

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_密级\_\_\_\_

学号: 32420131152289

UDC\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于混合储能的光伏直流微电网控制  
策略的研究

Control strategy research for PV DC microgrid  
with hybrid storage system

杨 贇

指导教师姓名: 张风燕 教授

专 业 名 称: 光 伏 工 程

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩日期: 2016 年 5 月

2016 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

以光伏、风电等可再生能源为主的分布式发电技术因为其随机性、不稳定性，对配电网潮流改变带来的安全性等问题，其发展得到一定的制约。微电网被广泛认为是解决分布式发电技术应用瓶颈的有效解决方案，而直流微电网以直流形式传输电能，控制结构简单，不需考虑频率和相位，系统损耗小，效率高，也更加适合越来越多的直流电器的接入，因此具有很强的推广实用价值。本文在研究了直流微电网的国内外研究发展现状、架构，以及包括控制技术、储能技术、保护技术等关键技术基础上，对包含有蓄电池和超级电容器在内的光伏直流微电网系统进行了研究。

首先对系统中的微电源，包括光伏电池、蓄电池和超级电容器的工作原理和数学模型做了研究。同时，对光伏发电系统提出了有针对性的基于变步长电导增量法的最大功率跟踪控制策略和恒压控制的两种模式；对系统中的储能单元设计了并联结构，同时对双向 DC-DC 变换器的充放电控制策略做了研究；对连接直流母线和交流市电的并网接口变换器设计了基于电网电压定向矢量控制策略。

其次，在研究了直流微电网系统稳定运行的原则基础上，提出了基于混合储能的母线电压分层协调控制策略，按照供电优先级从高到低：光伏、超级电容器、交流市电和蓄电池的运行逻辑，将系统运行工作模式分为四种常规模式、七个运行区间和两种紧急情况。这种控制策略可以充分发挥混合储能的各自优势，实现系统快速响应和安全可靠运行，到达系统长期的经济性，保证了系统运行相对独立性与可靠性，有很强的实用性。

最后在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建了所提出的直流微电网系统平台，实验结果证明了所提出的控制策略的有效性。

**关键词：**直流微电网 混合储能 光伏发电 协调控制

## Abstract

As the installed capacity increasing, the corresponding drawbacks of renewable energy such as photovoltaic and wind power began to emerge, like the instability and randomness of renewable energy. At the same time, the power flow direction changed and affect the safety of the system. They limit the application of the distributed generation technology. On this basis, the concept of microgrid is widely accepted and considered as an effective solution to solve the distributed generation technology application bottlenecks. In the classification of microgrid, DC microgrid has some advantages, like its simple controlling structure, the low system dissipation and so on. And it is more suitable for dc electrical access and has a strong practical value. Based on the development background and research status at the domestic and abroad, A DC microgrid including photovoltaic and hybrid energy storage was studied in this paper.

Firstly, the working principle and mathematical model of photovoltaic cells, batteries and super capacitor are researched in the second chapter. At the same time, the control strategy of the PV generation system is studied in detail, including the maximum power tracking control strategy based on variable step length conductance increment method and constant voltage control method. The paper also place a parallel structure in hybrid energy storage unit, which means each is connected with DC bus by its own bi-directional DC-DC converter. A three-phase full bridge topology is used as the converter between DC bus and grid, and the grid voltage oriented vector control strategy is also designed. The above control strategy is set up in MATLAB/Simulink platform and verified its validity.

Secondly, after listing the DC microgrid operation stability principle, the system control strategy based on bus voltage variation is proposed. The power supply priority is designed from high to low as: photovoltaic, super capacitor, AC grid and battery. The system operation mode can be divided into four kinds of conventional pattern, seven sections and two types of emergency operations. This control strategy can take full advantage of hybrid energy storage to achieve the long-term economic , and

guaranteeing the relative independence and reliability. So, this system has very strong practicability. Finally, the DC microgrid system model is set up in MATLAB/Simulink simulation platform and validated the effectiveness of the control strategy.

