

能源基金会

The Energy Foundation

中国可持续能源项目

The China Sustainable Energy Program

研究报告

Research Report



分布式能源智能微网关键技术与发展

Research on the Key Technologies and Development
of Distributed Smart Micro-Grid

国家能源局微网工作组

2012.06

项目信息

项目编号: G-1107-14354

Grant Number: G-1107-14354

项目期: (7/1/2011 - 6/30/2012)

Grant Period: (7/1/2011 - 6/30/2012)

所属领域: 可再生能源

Sector: Renewable Energy

项目概述: 由国家能源局和美国能源基金会支持的“分布式能源智能微网关键技术及微网内各种电源组合配置研究”课题于 2011 年 6 月启动, 由中科院电工研究所负责牵头实施并组织开展。课题旨在促进智能微网在我国的推广应用, 为“十二五”期间我国微网示范工程的区域布局、技术方案以及管理机制提供技术和政策支持。课题实施过程中, 课题组分别对欧洲, 美国, 日本及国内的微网技术现状与发展趋势进行了深入调研, 完成了调研报告, 并在调研的基础上多次进行了项目研究讨论和方案完善。最终根据项目任务要求, 以及结合“十二五规划”落实的实际需求, 项目组完成了《分布式发电和智能微网技术国内外调研报告》、《分布式能源智能微网关键技术与发展》、《我国“十二五”规划微网示范实施方案建议》及《我国“十二五”分布式能源智能微网示范方案建议(简本)》四项成果。

Project Description: The project, “Research on key technologies of distributed smart micro-grid (DSMG) and the configuration of variety of power sources inside of the micro-grid”, supported by America Energy Foundation (EF) and National Energy Administration (NEA), was started in June 2011. Electrical Engineering Institute of Chinese Academy of Sciences (IEE CAS) is authorized as the leading organization and carried out the research activities. The purpose of the project is to promote the application of smart micro-grid in China during 12th FYP period, and providing the technical and policy supports in demonstration area arrangement, technical scenario and management mechanism. During the project implementation, the team made deep survey on the current status and development trend of DSMG in Europe, U.S., Japan and China. The report summarized the on-grid MG function, off-grid MG characteristics, and Chinese MG

technical problems related with off-grid operation, utility distribution grid and grid connection. As the results, according to the project requirements and NEA's comments, combined with the actual demand in 12th FYP, the project team completed the following four deliverables, which included “Survey Report on China Domestic & International Advanced Distributed Generation and Smart Micro-Grid Technology”, “Research on the Key Technologies and Development of Distributed Smart Micro-Grid”, “Recommendations on Implementation Scheme for Demonstration of Micro-grid Technology in China during 12th FYP”, and “Recommendation for China Nationwide Demonstration Plan of Distributed Smart Micro-Grid in 12th FYP (Brief Edition)”.

项目成员: 许洪华, 王成山, 王斯成, 吕芳, 王一波, 王伟胜, 何国庆, 陈默子, 于金辉, 刘莉敏, 都志杰, 张嘉, 李光辉, Chris Marnay, Zhou Nan

Project Members: XU Honghua , WANG Chengshan , WANG Sicheng , LV Fang , WANG Yibo , WANG Weisheng , HE Guoqing , CHEN Mozi , YU Jinhui , LIU Limin , DOU Zhijie , ZHANG Jia , LI Guanghui, Chris Marnay, Zhou Nan

项目单位: 中国科学院电工研究所; 天津大学; 中国电力科学研究院; 北京计科电可再生能源技术开发中心, 北京科诺伟业科技有限公司; 中国电子工程设计院, 美国劳伦斯伯克利国家实验室

Project Teams:Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences (IEE CAS); Tianjin University; China Electric Power Research Institute; Beijing JKD Renewable Energy Development Center (JKD) ; Beijing Corona Co.Ltd;China Electronics and Engineering Design Institute(CEEDI); Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)

关键词: 分布式发电 微网 关键技术 微网示范工程 实施建议

Key Words: Distributed Generation; Micro Grid(MG) ; Key Technology ;Demonstration Plan of MG; Implement Plan;

目 录

第一章. 概述.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 分布式发电.....	2
1.3 微网.....	3
1.4 微网研究和发展现状.....	6
第二章. 微网关键技术.....	9
2.1 引言.....	9
2.2 微网规划与设计.....	10
2.2 微网保护与控制.....	14
2.3 微网运行优化与能量管理.....	20
2.4 微网仿真与实验系统.....	24
2.5 微网关键装备.....	31
第三章. 独立型微网系统.....	33
3.1 发展现状.....	33
3.2 系统组成与配置原则.....	37
3.3 系统适用性分析.....	39
3.4 典型案例.....	40
第四章. 联网型微网系统.....	48
4.1 发展现状.....	48
4.2 系统组成与配置原则.....	55
4.3 微网与电网的相互影响.....	56
4.4 系统适用性分析.....	60
4.5 系统经济性分析.....	62
4.6 典型案例.....	65
第五章. 微网发展面临的问题与挑战.....	71
5.1 研究与开发.....	71
5.2 政策制定与实施.....	72
5.3 支撑体系建设.....	72
第六章. 微网发展前景展望.....	74

第一章 概述

1.1 引言

工业革命以来,人类社会的发展总是以同比于经济增长的能源消耗以及难以逆转的环境变化与影响为代价。时至今日,在世界范围内集中制约人类生产、生活的主要矛盾来源于环境、资源与能源三个方面,具体体现在:1)环境与资源对人类社会发展的制约;2)能源与环境同温室气体排放之间的矛盾;3)资源与能源在开发、利用效率上的平衡。

当前,我国正值经济、社会、民生飞速发展的重要阶段,在实现工业化、信息化及城镇化的过程中,上述矛盾、冲突与对立显得尤为突出。一方面,作为世界上最大的发展中国家及全球第二大能源消费国,我国需要价格合理、长期稳定的能源供给以保证经济的持续、快速增长。据海关总署统计,2009年我国进口原油约2.04亿吨,比上年增长约14%,石油消费的对外依存度已达52%,超过50%的警戒线。2009年年中发布的《能源蓝皮书》中预测,10年后中国的原油对外依存度将高达64.5%。保障能源供给与增加能源储备现已上升到国家安全的战略高度。

另一方面,我国同样也面临着严苛的环境问题,由于能源结构中煤炭的比例高达70%以上,我国是世界上最大的二氧化硫排放国,此外,水污染、土地荒漠化、水土流失、生物多样性破坏等问题也日趋严峻。近年来,我国极端地质灾害与气象灾害频发。2008年初,我国南方大部分地区发生了极为严重的雨雪冰冻灾害天气,其时间跨度之长、影响范围之广、降温幅度和降水强度之大为历史罕见。以电网为例,湖南、江西、浙江、贵州等省份均发生大范围倒塔、断线和闪络事故,电网运行遭到严重损害,仅贵州一省受影响的10千伏及以上线路就多达5072条,变电站648座,400伏及以下线路9875公里,因灾停电用户461万户,人口1817万。2009年12月,世界气候大会暨《联合国气候变化框架公约》缔约方第15次会议在丹麦首都哥本哈根举行,100多位国家、地区和国际组织的领导人与会。会前中国政府做出承诺,2020年单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降40%到45%。

