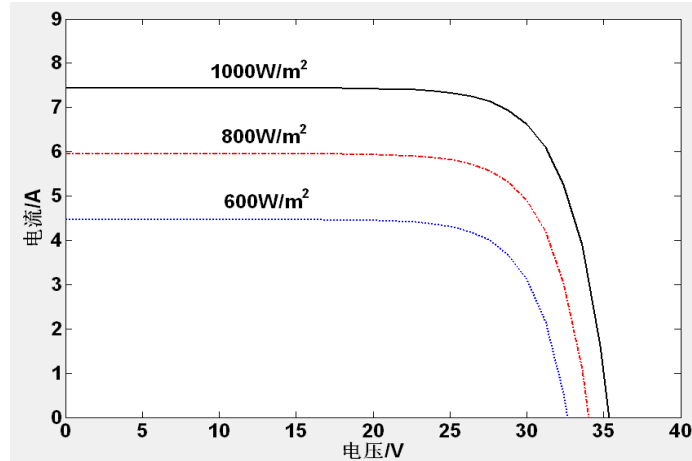


图 3-7 不同光照强度下光伏电池的 I-V 特性曲线

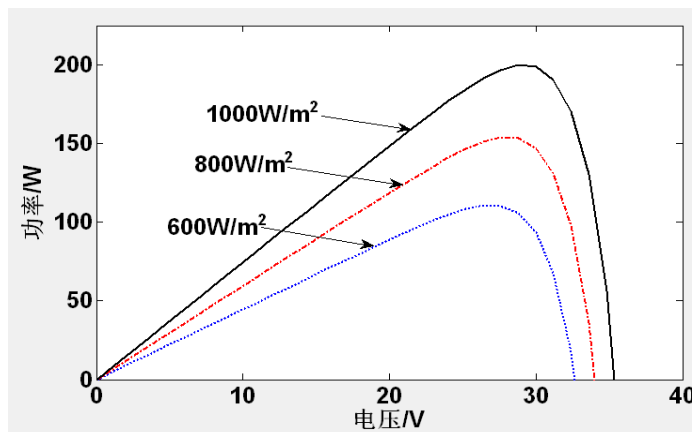


图 3-8 不同光照强度下光伏电池的 P-V 特性曲线

如图 3-6、图 3-8 所示,分别为光伏电池在温度一定的情况下,光照辐射强度由 $1000W/m^2 \sim 800W/m^2 \sim 600W/m^2$ 的情况下 I-V 特性曲线和 P-V 特性曲线。当光照强度逐渐增加时,输出的短路电流由 $4.5A$ 逐渐增高到了 $7.5A$,由此可以看出,光照辐射强度对短路电流的影响较为明显。当光照强度比较低时,开路电压上升的速度较快;反之电压上升速度较慢。另外,当光照强度逐渐增加时,光伏电池的工作电压发生偏移,光伏电池输出最大功率值也随着增高。

在光照辐射强度不变的情况下,温度由 $45^\circ C \sim 25^\circ C \sim 5^\circ C$ 变换的情况下,光伏电池 I-V 特性曲线和 P-V 特性曲线如图 3-9、图 3-10 所示。当温度逐渐升高时,光伏电池的开路电压由 $37V$ 降至 $33V$ 。与此同时,短路电流会有较小幅值的下降。仿真结果表明光伏电池具有负的温度系数,即温度低的地区更有利于提高光伏电池

的转换效率，所以应尽量使光伏电池在较低的温度下工作。

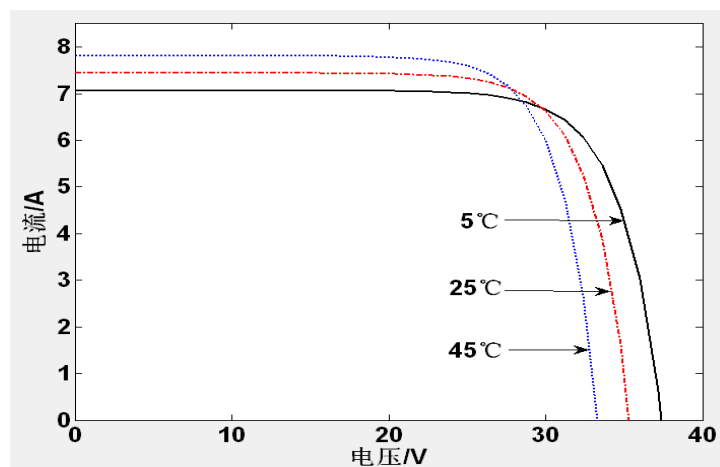


图 3-9 不同温度下光伏电池的 I-V 特性曲线

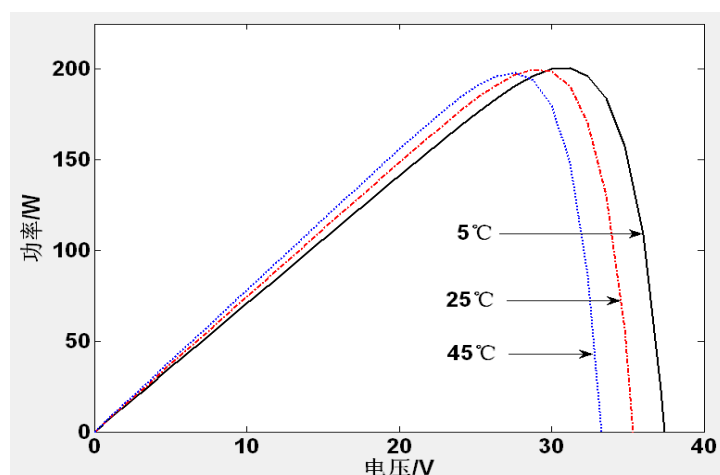


图 3-10 不同温度下光伏电池的 P-V 特性曲线

3.2 风力发电机的建模

3.2.1 双馈风力发电机的运行原理和特性

双馈风力发电机是普通绕线式异步感应电机添加了连接在转子滑环与定子之间的四象限变频器与其控制系统而构成的。所以，双馈异步发电机能够看成是一部具有打开的绕线式转子接有外加的电压源的传统异步发电机，该外加电压源由变频器引入，变频器对转子回路电流实现了频率、相位和幅值的调节，达到了励磁电源的作用。双馈异步发电机除了通过定子向大电网馈入功率外，同时也由部分功率变频器和电网之间交换转差功率，并且能够通过变频器的控制达到对整个发电机的有功和无功功率的控制。

在定子侧，当电能传送的方向是电机到大电网方向时，电机是发电机运行，当电能传送的方向是大电网到电机方向时，电机作为电动机运行；而在转子侧，处在变流器的电机侧的电压控制下，电能的传送方向是可逆的。所以，双馈发电机的运行状态是能够用功率传递的关系说明的，如图 3-11 所示，其中 P 是发电机的输出功率， s 是转差率， sP 是转差功率，且不计变流器和发电机的损耗。