**Keywords:** DC microgrid; hybrid energy storage; photovoltaic generation; coordinated control

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 目 录

摘 要 .....	1
Abstract .....	1
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 课题背景及研究意义 .....	1
1.2 直流微电网发展现状 .....	2
1.2.1 直流微电网的特点 .....	2
1.2.2 直流微电网国内外研究与发展现状 .....	3
1.3 直流微电网关键技术 .....	6
1.3.1 直流微电网架构 .....	6
1.3.2 直流微电网控制技术 .....	8
1.3.3 直流微电网储能技术 .....	9
1.3.4 直流微电网保护技术 .....	9
1.4 本文主要内容 .....	12
<b>第二章 直流微电网微源模型及运行特性 .....</b>	<b>13</b>
2.1 直流微电网结构 .....	13
2.2 光伏电池单元建模、特性 .....	14
2.3 储能单元数学建模及特性 .....	18
2.3.1 蓄电池数学模型及特性 .....	19
2.3.2 超级电容器数学模型及特性 .....	21
2.4 本章小结 .....	23
<b>第三章 直流微电网微源控制策略分析 .....</b>	<b>24</b>
3.1 光伏发电单元控制及仿真 .....	24
3.1.1 光伏 MPPT 控制 .....	24
3.1.2 Boost DC-DC 变换器与仿真分析 .....	26
3.2 储能单元控制 .....	29
3.2.1 储能双向 DC-DC 变换器 .....	29

3.2.2 蓄电池储能系统控制与仿真.....	31
3.2.3 超级电容器控制与仿真.....	33
3.3 并网接口变换器建模与仿真.....	36
3.4 直流微电网大信号稳定性分析.....	41
3.5 本章小结.....	44
<b>第四章 基于混合储能的直流微电网的运行控制策略.....</b>	<b>45</b>
4.1 直流微电网运行基本原则.....	45
4.2 无通信互联的母线电压分层控制策略.....	46
4.3 系统总体协调控制.....	52
4.4 本章小结.....	54
<b>第五章 直流微电网的仿真研究.....</b>	<b>55</b>
5.1 系统仿真模型.....	55
5.2 模式 I 光伏独立供电仿真.....	55
5.3 模式 II 超级电容器控制仿真.....	57
5.4 模式 III 并网运行仿真分析.....	60
5.5 模式 IV 市电故障下后备储能控制仿真.....	64
5.6 本章小结.....	68
<b>结 论.....</b>	<b>69</b>
<b>参 考 文 献.....</b>	<b>71</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>77</b>

# Table of Contents

<b>Chinese abstract</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>I</b>
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Background of subject</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Development situation of DC microgrid</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Characteristics of DC microgrid .....	2
1.2.2 Research and development status of home and domestic .....	3
<b>1.3 Key technology of DC microgrid</b> .....	<b>6</b>
1.3.1 Architecture of DC microgrid .....	6
1.3.2 Control technology of DC microgrid .....	8
1.3.3 Energy storage technology of DC microgrid .....	9
1.3.4 Protection technology of DC microgrid .....	9
<b>1.4 Summary</b> .....	<b>12</b>
<b>Chapter 2 Micro source model and operating characteristics of DC microgrid</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 Structure of DC microgrid</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 Modeling and analysis of photovoltaic cells</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3 Modeling and analysis of energy storage unit</b> .....	<b>18</b>
2.3.1 Model and characteristic of battery.....	19
2.3.2 Model and characteristic of super capacitor .....	21
<b>2.4 Summary</b> .....	<b>23</b>
<b>Chapter 3 Control strategy analysis of micro source</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1 Control and simulation of photovoltaic generation system</b> .....	<b>24</b>
3.1.1 MPPT control of photovoltaic.....	24
3.1.2 Boost DC-DC converter and simulation analysis .....	26
<b>3.2 Control of energy storage unit</b> .....	<b>29</b>