现阶段，我国已提出构建和谐社会的发展思路，这也包括了社会发展同自然环境间的和谐与统一。然而，依靠传统的化石燃料似乎已很难继续维持经济、社会的健康、协调与可持续发展。因此，发展清洁、高效的可再生能源发电及相关的系统集成技术是能源工业发展的当务之急。

电力作为重要的二次能源，具有清洁、高效、方便使用的优点，是能源利用的最有效形式之一，由电力的生产、传输、分配与使用过程而构成的电力系统也成为当今人类构建的最为复杂的物理系统之一。因此，对各种新能源的开发和利用也应当通过电能的形式借助于传统电力系统来实现。当前，作为集中式发电的有效补充，分布式发电及其系统集成技术已日趋成熟。随着单位千瓦电能生产价格的不断下降以及政策层面的有力支持，分布式发电技术正得到越来越广泛的应用。

1.2 分布式发电

分布式发电是指利用各种可用的分散存在的能源，包括可再生能源（太阳能、生物质能、小型风能、小型水能、波浪能等）和本地可方便获取的化石类燃料（主要是天然气）进行发电供能的技术。小型的分布式电源容量通常在几百千瓦以内，大型的分布式电源容量可达到兆瓦级。灵活、经济与环保是分布式发电技术的主要优势，但同时一些可再生能源具有的间歇性和随机性等特点，使得这些电源仅依靠自身的调节能力满足负荷的功率平衡比较困难，通常还需要其他电源（内部或外部）的配合。

在欧洲，引起气候变化的 90% 的二氧化碳排放是由能源消费造成的。欧盟委员会在 2006 年发表的绿皮书《A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy》中强调，欧洲已经进入了一个新世纪，欧洲能源政策的核心是发展可持续的、具有竞争力的和安全供给的能源，并将通过连续一致的政策手段来达成此目的。为了降低化石燃料在能源生产中所占的比例，可再生能源及与之相关的分布式发电技术无疑是当前最具潜力的选择。为此，欧洲议会与欧盟委员会在其关于促进可再生能源发电的指导性文件（2001/77/EC）中订立了以下目标：1) 制定计划使得到 2010 年绿色电能在总用电量的比例从 14% 提高到 22%；2) 到 2010 年可再生能源占总能源消费的比例翻一番，即从 6% 提高到 12%；3) 进一步履行欧盟在《京都议定书》中关于温室气体减排的承诺。为此，欧盟在第五、

第六和第七框架计划（The 5th, 6th and 7th Framework Programme）的“能源、环境与可持续发展”主题下支持了一系列与可再生能源和分布式发电接入技术有关的研究项目。美国政府则通过资助其国内为数众多的研究机构、高等学校、电力企业和国家实验室开展专门的或交叉项目的研究。我国的可再生能源资源十分丰富，虽然经过一些开发，但整体利用水平依然很低，在发展速度和水平上还远低于大多数发达国家。我国已于 2006 年 1 月 1 日正式实施了《可再生能源法》，并由国家发改委编制了《可再生能源产业发展指导目录》，为可再生能源的发展提供了政策支持。另外，在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》中，能源也被放在了重点发展领域的首位，特别是其中第四和第五个优先主题都考虑了分布式发电技术的开发利用问题。。

各种分布式电源的并网发电对电力系统的安全稳定运行提出了新的挑战，一些分散的小容量分布式电源对于系统运行人员而言往往是“不可见”的，而一些集中的大型分布式电源又通常是“不可控”或“不易控”的。正像大容量风电场或大容量光伏电站的接入会对输电网的安全稳定运行带来诸多影响一样，当中低压配电系统中的分布式电源容量达到较高的比例（即高渗透率）时，要实现配电系统的功率平衡与安全运行，并保证用户的供电可靠性和电能质量也会有很大困难。分布式发电技术的多样性增加了并网运行的难度，独自并网的分布式电源易影响周边用户的供电质量，同时很难实现能源的综合优化，这些问题都制约着分布式发电技术的发展。总之，阻碍分布式发电获得广泛应用的难点不仅仅是分布式发电本身的技术壁垒，现有的电网技术也还不能完全适应分布式发电系统的接入要求。

1.3 微网

微网是指由分布式电源、能量转换装置、负荷、监控和保护装置等汇集而成的小型发配电系统，是一个能够实现自我控制和管理自治系统。微网可以看作是小型的电力系统，它具备完整的发电和配电功能，可以有效实现网内的能量优化。微网有时在满足网内用户电能需求的同时，还需满足网内用户热能的需求，此时的微网实际上是一个能源网。按照是否与常规电网联结，微网可分为联网型微网和独立型微网。

联网型微网：具有并网和独立两种运行模式。在并网工作模式下，一般与中、低压配电网并网运行，互为支撑，实现能量的双向交换。通过网内储能系统的充放电控制和分布式电源出力的协调控制，可以实现微网的经济运行，对电网发挥负荷移峰填谷的作用；也可实现微网和常规电网间交换功率的定值或定范围控制，减少由于分布式可再生能源发电功率的波动对电网的影响。利用能量管理系统，可有效提高分布式电源的能源利用率。在外部电网故障情况下，可转为独立运行模式，继续为微网内重要负荷供电，提高重要负荷的供电可靠性。通过采取先进的控制策略和控制手段，可保证微网高电能质量供电，也可以实现两种运行模式的无缝切换。

独立型微网：不和常规电网相连接，利用自身的分布式电源满足微网内负荷的长期供电需求。当网内存在可再生能源分布式电源时，常常需要配置储能系统以抑制这类电源的功率波动，同时在充分利用可再生能源的基础上，满足不同时段负荷的需求。这类微网更加适合在海岛、边远地区等地为用户供电。

微网技术的提出旨在中低压层面上实现分布式发电技术的灵活、高效应用，解决数量庞大、形式多样的分布式电源并网运行时的主要问题，同时由于具备一定的能量管理功能，并尽可能维持功率的局部优化与平衡，可有效降低系统运行人员的调度难度。特别地，联网型微网的独立运行模式可以在外部电网故障时继续向系统中的关键负荷供电，提高了用电的安全性和可靠性。在未来，微网技术是实现分布式发电系统大规模应用的关键技术之一。