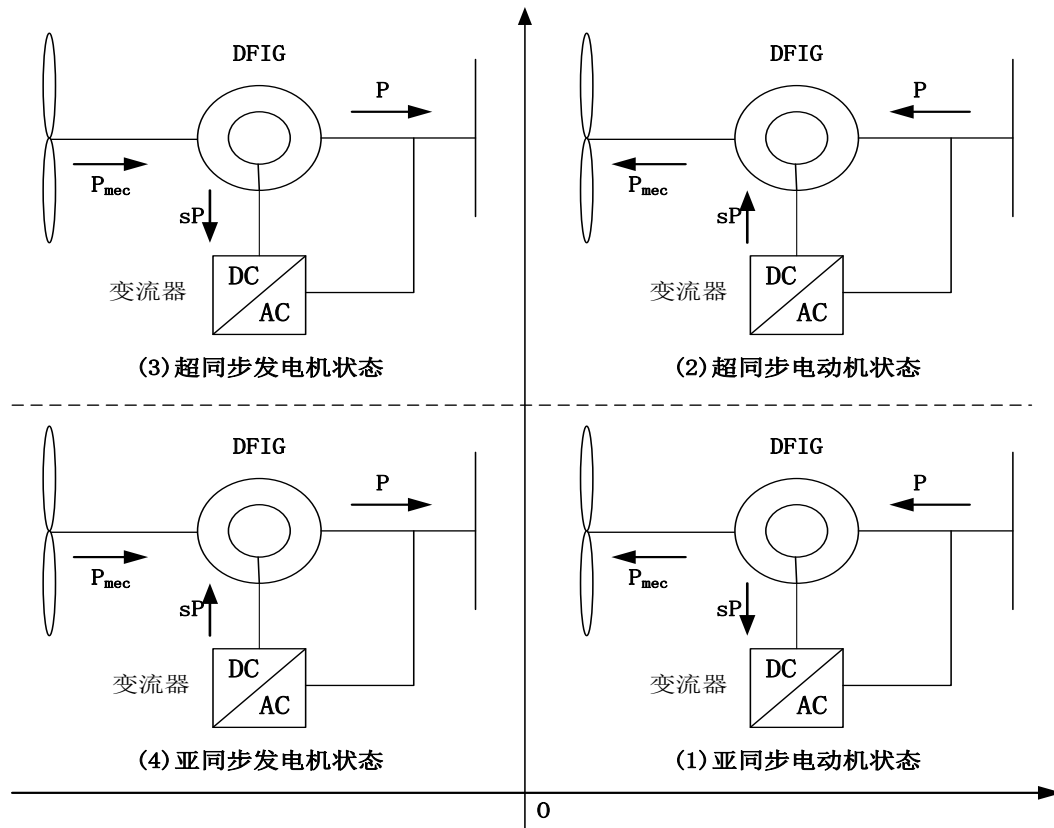


图 3-11 双馈风力发电机运行状态

由上图可以看出，双馈风力发电机在并网状态下运行时，存在 4 种运行状态。其中第一象限是电动机运行状态，图 3-11 (1) 是亚同步电机状态，处于此种状态时定子从大电网输入功率 P ，其中大部分 $(1-s)P$ 转换为机械功率 P_{mec} 从传动轴上输出，剩余部分转差功率 sP 经过变流器馈入大电网；图 3-11 (2) 是超同步电机状态，处于此种状态时，定子由大电网输入功率 P ，而转子经过变流器由大电网输入转差功率 sP ，两部分之和 $(1+s)P$ 都转变成机械功率 P_{mec} 从传动轴上输出。在电动机运行状态下的风力发电机实际上就是一台大风扇，不停地消耗大电网的电能，风力发电机不应该在这一状态运行。

在图 3-7 中的第二象限是发电机的运行状态，其中图 3-11 (3) 是超同步发电机的状态，出于这种状态下时，风机向发电机输入的机械功率 $P_{mec} = (1+s)P$ ，其中大部分转变成了电功率 P 从定子馈入大电网，另一部分转差功率 sP 由变流器馈入

大电网；图 3-11（4）是亚同步发电机状态，这种状态时风机向发电机输入功率为 $P_{mec} = (1-s)P$ ，转子经过变频器从大电网输入转差功率 sP ，两者之和转换成电功率 P 由定子端馈入大电网。

3.2.2 双馈风力发电机的数学模型

在对双馈风力发电机进行分析之前，先做下面几点假定：仅考虑定转子空间磁势基波分量；仅考虑定转子电流的基波分量，不考虑谐波分量；不考虑磁滞、涡流损耗和铁耗；变频器的电源能够为转子提供满足幅值、功率因数及频率要求的电能，不考虑其阻抗与损耗。

从异步电机的基础上对转子侧电路修正可以得到双馈风力发电机的等值电路，如图 3-8。由磁势与电势平衡的原则，并且将转子侧的物理量转换至定子侧，式(3-15)是双馈电机的基本方程式。其中 \dot{V}_1 、 \dot{V}_2 分别是定子电压、折算后的转子电压； \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 和 \dot{I}_m 分别是定子电流、折算后的转子电流以及励磁电流； r_1 、 r_2 分别是定子电阻、折算后的转子电阻； x_1 、 x_2 、 x_m 分别是定子电抗、折算后的转子电抗以及励磁电抗； \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 是感应电势； s 是转差率。因为 $x_m \gg r_m$ ，所以一般忽略 r_m 。

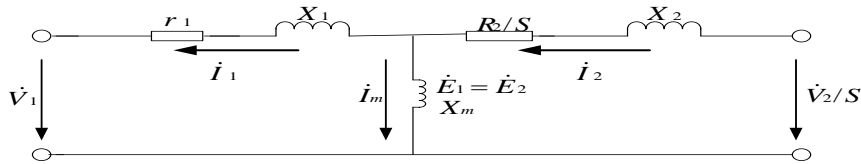


图 3-8 双馈发电机等值电路

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1(r_1 + jx_1) \\ \frac{\dot{V}_2}{s} = \dot{E}_2 + \dot{I}_2(\frac{r_2}{s} + jx_2) \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_m \\ \dot{E}_1 = \dot{E}_2 \\ \dot{E}_1 = j\dot{I}_m x_m \end{cases} \quad (3-15)$$

关于双馈风力发电机的动态模型的分析通常是以同步旋转坐标系作参考的，习惯上采用定子磁链或定子电压进行定向。因为双馈电机的转子回路经过发电机滑环外接外部电压源，所以与异步电机不同，它的转子电压 u_{rd} 与 u_{rq} 不为零。控制转子的外接电压值就可以控制双馈发电机发出的有功功率和无功功率。基于同步旋转坐标系的双馈发电机的方程如下：

双馈风力发电机的电压方程：

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1(r_1 + jx_1) \\ \frac{\dot{V}_2}{s} = \dot{E}_2 + \dot{I}_2(\frac{r_2}{s} + jx_2) \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_m \\ \dot{E}_1 = \dot{E}_2 \\ \dot{E}_1 = j\dot{I}_m x_m \end{cases} \quad (3-16)$$

式 (3-16) 中, 下标 s、r 分别代表定子侧和转子侧; 下标 d、q 则与同步旋转坐标系的 d 轴和 q 轴相对应; ω_s 是坐标系的旋转角速度, 即同步速度。

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (3-17)$$

式 (3-19) 中, L_s 、 L_r 、 L_m 分别代表定子电感、转子电感和定转子间互感。

定子瞬时功率:

$$p_s = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \quad (3-18)$$

将式 (3-16)、(3-17) 代入上式得到:

$$p_s = \frac{3}{2} [R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + \omega_s (i_{sq} \psi_{sd} - i_{sd} \psi_{sq}) + (i_{sd} \frac{d\psi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\psi_{sq}}{dt})] \quad (3-19)$$

上式中第一项是定子铜耗, 第二项是电磁功率, 第三项是暂态过程中的功率项, 如果不考虑定子的电磁暂态过程, 该项为零。

定子吸收或发出的无功功率为:

$$Q_s = \frac{3}{2} (u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \quad (3-20)$$

类比可以得出转子的瞬时电磁功率:

$$p_r = \frac{3}{2} (u_{rd} i_{rd} + u_{rq} i_{rq}) \quad (3-21)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (u_{rq} i_{rd} - u_{rd} i_{rq}) \quad (3-22)$$

双馈发电机的定子、转子总的电磁功率:

$$p = p_s + p_r \quad (3-23)$$

根据双馈发电机的原理，由定子传入转子的电磁功率 P_s 可以分成两部分：一部分是拖动转子的有效电磁功率 $p = (1-s)p_s$ ，另一部分为传输至转子电路的转差功率 $p_r = -sp_s$ 。由此得到双馈电机的电磁转矩为：

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P}{\omega_r} = \frac{p_s + p_r}{\omega_r} \\ &= \frac{(1-s)p_s}{\omega_r} \approx \frac{(1-s) \frac{3}{2} \omega_s (i_{sq} \psi_{sd} - i_{sd} \psi_{sq})}{(1-s)\omega_s} \\ &= \frac{3}{2} (i_{sq} \psi_{sd} - i_{sd} \psi_{sq}) \end{aligned} \quad (3-24)$$

式中对定子的瞬时电功率做了近似，不考虑定子铜耗和电磁的暂态过程。

3.2.3 双馈风力发电机的 Matlab 仿真模型

在 Matlab 里软件中提供了双馈风力发电机的模型。在 Matlab 中的命令窗口里输入“power_wind_dfig_det”，就能打开如图 3-12 所示的事例模型。该模型是双馈风力发电机输电系统的模型。