3.2.1 Bi-directional DC-DC converter of energy storage .....	29
3.2.2 Control and simulation of battery .....	31
3.2.3 Control and simulation of super capacitor .....	33
<b>3.3 Modeling and simulation of grid interface converter .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4 Large signal stability analysis of DC microgrid .....</b>	<b>41</b>
<b>3.5 Summary .....</b>	<b>44</b>
<b>Chapter 4 Operation control strategy of DC microgrid based hybrid</b>	
<b>energy storage.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1 Operation basic principles of DC microgrid.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2 Bus voltage hierachical control strategy of DC microgrid without</b>	
<b>communication.....</b>	<b>46</b>
<b>4.3 Overall coordination control system.....</b>	<b>52</b>
<b>4.4 Summary .....</b>	<b>54</b>
<b>Chapter 5 Simulation research of DC microgrid .....</b>	<b>55</b>
<b>5.1 Simulation model of the system.....</b>	<b>55</b>
<b>5.2 Simulation of photovoltaic independent supply in model I .....</b>	<b>55</b>
<b>5.3 Simulation of super capacitor in model II .....</b>	<b>57</b>
<b>5.4 Simulation of grid-connected mode in model III .....</b>	<b>60</b>
<b>5.5 Simulation of battery in model IV .....</b>	<b>64</b>
<b>5.6 Summary .....</b>	<b>68</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>69</b>
<b>References .....</b>	<b>71</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>77</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 课题背景及研究意义

能源是人类赖以生存和社会得以发展的基础，电力是最清洁便利的能源品种，是国民经济发展的命脉。近年来，在化石能源逐渐枯竭、能源需求持续上升、环保问题日益凸显以及电网事故频发等多重压力下，基于可再生能源为主的分布式发电（Distributed Generation, DG）获得了越来越多的研究与应用。分布式发电技术主要包括太阳能、风能、生物质能、地热能、波浪能、小型燃气轮机等等<sup>[1]</sup>，小型分布式发电技术容量一般在几百千瓦以内，而大型分布式能源的可达到兆瓦级，分布式发电技术具有环保、节能、灵活等特点，主要安装在用户侧，是对大电网的有效补充。但是分布式发电具有较多的缺点与局限性，如目前分布式电源的装机成本仍然高于传统电源；众多的分布式电源的接入电网，使得电网结构由传统的单向潮流变成双向流动，光伏、风电、波浪能等新能源具有很强的间歇性、不确定性，缺乏可调度性，会对电网的稳定性和电能质量产生较大的影响，IEEE 1547 标准就对分布式电源并网做了严格的规定<sup>[2]</sup>。这些缺陷与规定也影响了分布式发电的大规模推广。

在此基础上，由 Robert Lasseter 等学者提出的微电网（Microgrid）被广泛认为是解决分布式电源并网难题的有效解决途径<sup>[3-4]</sup>。微电网是一种将多种分布式电源、负荷、储能装置及保护装置结合在一起的小型发配电系统，既可以并网运行，也可以独立运行在孤岛模式<sup>[5-6]</sup>。一方面微电网可以看作是一个局域的小型电力系统，可以完成发输配电功能，实现内部的功率平衡与能量优化，另一方面，微电网又可以看作是电力系统中的一个可控的负荷或电源<sup>[7]</sup>。

根据接入母线类型的不同，微电网可以分为交流、直流以及交直流混合微电网三种基本形式<sup>[8]</sup>。交流微电网目前得到较多应用，而随着直流负荷增加和直流类的微电源增多，直流微电网正受到越来越多的重视与研究<sup>[9]</sup>。和交流微电网相比，直流微电网中不需要对系统电压的相位和频率进行跟踪，可靠性和可控性都有了提高，更没有趋肤效应和交流损耗，也更适合直流微电源、储能单元与负载的接入。同时因为直流微电网仅需一级电能变换就能实现与直流微电源和负载的

连接，因此理论上具有更高转化效率；在输送过程中直流电不存在线路吸收的无功能量和配电线路中的涡流损耗，线路损耗进一步降低<sup>[10]</sup>。直流微电网为克服以往交流微电网面临的不足、供电质量低、投资成本高提供了新的解决方案，可以广泛应用在现代楼宇建筑、舰船、海岛、海上平台、工厂等场景。