从微观看，微网可以看做是小型的电力系统，具备完整的发输配电功能，可以实现局部的功率平衡与能量优化；从宏观看，微网又可以认为是配电系统中的一个“虚拟”的电源或负荷。现有研究和实践表明，将分布式电源以微网形式接入到电网中并网运行，与电网互为支撑，是发挥分布式电源效能的最有效方式，具有巨大的社会与经济意义，体现在：1) 可大大提高分布式电源的利用率；2) 有助于电网灾变时向重要负荷持续供电；3) 避免间歇式电源对周围用户电能质量的直接影响；4) 有助于可再生能源优化利用和电网的节能降损等多个方面。

为了满足不同的功能需求，微网可以有多种结构，如图 1-所示。微网的构成有时可以很简单，如：仅利用光伏发电系统和储能系统一起就可以构成一个简单的由用户所有的微网；有时其构成也可能十分复杂，如：可能由风力发电系统、

光伏发电系统、储能系统、以天然气为燃料的冷/热/电联供系统等分布式电源构成，一个微网内还可以含有若干个子微网。微网可以是用户级，中压配电馈线级，也可以是变电站级，后两种一般属于供电公司所有，实际上是智能配电系统的重要组成部分。

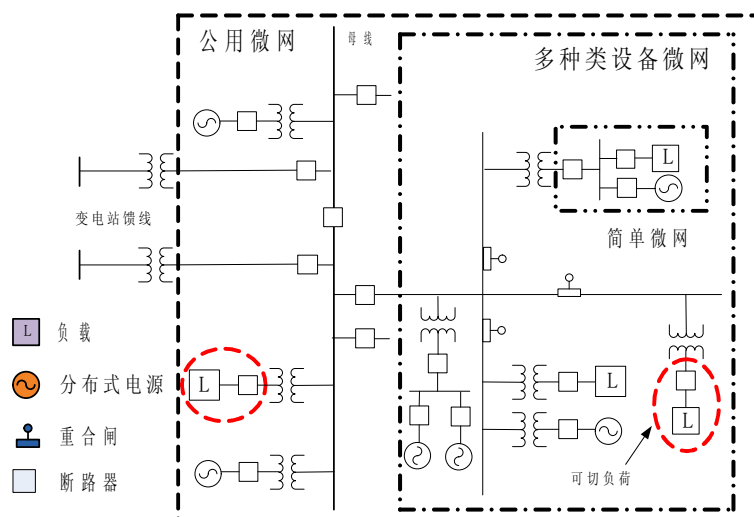


图 1-1 微网结构示意图

相对于简单微网，多种类设备微网的设计与运行则比较复杂，为此，网络中应配备一定数量的可切负荷，以便在紧急情况下的孤岛运行时维持微网的功率平衡。最后是微网的高级形式—公用微网，在公用微网中凡是满足一定技术条件的分布式电源和微网都可以接入，根据用户对可靠性的要求进行负荷分级，紧急情况下首先保证高优先级负荷的供电。微网的分层结构很好地解决了微网运行时的归属问题，对于简单微网可以由用户所有并管理，而公用微网则可由供电公司运营，对多种类设备微网可由微网业主运营。对属于用户的微网，只需要达到公共连接点（PCC）处的并网要求即可并网运行，供电公司则负责监测 PCC 的各种信息量并提供辅助服务。

微网的出现将完全改变配电系统的结构和运行特性，许多与输电系统安全性、保护与控制等相类似的问题也同样需要关注，但由于二者在功能、结构和运行方式上的不同，关注的重点与研究方法也将截然不同。微网的最终目标是实现各种分布式电源的无缝接入，即用户感受不到网络中分布式电源运行状态改变（并网或退出运行）及出力的变化而引起的波动，表现为用户侧的电能质量完全满足用户要求。实现这一目标关系到微网运行时的一系列复杂问题，包括：1）

微网的优化规划设计；2) 微网的保护与控制；3) 微网经济运行与能量优化管理；4) 微网的仿真分析等。

对于中国联网运行的微网，有可能出现三种商业模式，即以向电网输送电量为主要目的“外送型微网”，以自己用电为主要目的“自用型微网”，由独立运营商运营的“服务型微网”。

(1) 外送型微网以外送电力为主要目的，为没有调节能力的可再生能源发电系统配置储能单元，使得这类可再生能源发电系统能够具有调节能力，平抑可再生能源电力的波动性和不连续性，做到全天恒功率输出，甚至做到在峰值负荷时段多发，再谷值负荷时段少发，变为“电网友好型”的可再生能源发电单元。

(2) 自用电类型微网的对象属于一个单位或一个电力用户，为了强调自用原则，不鼓励向公共电网反送电，国家对微网内可再生能源发电单元按照分类进行电价补贴或对微网的建设统一给予初投资补贴。

(3) 服务型微网的对象是多用户，微网开发商属于独立电力经营者，为微网内的电力用户服务，开发商在微网内有定价权（一般要略低于电网电价）。对于联网运行的微网，其初投资由开发商承担，投标确定微网内电价，微网内自用电量由国家给予补贴；微网与大电网的交换电量按照等值原则交易：即向电网反送电量按照当地实际零售电价结算；电网向微网输送的电量亦按照当地实际零售电价计费。建立服务型微网的目的是探索在电力市场中引入竞争机制，打破目前中国电力市场的垄断局面，为今后电力体制改革摸索经验。

1.4 微网研究和发展现状

“微网”这个概念及其相关技术获得了世界很多国家的重视和推广，北美、欧盟、日本等国家和地区已加快进行微网的研究和建设，并根据各自的能源政策和电力系统的现有状况，提出了具有不同特色的微网概念和发展规划，在微网的运行、控制、保护、能量管理以及对电力系统的影响等方面进行了大量研究工作，已取得了一定进展。

欧盟第五框架计划（1998-2002）资助了“The Microgrids: Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids activity”项目，研究内容涉及九个方面：稳态与动态仿真工具；区域微源控制器的开发；微网中心控制器的开发；紧急功能模块的开发；安全性与保护需求；通讯设施与通信协议；微网管

制、商业化运行与环境影响；微网实验室建设；示范工程的系统性能评估。在此研究基础上，欧盟第六框架计划（2002-2006）资助的“Advanced Architectures and Control Concepts for More Microgrids”项目，计划通过微源和负荷控制器设计、各种控制策略的开发、各种微网结构的设计、多微网接入技术研究、商业化问题的解决、技术和商业协议以及硬件设备的标准化、对实际微网的现场测试和系统性能的评估，对电网设施发展影响的预测这八个领域的研究，力求深入和扩展对微网概念的理解，寻求新的微网控制策略和结构设计方法，开发适合微网管理运行的工具，以达到增加电网中分布式电源应用比例这一最终目标。