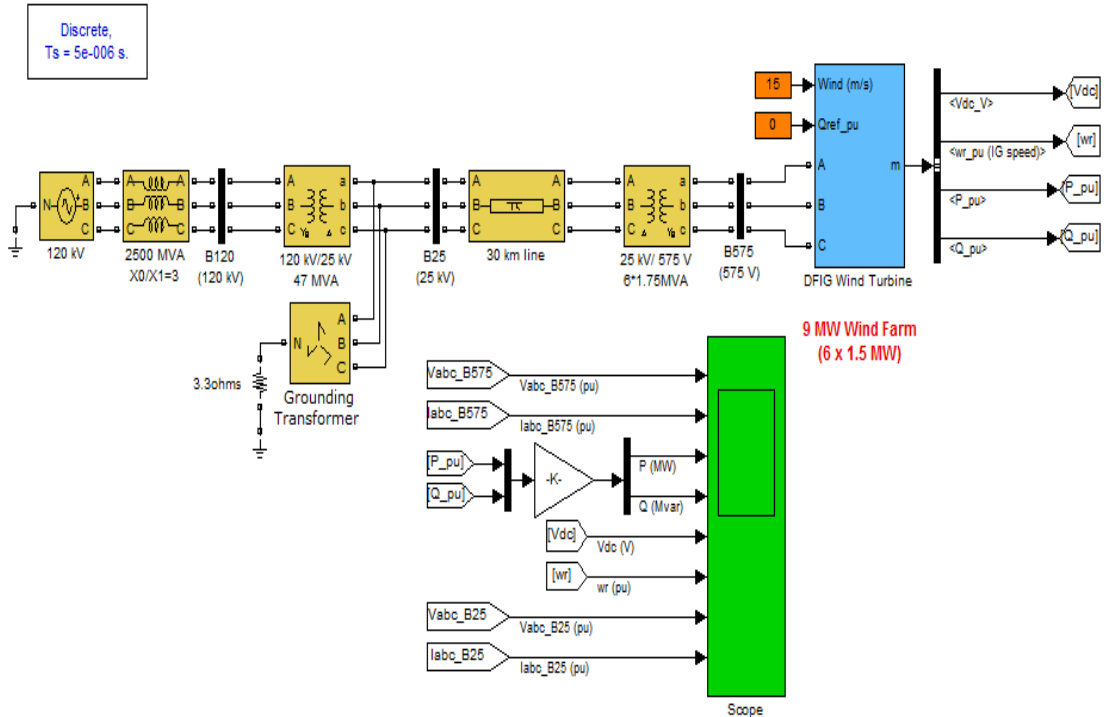


图 3-12 双馈风力发电机模型

点击双馈风力发电机，出现对话框如图 3-13 所示，在该对话框内，可以设置风力发电机的数量，在下拉菜单中可以选择单机控制参数、单个风力发电机参数、变流器参数和驱动参数，并能对所属数据进行设定。

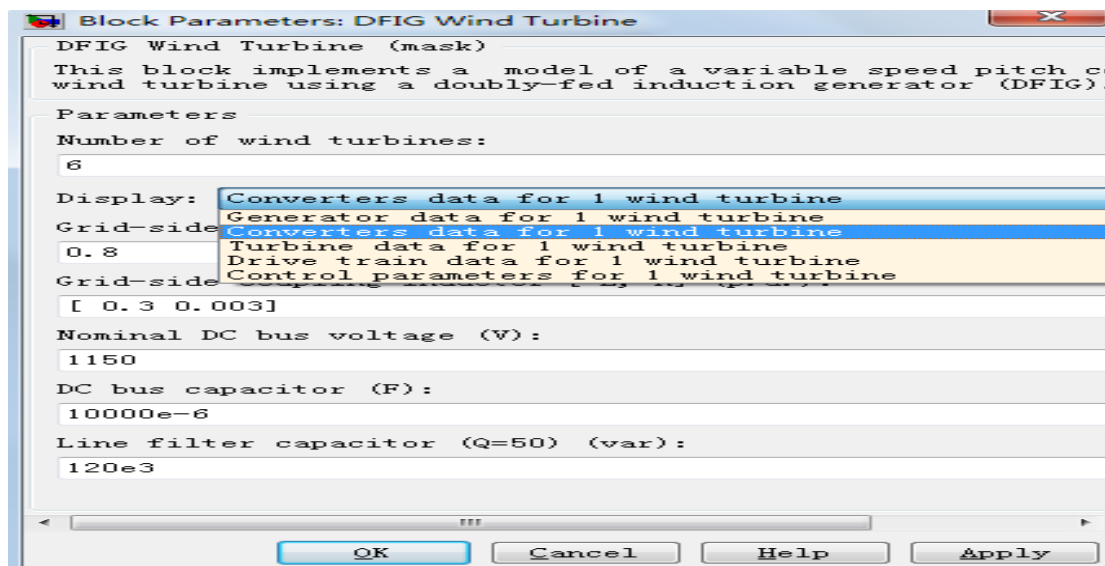


图 3-13 DFIG 参数设置

双馈风力发电机内部的结构图如下图 3-14 所示。图中上面是双馈发电机部分，下面是变流器部分。电机部分是异步电机的模型，可以在对话框中将转子设置为绕线式，这就成了双馈异步电机。该电机模型的定子和三相电网直接连接，而转子则经过双 PWM 变流器和电网连接。

关于双馈风力发电机的模型则如图 3-15 所示，图中按照贝兹公式，由输入的风速、发电机转速、桨距角参数从而设定风能利用系统，计算出由风力机传送到发电机的转矩。这个转矩信号就是发电机的驱动转矩输入信号。