## 1.2 直流微电网发展现状

### 1.2.1 直流微电网的特点

在直流微电网中，分布式电源、储能装置、负荷等通过直流母线相连，同时直流微电网通过电力电子装置与外部交流电网互联，如图 1.1 所示是直流微电网典型结构图。

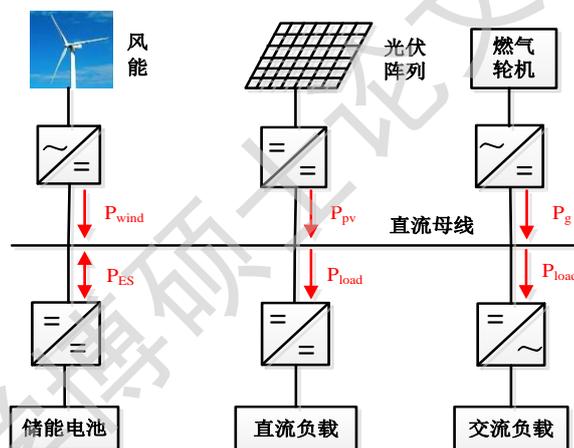


图 1.1 直流微电网结构图

直流微电网通过一个 DC-AC 变换器与交流电网连接，即可以实现能量的双向流动，又可以实现微电网系统与上级电网的完全解耦<sup>[11-12]</sup>。而系统内部，直流电源如光伏阵列、蓄电池、超级电容器、燃料电池，以及直流负荷、直流充电站等通过 DC-DC 变换器连接到直流母线上，交流电源如风机、燃气轮机、交流负荷通过 AC-DC 变换器连接至直流母线。微网内的储能设备有着维持系统内能量平衡、削峰填谷等作用，需要使用双向 DC-DC 变换器与母线相连<sup>[13]</sup>。

直流微电网相比较交流微电网而言有如下一些特点：

(1) 直流系统结构简单，直流电源只需要一个 DC-DC 变换器即可与直流母线相连，省去交流系统中存在的变换环节，降低了换流损耗，从而降低了微电网系统的总投资与运行费用。

(2) 直流微电网中不存在无功与相位的问题。直流系统中不存在无功电流分量, 在相同的有功功率情况下, 直流电流幅值更小、相应的损耗更小, 也使得系统电压分布与线路电感、电容参数无关, 更有利于电压控制<sup>[14]</sup>。

(3) 直流微电网中, 母线电压是反映系统功率平衡的最重要参考量, 所以在大部分的研究与应用中, 对直流微电网系统控制策略均是基于母线电压信号。

(4) 直流微电网有着更高的供电质量与供电可靠性, 因为直流变换减少了直交变换中的畸变与谐波, 同时与大电网相连的 DC-AC 变换器可以隔离交流市电的电能影响, 同时可以在大电网故障情况下切除大电网做孤岛运行, 从而提高了供电可靠性与质量。

(5) 在现代楼宇、城市供电中, 由于越来越多的直流负荷, 如家用电器、电机、直流 LED、直流充电桩等, 直流微电网具有更大的推广场景与成本优势。

虽然直流微电网有着较多优点, 但是其也面临着缺少直流配用电相关设备、直流断路器等级较低, 直流母线保护困难的难题, 加之直流负荷目前的规模仍然较小, 这些问题也在一定程度上制约了直流微电网的应用与大规模推广。

### 1.2.2 直流微电网国内外研究与发展现状

微电网的概念是由美国 University of Wisconsin-Madison 教授 Robert Lasseter 于 2001 年最先提出<sup>[15]</sup>, 而直流微电网是 2006 年被日本大阪大学 Hiroaki Kakigano 等人提出并系统性的阐述。近些年被逐步深化并得到广泛系统的研究, 但是直流供电系统早已经获得应用, 如在通信控制中心、数据中心通常采用直流方式连接主电源、负荷以及后备电源, 在军舰、航空等直流区域配电, 尤其是电力牵引直流供电技术已经成熟<sup>[16]</sup>。这些方面的研究基础为直流微电网的提出与发展提供良好的契机与驱动力。

国外的直流微电网研究与发展要早于国内, 在 2007 年, 美国弗吉利亚理工大学 (Center for Power Electronics System, CPES) 中心提出 SBI(Sustainable building initiative)和 SBN (Sustainable building nanogrid) 的研究计划, 其结构如下图所示, 系统包括光伏、风电、电动车、家用设备等单元, 设置了 380V/48V 的双母线结构, 为不同电压等级负荷供电, 其主要目标是为未来楼宇和家庭提供

绿色电力。随后，美国北卡罗来纳州大学于 2011 年提出了著名的 FREEDM 系统架构<sup>[17]</sup>，是指用直流供电构建未来灵活智能的可再生能源电力网络，交流微电网与直流微电网均通过 IEM（Intelligent Energy Management）接入电网<sup>[18]</sup>，系统中允许各类可再生能源和分布式储能系统即插即用，各类负荷均通过软件系统受到管理，其结构图如图 1.3 所示。