美国权威研究机构 CERTS 对微网的概念及热电联产式微网的发展做出了重要贡献。CERTS 在威斯康辛麦迪逊分校建立了自己的实验室规模的测试系统，并与美国电力公司合作，在俄亥俄州 Columbus 的 Dolan 技术中心建立了大规模的微网平台。美国电力管理部门与通用电气合作，建成了集控制、保护及能量管理于一体的微网平台。此外，加州也建成了商用微网 DUIT。北方电力和国家新能源实验室（NREL）在 Vermont 州建立了乡村微网，用于检验微网安装于乡村时所需要的技术革新和难点。

日本在分布式发电应用和微网展示工程建设方面已走在了世界的前列，为推动微网相关研究，日本专门成立了新能源综合开发机构（New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO）统一协调国内高校、企业与国家重点实验室对新能源及其应用的研究，建立了 Hachinohe, Aichi, Kyoto 和 Sendai 等微网展示工程。

近年来我国社会发展的目标已经发生了重要变化，建设资源节约、环境友好、可持续发展的社会成为全国上下的共识。作为新能源应用的有效形式，分布式发电智能微网相关技术的研究得到了国家的高度重视。2008 年国家科技部通过“973”计划项目专门资助了分布式发电供能系统的相关基础研究，重点解决微网发展过程中所遇到的一系列关键技术问题。国家 863 项目也支持了多个项目，其内容涉及微网控制策略、能量管理、储能、示范工程建设等多个方面。到目前为止，天津大学、中科院电工所、合肥工业大学、中国电科院等高校和研究机构，均建立了微网测试平台，以进行微网领域的相关研究工作。但总的来看，微网的研究在中国仍处于起步阶段，离商业化还有一定的距离。但随着中国电力体制改

革的深入完善、电网结构的不断调整和发展方式的逐步转变，将给微网建设和发展带来巨大的发展机遇。微网作为智能电网的有机组成部分，着眼中国实际国情，将包容性、灵活性、定制性、经济性和自治性作为微网发展的基本方向，立足技术的开发与创新，将实用化、商业化作为目标，积极推进微网在中国的发展和应用意义重大。

第二章 微网关键技术

2.1 引言

微网作为分布式电源并网发电的一种新的组织形式。广义来说,各种可能发电方式都可以在微网中获得应用,所以风能、太阳能、水能、地热能、海洋能、热电联产机组、燃料电池等发电形式均可作为分布式电源。由于大部分分布式电源其输出电能的频率都不是工频,例如采用直趋式微型燃气轮机的旋转速度一般在每分钟几万转,PV、燃料电池等输出的是直流电,所以这类分布式电源一般需要使用电力电子装置作为接口连接到微网。而大量电力电子装置的使用使得微网缺乏惯性,同时由于可再生能源的间歇特性,储能装置成为微网内必不可少的选择。常见的储能装置包括:蓄电池,飞轮储能,超级电容,超级电感等。

微网中的分布式电源(包括储能设备)按照是否通过逆变器接口可分为以下两大类。(1)使用逆变器接口:PV,燃气轮机,燃料电池,蓄电池,飞轮储能,超级电容等;(2)无逆变器接口:小风机,柴油发电机,小水电机组等。由微网的定义可知,微网有如下四个特点:

1)微网中的分布式电源互相之间一般有一定的地理距离。由于微网中常采用多种分布式能源,而太阳能发电、风力发电等方式受天气条件制约,所以一般要根据其实际地理条件选择分布式电源安装位置,因地制宜是分布式电源安装的基本原则之一。

2)微网中使用大量的电力电子装置作为接口,使得微网内的分布式电源相对于传统大发电机惯性很小或无惯性。同时,由于电力电子装置响应速度快且输出阻抗小,导致逆变器接口的分布式电源过负载能力低。

3)由于微网惯性很小或无惯性,在能量需求变化的瞬间分布式电源无法满足其需求,所以很多微网需要依赖储能装置来达到能量平衡,储能装置常常是维持系统暂态稳定必不可少的设备。

无论是联网型微网还是独立型微网,由于其电源构成、结构方式、运行模式等与常规电网都有很大的不同,这使得其在规划与设计、保护与控制、运行优化与能量管理、仿真分析等方面都有其自己的特点,需要采用专有的方法或技术加以解决。

2.2 微网规划与设计

2.1.1 问题提出

随着分布式电源（distributed generation, DG）渗透率的不断提高以及智能电网（smart grid, SG）的发展，微网在提高 DG 尤其是间歇性可再生能源渗透率、能源利用效率、供电可靠性、减少有害气体排放水平等方面的优势越加明显。

微网工程的建设需要充分的技术和经济分析，技术可行性分析决定了微网工程能否建立，经济可行性分析则是微网是否具备建设和运行经济性的关键。相对于传统电网，微网建设运行更为复杂—需要考虑风/光/气、冷/热/电等不同形式能源的合理配置与科学调度，这使得微网规划设计的不确定性和复杂度都大大增加，尤其是目前微网还面临着 DG 成本高、技术经验不足、标准缺乏、行政政策障碍以及市场垄断等一系列挑战，只有合理确定微网结构及容量配置，才能保证微网以较低的成本取得最大的效益，进而达到示范、推广的目的。因此，微网规划设计对于微网工程建设至关重要。

微网按照是否与电网连接，可分为联网型微网和独立型微网。联网型微网与电网并联为用户供电，其主要优化目标是增大微网收益；独立型微网主要优化目标是保证供电可靠性的前提下降低供电成本。各地自然资源、能源、电力价格、负荷需求、环境不同，微网发展建设动力也会有所不同，微网规划设计的优化目标也会不同。要保证微网工程经济性可行，需要分别对联网型和独立型微网进行详细全面的成本效益分析。

针对联网型微网，其效益可从电网、用户、环保等角度加以体现。从电网角度看，微网最大的优势在于可被电网视为可控单元，便于将传统的被动配电网（passive distribution network, PDN）转化为新型主动配电网（active distribution network, ADN）。具体来说有如下效益：1）提高 DG 尤其是非传统和可再生能源渗透率/利用率；2）推迟电网升级改造，提高设备利用率；3）减少输配电网（T&D）网损；4）提高供电安全性和可靠性；5）为电网提供辅助服务，如无功补偿、运行备用、黑启动等。从用户角度看，微网有如下效益：1）降低购电费用；2）提高能源利用率；3）减少用户配电站建设容量；4）降低能量损耗（电能和热能损耗）；5）降低停电损失；6）通过为不同可靠性需求用户提供可定制电源，降低供电成本；7）为电网提供本地无功补偿、运行备用、黑启动等辅助

服务获得收益。从环保角度看，微网可降低污染物及温室气体排放水平。联网型微网成本主要包括从电网购电成本、供热成本、DG 全寿命周期成本（包括按 DG 寿命周期折算为等年值的初始投资成本、运行维护成本以及燃料成本）、停电损失以及污染物排放/治理成本等。