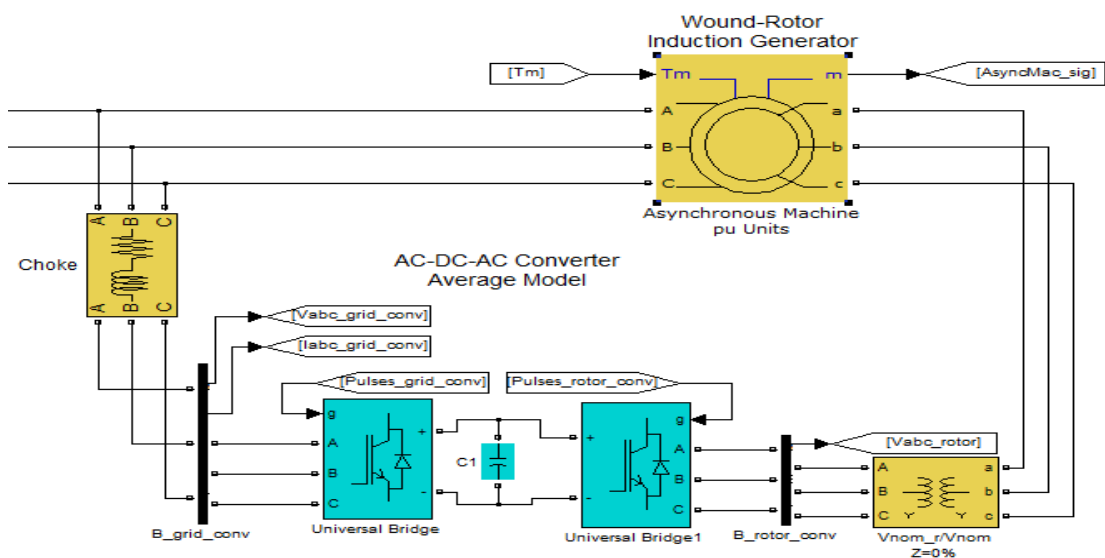


图 3-14 双馈风力发电机模型

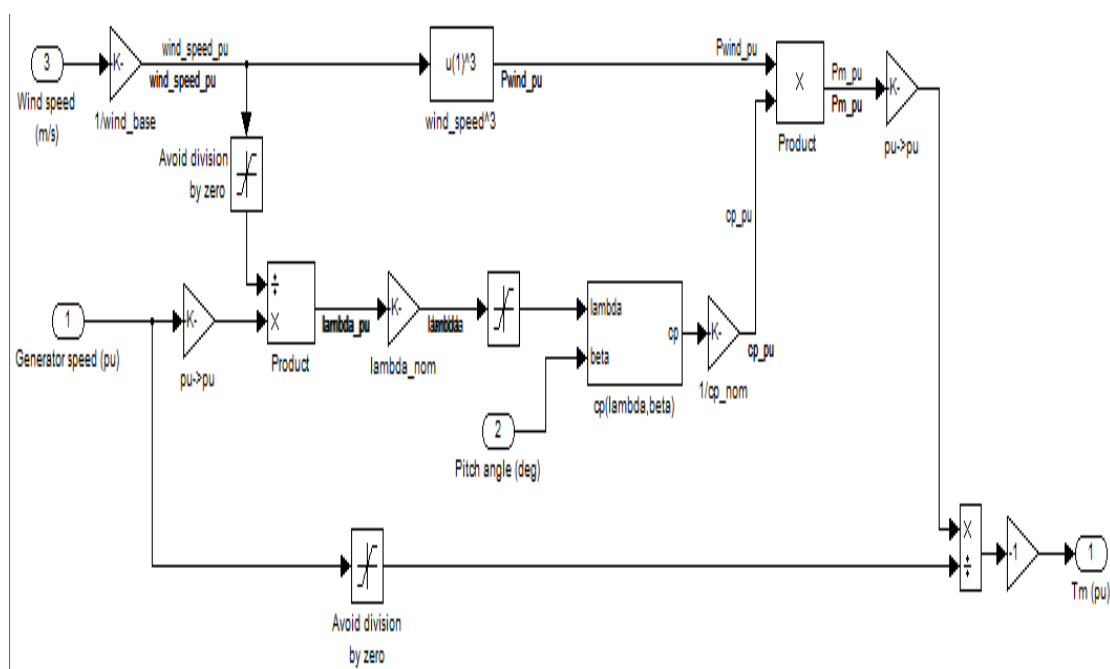


图 3-15 双馈风力发电机模型图

双馈风力发电机的控制部分如下图 3-16 所示，图中唯一的输入是设定风力发电机的参考无功输出的设定，两个脉冲输出波是两个 PWM 变流器的调制波信号，剩余两个输出分别是：一个是桨距控制信号，用来根据风速大小控制风叶桨距；另外一个输出是有功输出和无功输出的标么值。

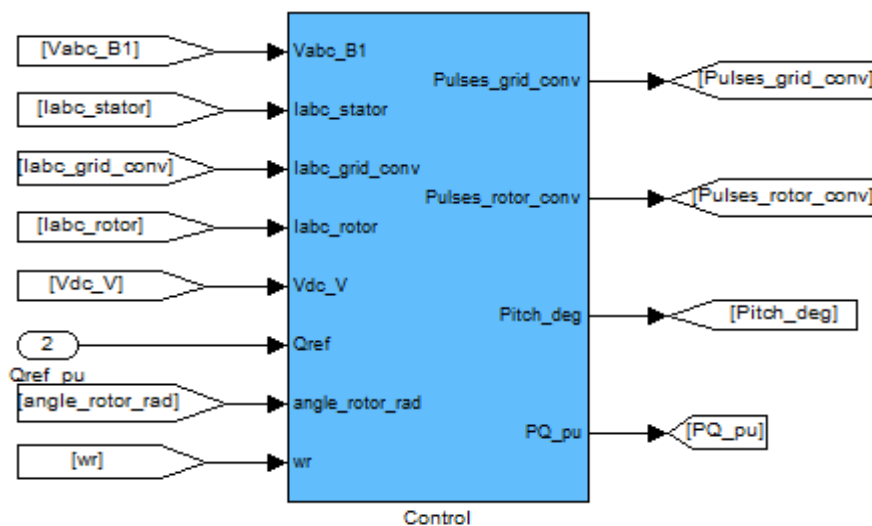


图 3-16 双馈风力发电机控制部分

由于本实验平台是单相系统的，而该双馈风力发电机的模型是三相系统，所以需要将其转变为单相系统。转换方式如下图 3-17 所示，将风力发电机与接地变压器相连，取 ABC 三相中的一项作为火线，变压器的中性接点引出的线作为零线，就变成了单相系统。示波器的图形如图 3-18 所示。

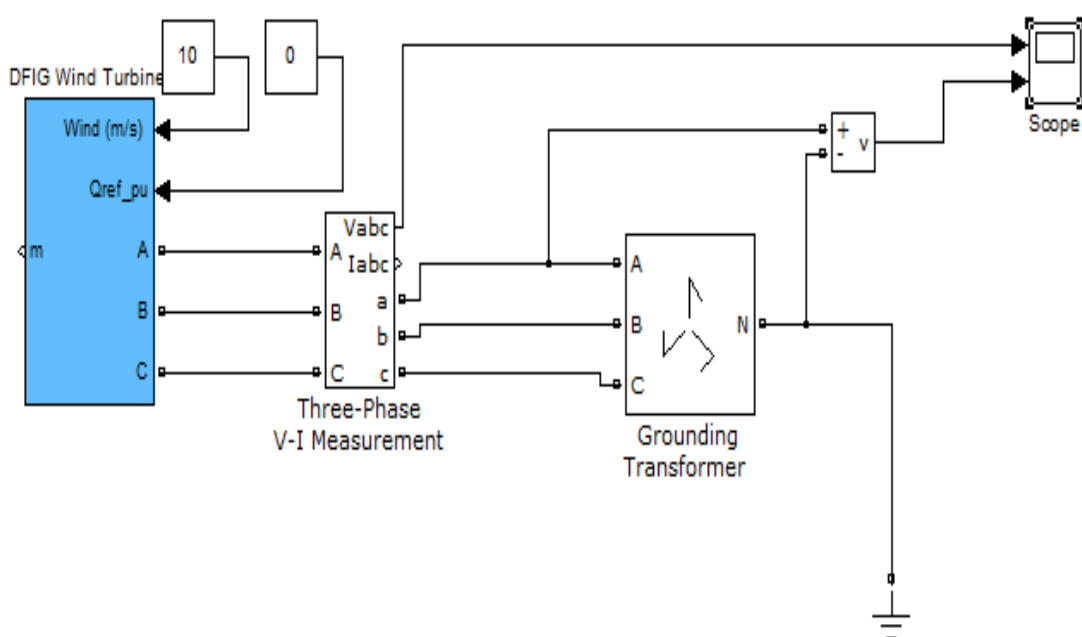


图 3-17 变相示意图

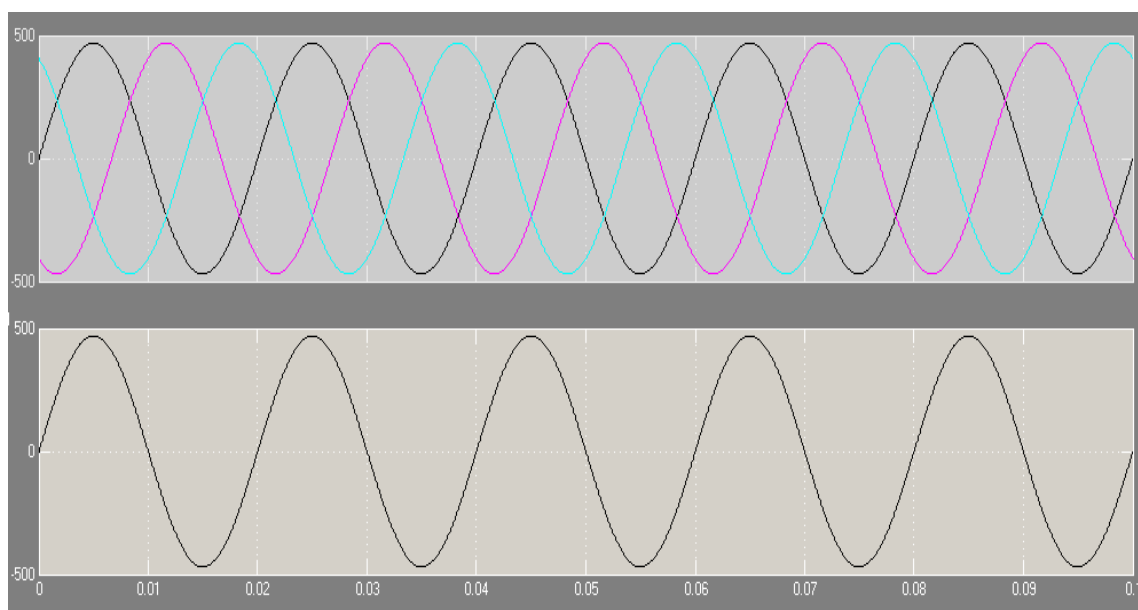


图 3-18 仿真结果

3.4 本章小结

本章也对光伏电池和风机进行了建模。由于本文采用的仿真软件是 Matlab/simulink，所以对光伏电池和双馈风力发电机的仿真都是基于 Simulink 的。在对光伏电池和双馈风力发电机的数学模型进行介绍后，对其完成建模，在建模的过程中对光伏电池和双馈风力发电机的特性有了更深的了解。