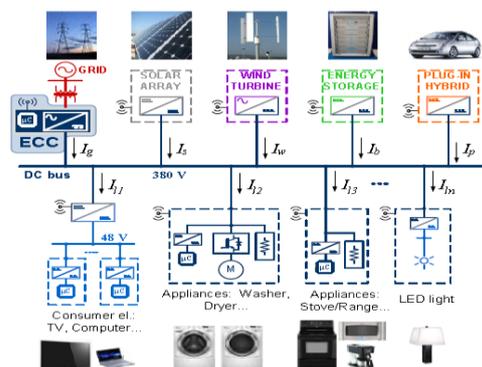


图 1.2 CPES 直流微电网图

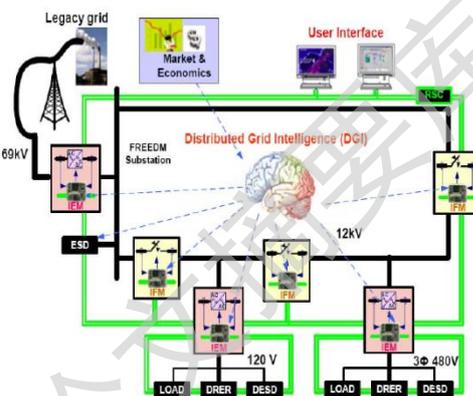


图 1.3 FREEDM 结构

日本的相关研究机构也开展了对直流微电网技术的研究。2004 年，东京工业大学提出了基于直流微电网的配电系统，并搭建一套 10KW 直流配电系统平台<sup>[19]</sup>。随后，大阪大学又提出了一种双极结构的直流微电网系统，母线电压等级为  $\pm 170V$ 。2010 年，日本东北大学建成一套应用在实验教学楼的直流供配电系统，包括光伏阵列、储能以及直流母线，同时还包括一些能量回收再利用装置。此外，日本株式会社和富士通共同研制了适用于 400V 直流系统的电源分配器以及电源插头<sup>[20]</sup>，其主要解决了直流电源电路开断时电弧放电问题，为直流电普及带来了希望。

2012 年，由德国、荷兰等国家高校和艾默生、西门子等企业联合开展了名为 DC Components and Grid(DCC+G)的研究项目，其主要目标是开发适用于未来建筑中的 380V 母线电压的直流供配电体系，以适应越来越多的低压直流负荷，包括应用大规模新型的半导体器件、微电子技术以及软件技术，开发出适用的熔断器、保护装置等等，最终达到系统整体相比于传统的交流网架能源效率提升 5%。此外，韩国为了解决其众多海岛供电问题以及本国的能源结构，也专门成立了智能微电网研究中心，计划用五年时间建立起直流微电网供电系统；中国台湾学者们对应用在直流微电网中关键设备，如双向逆变器，储能双向变换器做了

深入的研发，取得了较好的成果<sup>[21]</sup>。

目前上，已经有一些直流微电网相关的平台投入运行，包括罗马尼亚布加勒斯特大学直流微电网平台、爱知工业大学 AC/DC 混合微电网、丹麦 Aalborg 大学智能直流配电实验室、中国台湾国立中正大学实验室 demo-house、日本仙台市直流供电示范系统、日本福冈的夏普 DC House 等等。这些平台的相关研究工作实现了对直流微电网在实验室级、家庭、社区级的应用取得了重要突破。

我国微电网行业虽起步晚于国外，但是十二五期间，我国先后建设了多个微电网示范工程，如广东东澳岛，浙江东福山岛，南麂岛，天津生态城，海南三沙市等等。这些示范工程的成功经验极大地推动了微电网在我国的发展前景，2015年7月，国家能源局出台了“国家能源局关于推进新能源微电网示范项建设的指导意见”，微电网行业走向发展的快车道。相对而言，我国直流微电网行业尚处于起步阶段，国家从自然科学基金项目方面开始给予立项支持，如“直流微电网协调控制及其稳定性研究”、“针对直流微电网的分布式直流 DVR 系统研究”、“直流微电网分层分布式协同控制及稳定性研究”<sup>[22]</sup>。