针对独立型微网，其效益也可从电网、用户、环保等角度体现。从电网角度看，独立型微网便于向电网难以到达的偏远地区（如海岛、山区）负荷供电，以节省巨额的电网投资。从用户角度来看，独立型微网有如下效益：1）通过为不同可靠性需求用户提供可定制电源，降低供电成本；2）降低化石燃料消耗；3）减少停电损失。从环保角度看，降低污染物及温室气体排放水平。联网型微网成本主要包括 DG 全寿命周期成本（包括按 DG 寿命周期折算为等年值的初始投资成本、运行维护成本以及燃料成本）、停电损失以及污染物排放/治理成本等。

综上所述，微网工程建设需要考虑风/光/气；冷/热/电等不同形式能源的合理配置与科学调度，建设运行比传统电网更加复杂。此外，微网还面临着 DG 成本过高、技术经验不足、标准缺乏、行政政策障碍以及市场垄断等一系列挑战。为了更好的指导微网工程项目建设，必须对微网进行合理的规划设计，从电网、用户、环保等多个角度全面详细的分析并网型和独立型微网的成本效益，以便使微网的建设达到效益最大化的目标

2.1.2 研究现状

关于微网规划与设计的研究工作，自微网概念提出时起就一直受到研究者的关注，目前已经取得了一些有价值的实用型研究成果。比较有代表性的有美国电力可靠性技术协会（Consortium for Electric Reliability Solutions, CERTS）开发的 DER-CAM、 $\mu Grid$ 软件；美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory, NREL）开发的 HOMER、HYBRID 软件；克罗地亚萨格勒布大学（University of Zagreb）开发的 H2RES 软件；中国科学院广州能源研究所提出的分布式能源系统优化设计软件。这些软件按照功能的不同可划分为微网能源优化规划和微网仿真分析两大类，后者常常被看作是前者的依据和基础。

1. 微网能源优化规划

1) DER-CAM

分布式能源客户选择模型（Distributed Energy Resources Customer Adoption Model, DER-CAM）是 CERTS “微网研究与示范工程项目”进行的软件开发项目之一。该模型最早由伯克利实验室的 Chris Marnay 等人于 2000 年提出的分布式电源客户选择经济模型发展而来。DER-CAM 能够以微网年供能成本最低和/或二氧化碳排放量最低为优化目标,确定微网内部分布式能源最优的容量组合以及相应的运行计划,尤其适合含冷/热/电联供系统(combined heat and power, CHP)的微网容量优化。目前该模型能够考虑光热(solar thermal)、光电(PV)、传统/新型发电机、CHP、热/电储能、热泵(heat pump, HP)、吸收式制冷机(absorption cooling)、电动汽车(electrical vehicle, EV)等多种分布式能源和储能设施。该软件略显不足之处在于只考虑并网运行这一场景,无法体现微网孤岛运行时对可靠性提高的作用。此外,DER-CAM 没有对微网进行网络建模,主要适用于容量为 250~2000kW 的建筑微网的能源规划设计。

2) HOMER

HOMER 是 NREL 资助的于 1993 年开发的混合型可再生能源建模分析软件,用于辅助设计混合发电系统并比较不同的发电技术。HOMER 模型能够体现微网系统的特性及全寿命周期成本,搭建不同的系统结构并对其进行技术经济性比较,同时对输入数据的不确定性进行定量分析。

HOMER 的优点在于其灵活的系统建模能力,能够对多种可再生能源、发电技术进行建模仿真,储能模型考虑了飞轮、蓄电池、液流电池以及氢储能。能够对并网型和独立型微网系统进行建模仿真,支持基于全年 8760 小时能量平衡仿真的系统容量优化功能以及参数灵敏度分析。此外, HOMER 还能提供不同系统配置下详细的经济分析结果。但作为能源规划分析软件, HOMER 也没有对网络进行建模。

3) H2RES

H2RES 是由克罗地亚萨格勒布大学于 2000 年开发的能源规划程序。该程序能够模拟不同研究场景(不同可再生、间歇式能源渗透率、不同发电技术)下能源需求(水、电、热、氢)、储能(氢储能、抽水蓄能、蓄电池)与供给(风、光、水力、地热、生物质、化石燃料或电网)之间的平衡。H2RES 模型尤其适合提高海岛、偏远山区等独立型系统或与电网连接比较脆弱的并网型系统的可再

生能源渗透率及利用率。此外，H2RES 也可以作为单个风能、水力、光伏发电并网的辅助规划工具。

4) 分布式能源系统优化设计软件

中国科学院广州能源研究所空调与蓄能技术实验室集中了多个领域的优势科研力量，研发出了一套分布式能源系统优化软件，可根据用户的电、热、冷负荷，对各种冷热电联供（combined cooling, heating and power, CCHP）系统进行优化控制，以获得较高的能效输出。

2、微网仿真分析

1) HYBRID2

HYBRID2 是 NREL 于 1996 年资助开发的混合发电系统仿真软件。HYBRID2 采用概率时序仿真模型，能够对风/光/柴/蓄混合发电系统进行技术、经济分析，可用于并网、孤岛混合发电系统的工程级仿真。

与 HOMER 相比，HYBRID2 的优点在于其更为详细、准确的系统建模能力，其元件模型、控制策略比 HOMER 都要详细，其概率时序仿真模型，弥补了准稳态仿真模型不能考虑参数波动，如风速、负荷波动的不足。详细的元件模型、控制策略及仿真模型，使得 HYBRID2 的仿真结果更加准确。但 HYBRID2 的系统建模灵活度不如 HOMER，且不具备系统容量优化及参数灵敏度分析功能，同样没有对微网内部的实际网络进行建模，故不适宜单独用于微网系统的规划设计。

2) $\mu Grid$

$\mu Grid$ 是由佐治亚理工学院正在开发的微网仿真工具。针对微网设备类型繁多、结构灵活而导致微网仿真建模工作的挑战， $\mu Grid$ 具备较强的建模仿真分析功能，包括考虑三相不平衡、不同步、设备老化等因素的三相、单项及二次电路建模、分析。同时， $\mu Grid$ 还能对微网元件及其对微网系统稳定性影响的动态特性进行分析校验。 $\mu Grid$ 具有较强的微网建模、仿真、分析能力，但不具备微网规划优化功能。