第4章 微电网模型仿真研究

4.1 微电网并网运行控制仿真算例

在该仿真算例中，电源部分是采用可控直流电压源，在 MATLAB/Simulink 环境里，完成了单相光伏并网逆变系统仿真模型的搭建，如图 4-1 所示。模型参数：直流电压源 400V，交流电压峰值 311V， $L=6\text{mH}$ ， $R_L=0.01\Omega$ ， $C=6\mu\text{F}$ ，负载电阻 $R=180\Omega$ ， $K_p=80$ ， $K_i=200$ ， $K_d=0$ ，参考电流峰值设为 20A。为方便观察仿真实验结果，将电网电压输出幅值衰减为原值的 1/2。逆变器出口处的滤波部分采用电容和电感组成的 L 型滤波器。

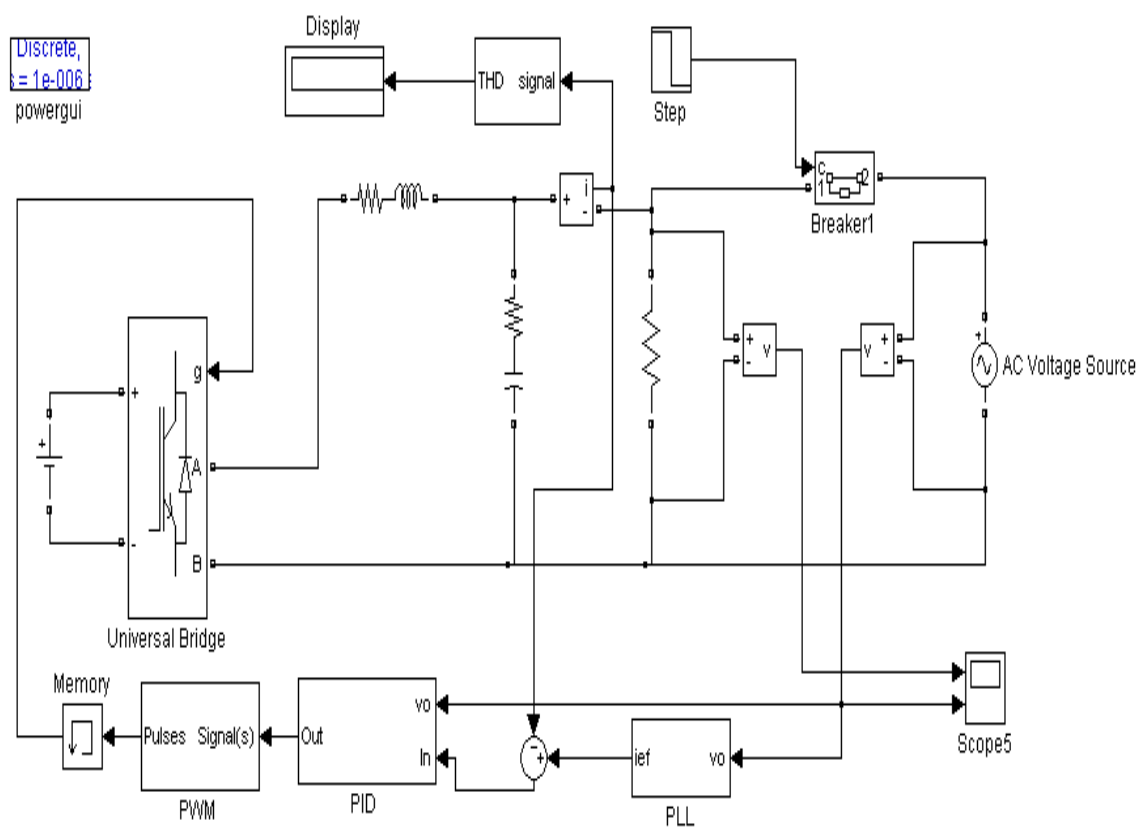


图 4-1 并网仿真模型图

在本并网算例中，逆变器的控制采用电感电流外环和电容电流内环的双闭环控制方法，控制系统所采用的控制器参数在经过不断调试之后得到合适的值。其中电

感电流控制器的参数为 $P=0.3$, $I=1204$; 电容电流控制器的参数为 $P=5.2$, $I=1599.8$ 。

该仿真系统的概况如图 4-1 所示, 对并网瞬间 PCC 点电压变化情况进行分析。开关 Breaker1 在初始时刻处于开断状态, 设定在 0.2 秒时刻闭合, PCC 点电压在并网时的变化情况如图 4-2 所示。