太原理工大学开展了对直流微电网运行控制策略系统研究，包括新能源与混合储能系统结合、燃料电池、小型模拟风机等等，搭建了实验室试验平台，提出一种基于超级电容器、锂电池的混合储能系统(HESS)应用在直流微电网中<sup>[23-25]</sup>。武汉大学学者对直流微电网系统稳定性做了细致研究，提出基于 Lyapunov 稳定性理论，通过非线性反馈控制，克服直流微电网中恒功率负载的非线性影响，扩大系统稳定区域<sup>[26]</sup>。东南大学团队提出基于多代理系统的直流微电网稳定控制方案，在 JADE 平台上搭建直流微电网的多代理系统框架，设计代理任务和通信协议，利用代理的自治性和协作性，实现内部功率、微电网与配网间的功率合理分配<sup>[27]</sup>。北京理工大学的学者提出了一种基于博弈论的无互联线的直流微电网系统，通过引入虚拟对手的概念，分布式发电系统对自身成本和其他装置之间做出博弈，共同对直流母线电压进行控制，使直流母线电压和分布式发电装置电流达到纳什均衡<sup>[28]</sup>。中国石化中原石油工程公司首次将直流微电网技术应用在石油钻机装备上，其具备短时大功率输出能力，实现绞车大扭矩和低速度、调速范围宽的全电气驱动<sup>[29]</sup>。厦门大学于 2014 年建立了国内第一套实用型光伏直流微电网项目，有 150KW 光伏阵列、储能电池、交直流充电桩、直流空调、直流 LED 照明等，

这是国内第一套实际运行的直流微电网项目<sup>[30]</sup>。广东电网也在 2015 年建立了一套直流微电网系统，为微电网技术的标准制定了可靠的数据和实验依据。此外，天津大学、浙江大学、华北电力大学、中科院电工所、上海交通大学也开展了相关研究，建立了相应的直流微电网实验平台<sup>[31-34]</sup>。

## 1.3 直流微电网关键技术

### 1.3.1 直流微电网架构

按照母线的构成形式，直流微电网可以分为：单母线结构、辐射型母线结构、双极型母线结构和多直流微电网互联结构<sup>[35]</sup>。采用单母线结构的系统方便与现有的交流接线板等转接设备兼容，但在给电子低压设备供电时，变流器的电压应力较大，每个低压电子设备均需配备相应的电源适配器，如下图 1.4 (a) 所示；辐射型母线结构对单母线进行了拓展辐射，上层母线电压为 380V，下层母线电压可以为 110V/48V，往往是 380V 进入住宅后经过变换器降压为 110V、48V 甚至是 24V，以更加匹配现代家庭使用，如图 1.4 (b) 所示。这种辐射型母线结构减小了电源适配器的体积，也提高了低压设备供电的安全性，但现有的转接设备兼容较难，推广尚需时日。如图 1.4 (c) 所示，文献[36]所述的双极型母线结构直流微电网系统电压等级为 $\pm 170V$ ，采用中直接地的方式，它可根据负荷变换器对供电电压的不同需求由不同的母线进行供电，同时也增加了系统的可靠性，这种双母线结构的直流微电网可与现有的转接设备兼容，但由于电源侧变流器需要均衡主母线与从母线的电压，系统中各微电源、储能系统的变流器拓扑与常用的拓扑结构会有所不同。如图 1.4 (d) 所示，是一种多直流微电网互联的结构，其主要有两种互联方式，一是通过联络开关，但是其只能应用在同一电压等级的直流微电网间，同时无电气隔离；二是通过隔离型双向 DC-DC 变换器互联，实现电气隔离以及可靠互联，同时互为备用，这种多直流微电网互联（直流微电网群）的架构和运行模式将会是今后非常重要的领域<sup>[37]</sup>。

直流母线电压等级是影响系统运行效率、经济性、安全性的重要参数。首先，直流母线电压的选择会影响系统的一些参数：一是系统的效率，系统的效率与电源负载之间能量传递的效率紧密相关；二是系统的造价，不同电压等级决定了选用电缆线径的大小，因为变换器和电缆占系统造价的绝大部分，而变换器和电缆

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.