2.1.3 方法与挑战

微网内部设备类型繁多，结构、运行灵活，微网规划设计涉及风/光/气；冷/热/电等不同形式能源的合理配置与科学调度，其不确定性和复杂度都大大增加；微网优势体现在技术、经济、环保、社会等多个方面，需从可靠性、全寿命周期内成本、污染物及温室气体排放水平、能源利用效率、化石燃料消耗等多个方面对微网规划设计进行综合评价；微网规划设计不仅要确定最优的容量配置，还要确定最优的网络结构及分布式能源位置，需要对微网进行能源、网络综合规划设计。因此，微网规划设计本质上是多场景、多目标、非线性、混合整数、不确定性综合规划问题。目前研究提出的微网规划设计方案优化目标不够灵活、全面，不能从技术、经济、环保、社会等多方面综合评价微网的潜力；大多缺乏网络建模及其相应的优化；缺乏对电网、微网内部元件的可靠性建模及停电损失的分析。特别需要指出的是，由于微网中可再生能源的波动性，规划工作需要考虑到微网的全年运行工况，使得规划工作和微网本身的运行策略密切相关，这就需要将规划与仿真软件加以结合，在考虑微网实际运行控制策略的基础上获取系统的规划结果。上述因素使得微网规划设计工作仍需要大量的探索性工作，目前还没有提出能够高效、全面、准确解决微网规划设计问题的方法和成熟的软件，在微网规划设计方面仍面临挑战。

2.2 微网保护与控制

2.2.1 问题提出

微网内分布式电源类型多，如光伏发电、风力发电、微型燃气轮机、储能等输出均为直流电或高频交流电，因此为满足供电需求，DC/DC 或 DC/AC 等变流器通常作为分布式电源接入电网的能量变换接口装置。基于变流器的分布式电源提供的短路电流大小通常与变流器控制方式相关，传统的过电流保护不再适用于微网，有必要寻求新的继电保护原理；微网内不同类型分布式电源运行特性不同，即使同一类型分布式电源，受容量、接入点位置，尤其是微网运行模式的影响，也可能具有不同的运行模式（如并网和独立运行模式）和控制方式（功率型控制和电压源型控制方式等），而分布式电源的控制在很大程度上取决于相应变流器的控制策略，为满足微网对分布式电源控制的不同功能需求，需要研究更加智能、先进的变流器控制技术。

微网具有并网和独立两种运行模式，并且需要在不同运行模式切换过程中尽可能地平稳过渡，即实现无缝切换。微网与大电网的公共联结点（PCC）处的静态开关及其相应的继电保护特性的定义是微网继电保护的难点。微网保护必须能够准确判断外部电网的各种故障并迅速作出反应，决定微网是否需要解列进入独立运行。微网并网运行时若发生内部故障，在允许其与大电网之间的潮流双向流动前提下，会使原有公共配电网电流大小、分布和方向发生变化，从而可能引起原有配电系统保护的误动、拒动和灵敏度降低，因此微网保护必须能够迅速切除故障部分，不致对配电系统原有保护造成影响；若微网独立运行时发生内部故障，须快速切除故障部分保证设备安全及微网其余部分安全稳定运行。微网控制包括并网控制和独立控制，并网控制需确保微网作为一个可控调度单元，跟踪中央控制器下发的功率调度指令，必要时对大电网提供频率/电压支撑；独立控制应能保证微网内电压和频率稳定。为了满足不同控制模式下的要求，同时保证两种运行模式之间的平滑切换，微网内各分布式电源之间的协调控制是微网控制技术的关键和难点。

综上所述，微网保护与控制方面的研究对保证微网可靠、安全与稳定运行具有重要理论和实际意义。微网保护既要克服微网接入对传统配电系统保护带来的影响，又要满足含微网配电系统对保护提出的新要求，同时微网保护必须与微网的运行特性、控制原理及对故障的响应特性结合起来；微网控制包含系统级控制（并网和独立控制），也包含设备级控制（分布式电源及其相应变流器控制）。同时由于微网中大量电力电子装置的存在，使微网或本地配网某些电能质量指标得到改善的同时，也可能使其他方面的指标恶化，因此微网的控制还应包含电能质量综合控制。微网保护和控制技术是目前分布式发电供能微网系统广泛应用的主要技术瓶颈之一。

2.2.2 研究现状

在微网概念引入之前，世界各国一般均不允许分布式电源孤岛运行，均采用系统故障时主动将分布式电源退出的保护控制方案，目的就是确保在系统侧故障的情况下可靠地将分布式电源退出运行，防止非计划孤岛运行状态的发生。微网技术出现后，分布式电源不再以独立发电设备的形式并网，而是与当地负荷、储能系统、控制系统等组成微网后再与配电系统并网，配电系统故障时，也不再直

接将分布式电源退出，而是允许分布式电源带微网内的重要负荷继续运行。微网保护研究主要针对三类故障情况：微网并网运行时外部电网故障、微网内部故障、微网独立运行时微网内部故障。微网并网会导致配电网电流大小、方向和分布发生变化，有可能对传统配电网继电保护带来不利影响。国内外学者对这方面的研究主要关注是如何在不影响或尽可能使传统配电网继电保护受到影响最小的情况下应对微网系统的接入，提出了含逆变器型分布式电源配电网的自适应电流保护方案，能根据系统当前运行状态和故障类型，自适应及实时调整保护定值；依靠可靠的通信网络，采用多代理系统实现保护间的协调；为有效降低故障电流，在配网内接入故障限流器，用以保障保护的灵敏性与选择性。国内有学者提出微网系统级保护和单元级保护的方案，以合理配置微网的继电保护。微网系统级保护主要目的是确保在公共电网发生永久性故障或微网运行状态不符合 IEEE1574 标准时，微网能够迅速、平滑进入独立运行，减轻微网接入对配网的影响，同时保证微网能够安全过渡至新的稳态；微网单元级保护能够处理微网并网运行时的各种内部故障，微网解列进入独立运行模式后，若微网内部发生故障能够迅速切除故障部分，保证其余部分安全稳定运行。虽然国内外已经进行了不少国内外微网保护研究，提出了诸如自适应保护、网络化数字保护等新原理和新技术，微网保护研究仍是当前继电保护领域的热点研究问题。

目前国内外微网控制研究主要关注微网内分布式电源设备级控制和微网系统级控制两方面。分布式电源设备级控制即逆变器控制，主要提出了电压源型控制和功率型控制两种方式：1) 电压源型控制又可分为恒频恒压控制 (V/f 控制) 和下垂控制 (Droop 控制)，其中 V/f 控制逆变器输出端口电压幅值和频率维持不变，该控制方式主要应用于微网独立运行时，电网建立单元采用该控制方法建立微网交流母线电压和频率，但是该控制方式不能作为逆变器并网运行的控制方式；Droop 控制时逆变器出口电压和频率随输出功率发生变化，类似于传统的同步发电机运行特性，采用该控制方式的分布式电源可以运行在并网和独立两种模式下。2) 功率型控制实质为直接电流控制方式，其控制目标是逆变器与交流母线之间的交换功率，该类控制一般都会采用双环控制，内环基本都为电流闭环，外环则由分布式电源的特性和功能来决定，如最大功率跟踪 (MPPT)、恒功率 (PQ) 及下垂 (Droop) 等，其中 MPPT 主要适用于光伏、风力发电等间歇性分布式电源，PQ 主要应用于燃料电池等可控单元，Droop 控制能对系统频率和电