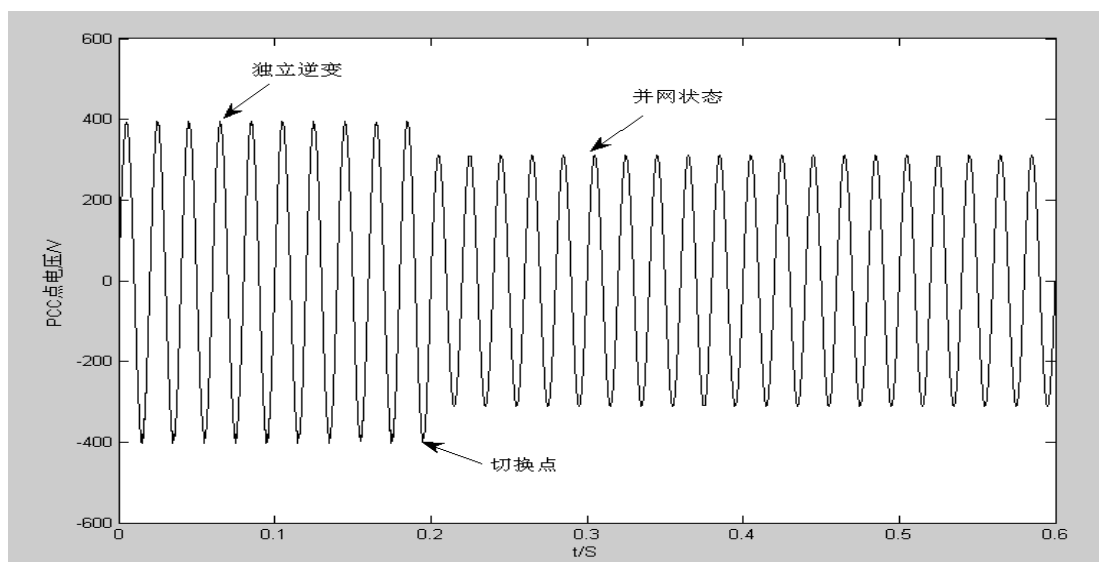


图 4-2 系统切换到并网状态的电压变化波形

开关 Breaker1 在初始时刻处于闭合状态, 设定在 0.2 秒时刻开断, PCC 点电压在离网时的变化情况如图 4-3 所示。

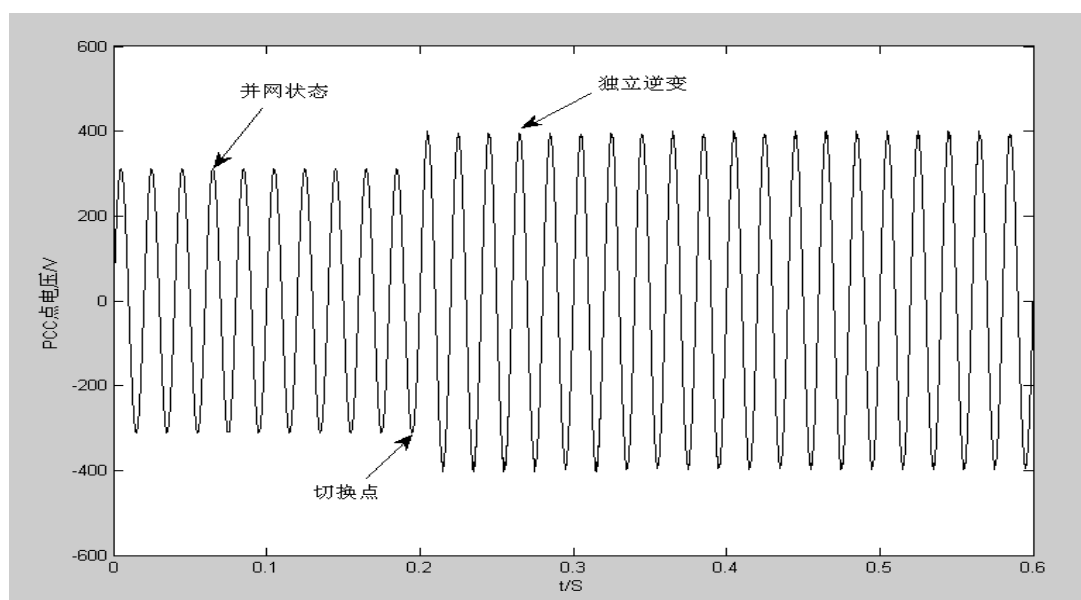


图 4-3 系统切换到离网状态的电压变化波形

仿真结束后, 示波器 3 的结果如图 4-4 所示, 蓝色为逆变器滤波器后的电流, 红色线为大电网的电压波形, 有结果可以明显看出电流电压同频。

该仿真模型有两个微电源，这两个微电源都是受控直流电压源，Source1 初始电压值为 800V，在仿真运行到 3 秒时，电压值变为 400V；Source2 初始电压值为 500V，当仿真运行到 2 秒时，电压值变为 700V。系统母线上的负载部分为纯电阻，电阻值为 100 欧姆。两个 Subsystem 模块是控制逆变器的部分，并产生 PWM 波，图 4-5 为其内部结构。端子 1 和端子 2 分别连接负载的两侧，负载的电压信号与需要跟踪的正弦信号（幅值为 311，频率 50Hz）进行比较，然后经过 PI 控制器实现实时跟踪的目的。进而达到逆变器出口侧输出电压为 311V，频率 50Hz 的电能。两个逆变器出口侧的滤波部分都采用两个电容和一个电感组成的 π 滤波器，且两个滤波器的各项参数都相同。仿真时间为 5 秒。

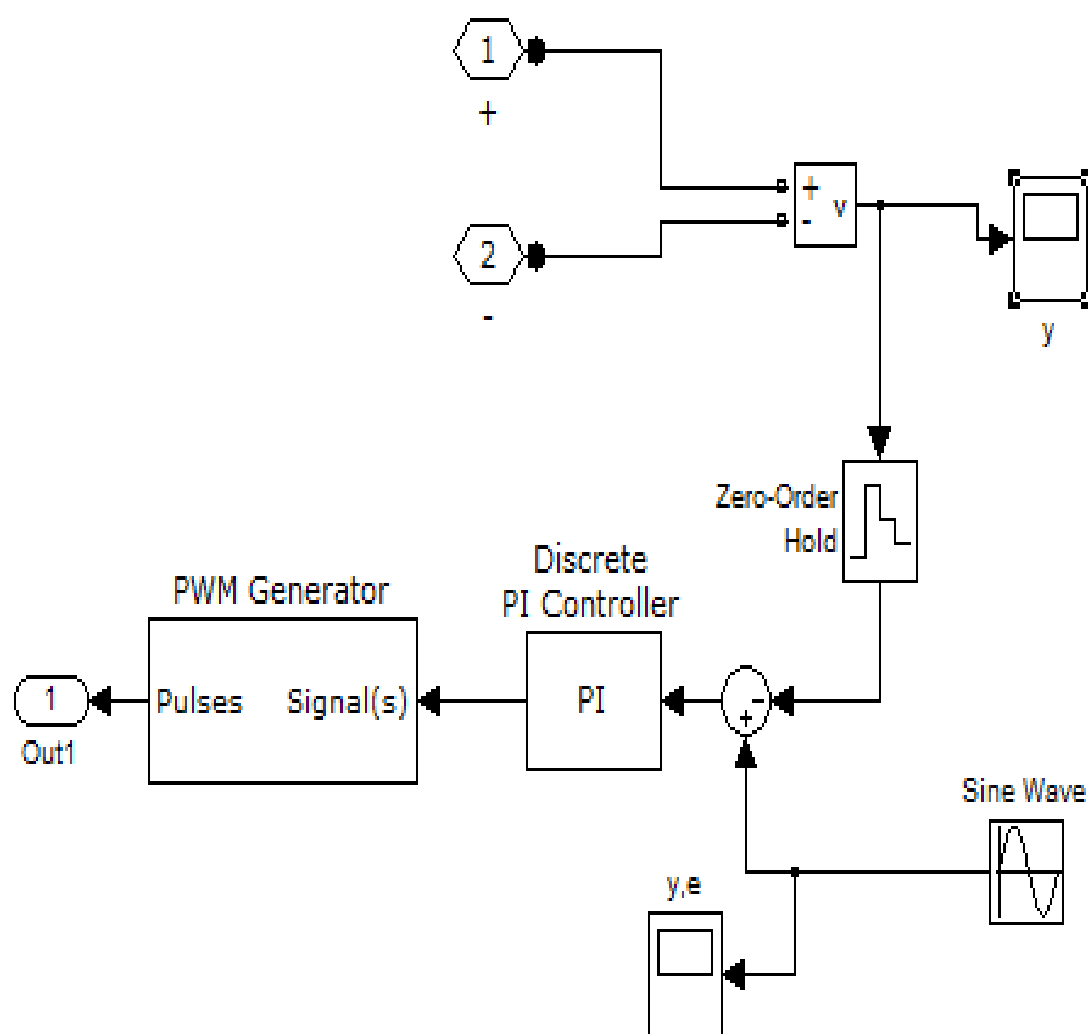


图 4-6 逆变器控制部分

仿真结束后，系统母线上的功率如图 4-7 所示（横轴为仿真时间，纵轴为电压值）可以看到在 2 秒时 Source2 的电压增加到 700V 的时候，功率有略微上升，当 3 秒

时 Source1 电压值将为 400V 时功率则明显下降。负载的电压和电流如下图 4-8 所示，在 2 秒前即 Source2 的电压值没有变化时，两个不同电压值的直流电源能够同时对负载供电，并能保持电压和频率的稳定；电源的电压在 2 秒和 3 秒的时候发生了变化，但在这两个时刻电流值没有变化，同时负载的电压和频率一直保持在稳定的状态，因此电源电压值的变化并没有对负载的正常运行造成影响。

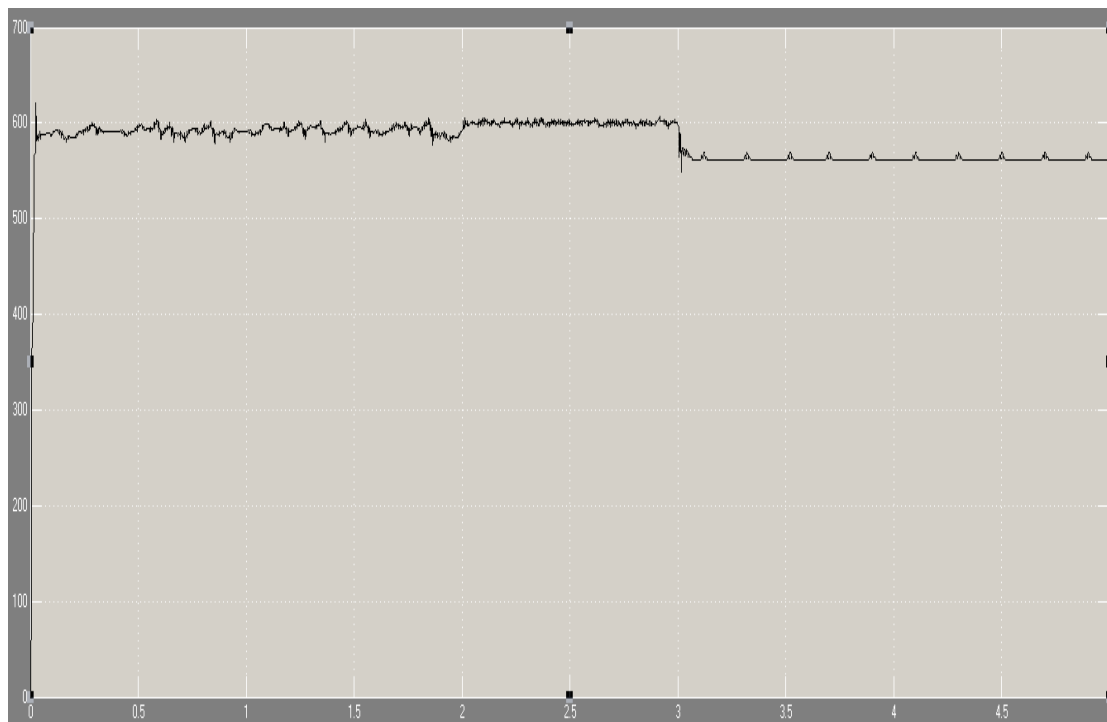


图 4-7 母线功率

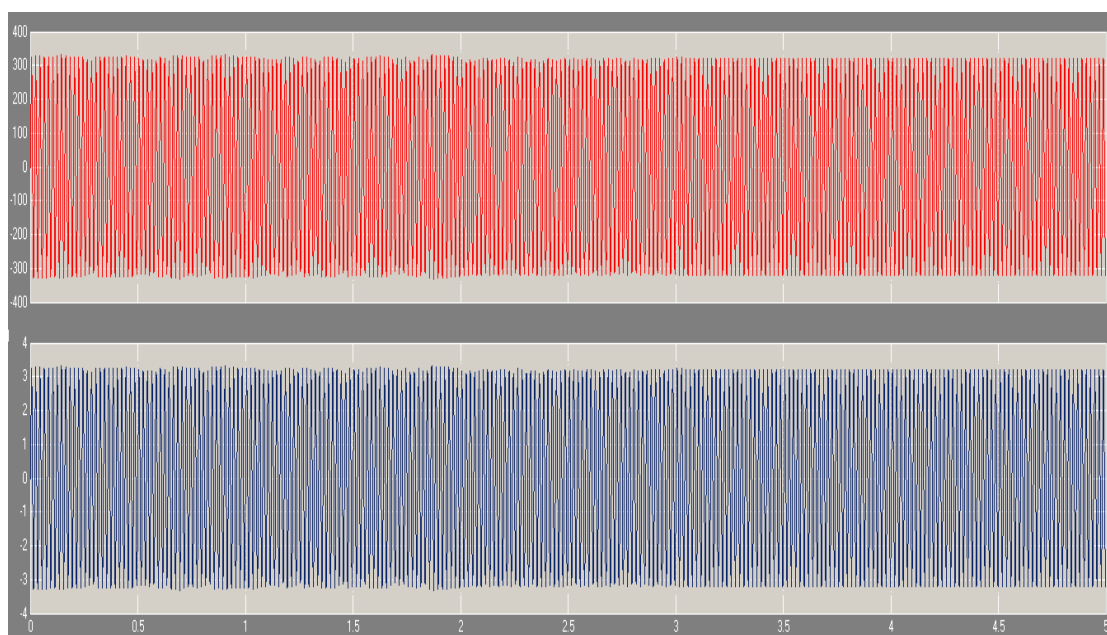


图 4-8 负载电压和电流

在该仿真算例中，模拟了两个不同电压值的直流电源经过逆变器向同一个负载功能的工况，在运行过程中模拟了电源电压跌落的情况，仿真结果表明电压跌落并没有影响负载的运行状态，系统运行状态良好。从上面的仿真算例可以看出，如果没有电压值跌落的干扰，采用 U/f 控制方法的微电源就变成恒频恒压的电源，这能够给孤网运行方式下的微电网系统提供稳定的电压和频率支持。

4.3 本章小结

本章对微电网两种运行方式，即并网运行方式和孤网运行方式，进行了仿真。针对不同的工况建立了不同的模型，采用了不同的控制方式。通过两个仿真算例，实现了微电网系统在不同运行方式下的正常运行。仿真结果表明采用适当的控制方式，微电网能高达电压和频率稳定的运行要求；同时，针对电源电压跌落的情况，微电网能够很好的维持系统内部典雅的稳定。

第 5 章 总结与展望

5.1 总结

微电网作为解决分布式发电接入大电网的重要途径之一，能够很好的控制分布式电源输出的频率和电压，是未来发展可再生能源并网和增加输电网络供电可靠性的重要技术保障。微电网的并网运行技术能够将多种分布式能源并入电网，使再生能源发电得到更大的发展和更高程度的商业化。微电网的孤网运行方式能够解决经济不发达地区和偏远地区的生活用电问题，避免了大量资金投入在输电线路建设从而造成成本回收周期长的问题，有助于偏远地区生活水平的提高。

本文在引出微电网的概念之后，对微电网的基本结构及内部各个部分进行了简单的介绍，分析了各部分在微网系统内的主要作用，除此之外还介绍了各种分布式能源和储能等相关技术。

在第二章对微电网的定义进行了阐述，并对微电网的主要构成部分和重要参数进行了简单的介绍，为了更好地研究微电网的运行，建立了基于 Matlab/Simulink 软件的光伏电池和风力发电机的模型，并且介绍了微电网并网和孤网两种运行方式以及各种控制策略的原理和。本文进行了微电网的建模仿真和研究：关于微电网和大电网并网运行的方式的仿真结果表明，在该运行方式下分布式电源可以采用双环电流控制的方法，使微电源输出的电流波形得到良好的控制，有效的解决了分布式电源并网运行的问题；在采用 U/f 控制方式的微网孤网运行的仿真中，通过对负载电压的测量和控制，使始终保持在要求的电压波形，并且达到了多个不同电压等级的分布式电源能够同时对一个负载供电，此外，系统还能抵抗一定程度的电压跌落问题，保证负载的电压和频率的稳定。

5.2 展望

随着分布式发电的发展，学界对微电网的研究也越来越广泛。国外经济发达地区的微电网研究已经取得了显著的成就，并且有的国家已经建立了微电网的示范园区，是微电网迈向工程实践的重要标志。反观我国的微电网研究还处在起步阶段，需要做的研究工作还有很多。本文所涉及的只是对微电网的并网和孤网两种运行方式控制策略的研究，除此之外，微电网的保护技术、微电网电能质量优化和微网经济运行等若干问题也是微电网研究的重要课题。

由于微电网具有自治的能力，对输电网络是种有效的补充方式，但微电网系统

多了之后带来的调度问题又对输电网络的综合控制形成了挑战。因此在未来多个微电网之间的协调通信必将成为研究的热点，当前已经有学者对多Agent技术在微网中的应用开始研究。但不可否认，在未来的能源供应中，微电网技术必将扮演重要的角色。