压变化作出动态响应，对电网起支撑作用，主要应用在蓄电池储能单元。采用功率型逆变器控制的分布式电源只能工作于并网运行状态，即其能稳定运行的前提是逆变器交流侧有电压和频率参考。

微网系统级控制通常与微网运行模式相关，微网不同运行方式下，微网控制功能和实现目的不同。并网运行时，由于外部电网提供电压和频率支撑，微网控制研究和关注的重点是由不同类型分布式电源组成的微网能否跟踪中心控制器的功率指令，目前国内外学者主要提出基于中心控制器的分层控制策略。日本微网展示项目，包括 Archi 微网，Kyoto 微网，Hachinohe 微网等，提出一种微网的两层控制结构。中心控制器首先对 DG 发电功率和负荷需求量进行预测，然后制定相应运行计划，并根据采集的电压、电流、功率等状态信息，对运行计划进行实时调整，控制各 DG、负荷和储能装置的起停。欧盟多微网项目“多微网结构与控制”中，提供了三层控制结构。最上层的配电网操作管理系统主要负责根据市场和调度需求来管理和调度系统中的多个微网；中间层的微网中心控制器（微网 CC）负责最大化微网价值的实现和优化微网操作；下层控制器主要包括分布式电源控制器和负荷控制器，负责微网的暂态功率平衡和切负荷管理。整个分层控制采用多 agent 技术实现。微网独立运行时，为保证微网内电压和频率稳定，实现微网内各分布式电源的协调控制，国内外学者主要提出主从控制和对等控制两种解决措施。主从控制模式，是指在微网处于孤岛运行模式时，其中一个 DG（或储能装置）采取电压源型控制方式，为微网中其它 DG 提供电压和频率参考，而其它 DG 则采用功率型控制方式。如希腊 NTUA 微网，德国 MVV 微网，日本 Wakkanai 微网等，微网内均采用蓄电池等储能单元作为主控制单元，快速跟踪微网内负荷波动，维持微网内功率平衡及电压/频率稳定。对等控制模式，是指微网中所有的 DG 在控制上都具有同等的地位，各控制器间不存在主和从的关系，每个 DG 都根据接入系统点电压和频率的就地信息进行控制，下垂控制是实现了对等控制策略的一种有效方法。与主从控制模式相比，在对等控制中的各 DG 可以自动参与输出功率的分配，易于实现 DG 的即插即用。美国 Wisconsin 微网实验系统，新加坡南洋理工微网实验系统，比利时 Katholieke 微网实验系统，西班牙 Catalunya 大学微网实验系统等中各可控型分布式电源均采用下垂控制以实现了对等控制，但下垂系数及微网线路参数对微网稳定性影响较大，如何提高

Droop 控制器的稳定裕度，建立通用性和鲁棒性强的对等控制微网系统，是微网研究者正在致力解决的问题。

随着许多高科技电力用户对电能质量要求的逐步提高和实际电力系统电能质量的逐步恶化，电能质量问题受到了越来越多的关心和重视。针对分布式发电供能微网系统并网运行带来的电能质量问题，国内外一直以来都十分关注，进行了较为深入的分析研究，目前主要研究了分布式电源对不同电能质量指标的影响，例如小型风力发电对电压波动与闪变的影响、逆变器接口的分布式电源设备对电网谐波的影响、单相分布式电源设备对三相不平衡的影响等。微网独立运行时，国内外主要关注的是不对称负荷运行及非线性负荷带来的电能质量及相应控制问题，有学者提出微网内部在不加隔离变压器的情况下，采用三相四桥臂变流器装置，通过正负序电压闭环控制算法等，可以有效解决三相不平衡负荷运行带来的电压不平衡问题；通过在传统变流器控制算法中增加虚拟阻抗及比例谐振控制器，能有效解决由于非线性负荷导致的电压波形畸变等问题。尽管在微网电能质量控制上已经取得不少成果，但是目前研究的微网规模和容量都较小，电能质量控制和治理方法更多的是针对于微网内分布式电源，结合多分布式电源协调控制技术，确保微网内部电能质量、以及确保不对微网与大电网的公共连接点注入干扰的方法和措施相关的成果还很少，有待进一步深入研究。

2.2.3 方法与挑战

微网并网运行时，由于微网中多分布式电源及储能装置的接入，彻底地改变了配电系统故障的特征，使故障后电气量的变化变得十分复杂，传统的保护原理和故障检测方法将受到巨大影响，可能导致无法准确地判断故障的位置。如何准确定位故障位置，有学者提出利用广域信息和多 Agent 技术保护原理，但保护系统对通讯的实时性要求很高，在实际应用中受到限制，但其拓展了保护的新思路，因而得到最为广泛的理论研究。微网外部配电系统部分发生故障时，微网保护应能快速作出判断，确定该故障是否为永久性故障，以决定微网是否需要与主网解列，因此快速准确的微网孤岛检测技术也成为微网保护和控制领域的研究热点。很多学者对分布式电源孤岛检测技术进行了大量研究，且也已提出了主动频率偏移法、功率扰动法等主动检测方法，但其主要针对单个分布式发电系统，且检测方法对分布式电源的控制系统依赖性较大，在此基础上，如何开发出快速的微网

孤岛检测算法仍有待深入研究。微网独立运行时，由于没有配电网的容量支持，其故障特性与并网运行时差别很大，因此国外有学者提出微网的保护应遵循微网保护系统性原则：不同运行模式下，微网保护策略必须一致，不仅要保护微网安全稳定运行，还应尽可能降低微网并网对公共电网的不利影响。微网的保护还必须与控制结合起来，通过研究微网的运行特性、控制原理及故障特性来进行微网保护策略的研究。传统继电保护方法无法满足以上对微网保护提出的要求，微网保护复杂而至关重要的工作原理和动作逻辑，已经成为限制微网技术进一步发展和应用的重要技术屏障。

微网内设备种类繁多（单纯供电/热电联供/冷热电联供等）、分布式电源运行模式多样（供热为主发电为辅/供电为主供热为辅）、微网运行模式多样（并网和独立运行）、微网可控程度多样（集中控制/分散控制等），因此微网控制中多分布式电源的协调控制问题非常复杂。微网内光伏等可再生能源输出功率波动具有间歇性，燃料电池、微型燃气轮机等可控型分布式发电单元受原动侧限制而输出响应较慢，蓄电池储能能量密度较大而功率密度较小，超级电容器、飞轮等储能单元功率密度较大而能量密度较小。由于具有以上特点，微网并网运行时，微网作为一个可控调度单元，如何通过各分布式电源的协调和优化控制来跟踪中央控制器的功率指令，如何减小和抑制外部电网及微网内部单元的暂态行为对微网稳定性的影响，一直是微网控制方面研究重点和难点。在这方面，微网的故障穿越能力研究受到格外关注，当外部电网发生故障（非永久性故障），导致 PCC 处电压跌落且造成三相不平衡状态时，容易造成微网内分布式电源过流而退出运行。很多学者对分布式电源（如双馈风机、光伏等）的并网运行故障穿越能力进行了大量研究，提出了的控制算法也已在实验室或实际应用中得到验证，但由多分布式电源协调控制的微网，故障穿越能力的研究还很少，而这项工作的研究对于微网应对外部电网暂态行为时的稳定运行能力无疑具有重要的实际意义。微网独立运行时，为保证微网内功率平衡及电压和频率稳定，各分布式电源间的协调控制同样也是关键。对于主从控制模式微网来说，对主控单元依赖性较强，且为保证暂态时（如间歇性电源功率波动、负荷突变等）系统各可控分布式单元之间功率分配的快速性，系统各分布式电源之间需要快速可靠的通讯系统。在对等控制策略和下垂控制方式下，微网能满足分布式单元即插即用的要求，且不需要强通讯线路，目前这种控制面临的一个难点是在微网容量和规模到达一定程度后，微网