参考文献

- [1] 杨金焕, 于化丛, 葛亮. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 电子工业出版社, 2013: 2-6.
- [2] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术[M]. 北京.化学工业出版社, 2011: 50-65
- [3] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 79-80
- [4] 曹太强. 光伏发电系统及其控制技术研究[D]. 西南交通大学博士论文. 2011: 2-3
- [5] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京.科学出版社, 2005: 11-29
- [6] Gow J A, Manning C D. Photovoltaic converter system suitable for use in small scale stand-alone or grid-connected applications[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications,2000,147(6): 535-543
- [7] 沈国良, 赵旭升. 太阳能光伏发电系统的原理及其发展[J]. 科技创新导报, 2008, 1: 5-7
- [8] 张超. 光伏并网发电系统MPPT及孤岛检测新技术的研究[D]. 浙江大学博士论文. 2006:14-16
- [9] 付俊峰. 单相光伏发电并网系统研究[D]. 华中科技大学, 2011:3-5
- [10] 邓赞高, 胡立伟, 杜长泉. 太阳能光伏并网发电系统仿真研究[J]. 可再生能源, 2010, 6: 9-10
- [11] 王松. 一种基于神经网络的光伏电源最大功率控制系统. 山东大学学报. 2004,34(4):45-48
- [12] 张淼, 吴捷. 滑模技术在PV最大功率追踪系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 90-93
- [13] 杨海柱, 金新明. 最大功率跟踪的光伏并网逆变器研究[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(2): 65-68
- [14] John Stovens, Russell Bonn, Jerry Ginn. Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility-Interconnected Photovoltaic Systems [R]. SAND. Sandia National Laboratories, Photovoltaic System Applications Department, 2000.8
- [15] Zhihong Ye, Kolwalka A, Yu Zhang, Pengwei Du, Reigh Walling. Evaluation of Anti-islanding Schemes Based on Non-detection Zone Concept [C]. Power Electronics, IEEE Transactions on Volume19, Issues5, Sept. 2004:1171-1176
- [16] 曲正伟, 殷桂梁. 逆变电源并网运行的孤岛检测方法综述[J]. 中国电工技术学会电力电子学会2004年第九界学术年会, 2004: 338-3450
- [17] 郑诗程, 丁明, 苏建徽. 光伏发电系统及其孤岛效应的仿真与实验研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 3085-3088
- [18] 周德佳, 赵争鸣, 吴理博等. 基于仿真模型的太阳能光伏电池阵列特性的分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(7): 1109-1112

- [19] 崔岩等. 太阳能光伏模板仿真模型的研究. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 829-834
- [20] 张小平, 唐宇, 周玉荣, 刘洪, 曹太强. 光伏发电系统最大功率跟踪的研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(4): 564-569
- [21] Chihchiang Hua, Chihming Shen. Control of DC/DC Converters for Solar Energy System with Maximum Power Tracking [J]. IECON Proceedings, 1997,2: 827-832
- [22] Nobuyoshi Motuh, et al. Prediction-data-based maximum power point tracking method for photovoltaic power generation systems [C]. PESC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2002, 3: 1489-1494
- [23] A.ZAHEDL. Development of an Electrical Model for A PV/Battery System of Performance Prediction [J]. Renewable Energy. 1998, 15(1): 531-534
- [24] Enslin J H R, Wolf M S, Snyman D B, et. Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 1997, 44(6): 769-773
- [25] Veerachary M, Senjyu T, Uezato K. Feedforward maximum power point tracking of PV systems using fuzzy controller[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2002, 38(3): 969-981
- [26] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政. 单级式光伏并网逆变系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究. 中国电机工程学报[J], 2006, 26(6): 73-77
- [27] Tae-Yeop K, Ho-Gyun A, Seung Kyu P, et al. A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation.IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001. Proceedings. ISIE 2001 Pusan IEEE, 2001: 1011-1014
- [28] Salas V, Olias E, Barrado A, et al. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, 90(11): 1555-1578
- [29] Youngseok Jung, Junghun So, Gwonjong Yu, Jaeho Choi. Improved Perturbation and Observation Method (P&Q) of MPPT Control for Photovoltaic Power Systems. Photovoltaic Specialist Conference, 2005, 1788-1791
- [30] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有MPPT功能的光伏阵列Matlab通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2007, 17(5): 1248-1251
- [31] Eftichios Koutroulis, Kostas kalaitzakis, Nicholas C.Voulgaris. Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.16, No.1, Jan 2001, 46-54
- [32] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, Massimo Vitelli. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. IEEE Transactions on Power electronics, Vol.20, No.4, July 2005: 963-973
- [33] 张兴, 曹仁贤, 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M], 机械工业出版社, 2011:23-25
- [34] Shen G, Xu D, Cao L, et al. An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with an LCL filter[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2008, 23(4): 1899-1906
- [35] Jain S, Agarwal V. A single-stage grid connected inverter topology for solar PV

- systems with maximum power point tracking[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2007, 22(5): 1928-1940
- [36] Kerekes T, Teodorescu R, Borup U. Transformerless photovoltaic inverters connected to the grid[C]. Applied Power Electronics Conference, APEC 2007-Twenty Second Annual IEEE. IEEE, 2007: 1733-1737
- [37] Wai R J, Wang W H. Grid-connected photovoltaic generation system[J]. Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, 2008, 55(3): 953-964
- [38] 许颇, 张崇巍, 张兴等. 基于 Boost 变换器的光伏并网逆变控制系统研究[J]. 电源技术应用, 2006, 61(1): 12-15
- [39] CHENG J, WU X, LI S, et al. Boost-based Two-level Grid-connected Photovoltaic Inverter System [J]. High Voltage Engineering, 2009, 8: 2048-2052
- [40] 裴雪军, 段善旭, 康勇, 等. 基于重复控制与瞬时值反馈控制的逆变电源研究[J]. 电力电子技术, 2002, 36(1): 12-14
- [41] 陈东华, 谢少军, 周波. 瞬时值电流控制逆变技术比较[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(3): 343-347
- [42] 王飞, 余世杰, 苏建徽, 等. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 72-74
- [43] Hilloowala R.M, Sharaf A.M. A Rule-Based Fuzzy Logic Controller for a PWM Inverter in a stand Alone Wind Energy Conversion Scheme [C]. IEEE Trans. 1996, 32(1):249-252
- [44] Walker G R, Sernia P C. Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2004, 19(4): 1130-1139
- [45] Cheng Q M, Wang Y F, Cheng Y M, et al. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154
- [46] 赵飞, 梁志瑞, 王宁. 光伏并网发电系统孤岛检测技术[J]. 中国电力, 2010(005): 64-68
- [47] Hung G K, Chang C C, Chen C L. Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2003, 18(1): 169-173
- [48] Karimi H, Yazdani A, Iravani R. Negative-sequence current injection for fast islanding detection of a distributed resource unit[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2008, 23(1): 298-307
- [49] Liu F, Kang Y, Duan S. Analysis and optimization of active frequency drift islanding detection method[C]. Applied Power Electronics Conference, APEC 2007-Twenty Second Annual IEEE. IEEE, 2007: 1379-1384
- [50] Menon V, Nehrir M H. A hybrid islanding detection technique using voltage unbalance and frequency set point[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2007, 22(1): 442-448
- [51] 袁玲, 郑建勇, 张先飞. 光伏发电并网系统孤岛检测方法的分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 72-75

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

- [1] 杭少松. 浅谈微电网的发展及应用[J]. 仪器仪表用户, 2012, 04:29-32.

致谢

本学术论文是在林永君教授的悉心指导和帮助下完成的。林永君教授是我的指导教师，在我攻读硕士学位期间，林老师在学习、生活、研究等各个方面都给予了我非常大的帮助。林老师学识渊博、治学严谨、工作认真，是我学习的榜样。在林老师身上，我不仅学到专业领域知识，还学会了对人生的思考，对生活积极的态度，这些都将永远伴随我成长，令我收益终身。值此论文完成之际，特向恩师致以诚挚的谢意和深深的敬意。感谢刘卫亮老师在论文研究工作中给予的指导和帮助，从实验环境的建立、元器件的采购到课题研究、论文撰写等各个方面，刘老师都提供了巨大的帮助。在此特别向刘老师表示感谢。

衷心感谢杨春来师兄对我在逆变器控制方面进行的指导，以及对论文提出的宝贵的意见和建议。谢谢杨春来师兄各个方面的关心和照顾。

衷心感谢宿舍以及实验室跟我一同生活、学习的同学们，感谢闫飞朝硕士、赵瑞辉硕士、赵亮宇硕士、孙秋影硕士、李晗硕士、尹婷婷硕士、滑伟硕士、赵鹏硕士、冉宁硕士和董子健博士在学习和生活中给予的关心和照顾。

特别感谢在背后默默支持我的家人，他们的爱与关怀是我前进的动力，我会继续努力，好好工作。