线路结构必然会复杂化,现有的下垂控制技术无法对各分布式电源的无功出力进行有效地协调,而提出的一些改进控制算法也具有局限性,因此大规模容量微网独立运行时的无功优化控制值得进一步深入研究。

随着科学技术的发展,各种精密电子仪器和数字化电器设备在用户中大量装备,对电力系统的供电可靠性和电能质量提出了越来越高甚至苛刻的要求。在微网系统中,太阳能、风能等随机性能源的接入,都可能给所接入系统的用户带来电能质量问题。微网中很多类型的电源都需要借助电力电子技术输出满足用户负荷频率和电压要求的电能,依据所采用的电力电子技术不同,逆变器可能产生不同水平的谐波,而且微网中电子负载易受暂态、跌落、谐波、瞬间中断等的影响。微网中大量单相分布式电源及不平衡负荷的存在,也增加了微网的三相不平衡水平。目前国内外学者在小容量微网并网时对本地配网电压跌落和系统不平衡度校正方面、小规模微网独立运行时的不对称负荷及非线性负荷带载能力方面作了大量且实用的研究工作,但是针对大规模微网并网及独立运行时的电能质量综合控制问题,系统的理论方法和分析手段仍有待进一步深入研究。

2.3 微网运行优化与能量管理

2.3.1 问题提出

由于微网集成了多种能源输入(太阳能、风能、常规化石燃料、生物质能等)、多种产品输出(冷、热、电等)、多种能源转换单元(燃料电池、微型燃气轮机、内燃机,储能系统等),是化学、热力学、电动力学等行为相互耦合的非同性复杂系统,微网内能量的不确定性和时变性更强,微网系统的能量管理与分布式电源优化调度方法与大电网的优化调度将会有很大不同。当微网中含有多种分布式电源时,全面利用各种控制和调节手段,通过对微网内分布式电源的能量管理与经济调度,实现微网的优化运行,提高微网整体运行效率,是一项需要从建模方法和求解技术等方面进行深入研究的课题。

目前,微网能量管理系统主要有集中调度和分散控制两种模式。集中调度模式由上层中央能量管理系统和底层分布式电源、负荷等就地设备控制器组成,两层之间要求双向通讯。上层中央能量管理系统还可与地区电网调度系统之间实现信息交互,基于市场价格信息、微网内间歇式分布式电源的出力预测、微网负荷

预测结果等，按照不同的优化运行目标和约束条件，同时融合需求侧响应和辅助服务功能，实时制定微网优化运行调度策略，并向底层设备控制器下达控制指令。当采用分散控制模式时，微网内能量优化的任务主要由分散的设备层控制器完成，每个设备层控制器的主要功能并不是最大化该设备的使用效率，而是与微网内其他设备协同工作，以提高整个微网的效能。相较于分散控制模式，集中调度模式技术上相对更加成熟，也更加易于实现，因而目前应用得也更加广泛。

2.3.2 研究现状

微网的运行优化与能量管理几乎是所有微网必备的功能。微网运行优化模型中最常用的目标为经济目标 and 环境目标，类似于传统电网中发电机组的经济负荷调度和考虑环境约束的发电调度。经济目标主要包括微网系统的运行成本最低和微网系统的折旧成本最低，前者考虑微源的能耗成本、运行管理成本以及微网与主网间的能量交互成本；后者基于系统的运行成本，同时考虑各微源的安装成本折旧因素。环境目标主要使微网系统的环境效益最高，即污染物排放治理所需费用最少。

微网运行优化模型中的约束条件包括系统功率平衡方程，微源设备本身的发电特性约束以及资源环境条件约束，微网与配电网之间的交换功率约束、系统旋转储备约束，以及优化模型假设条件中需要考虑的约束（如在不考虑储能充放电成本的情况下，一般增加对储能始末剩余容量的约束，防止调度周期内大量使用储能内部存储电量，获取短期的“经济效益”）。

需要指出的是，联网型微网和独立型微网的目标函数和约束条件是不同的。同样，采取不同控制结构的微网其能量管理的设计框架也是不相同的。以运行方式为例，联网型微网由于有电网的支持，其内部微源的运行方式更为灵活，经济目标和/或环境目标中除包含微网设备运行成本外，还应包含配电网向微网的供电费用和旋转储备费用，考虑电力回购时，还应包含微网向电网供电的回购收益；约束条件中，功率平衡方程和旋转储备约束中包含配电网的部分。而独立型微网一般远离配电网，需要微网内部电源满足负荷和旋转储备的要求，优化目标和约束条件中均不含配电网的部分，因此，优化模型相对简单。

由于微网的控制模式比较多，限于篇幅，下面仅以两种典型控制模式下的微网优化控制和能量管理问题进行简单介绍。

对于采用集中式控制的联网型微网，以经济性为目标的微网运行优化模型，主要通过对微源的合理控制，在满足用户侧冷、热、电的负荷需求、电能质量要求、主网特殊要求以及需求侧管理要求等的条件下，实现系统运行成本最低。优化最终确定各微源的运行方式以及与配电网之间的交换功率。类似的，以环境效应为目标的微网运行优化模型，主要通过对微源的合理控制，充分发挥微源节能减排的作用，使微网二氧化碳的总排放量最低。同样，优化方案应满足微网运行的基本要求，确保系统充足的备用容量和供电可靠性。当考虑多目标情形时，由于不同目标之间可能存在冲突，这就需要充分根据系统所处实际，因地制宜地对系统优化运行的目标进行协调，实现微网综合价值的最大化。以经济和环境多目标为例，一种简单的方法是将环保目标转化为经济性目标进行处理，如采用碳关税对二氧化碳排放进行经济惩罚，该方法实际是将多目标问题转化为单目标问题进行处理。对于不能直接转化的目标，可以选取一个基准方案，使用与基准方案目标值的比值，将各目标转化为无量纲的数值，然后通过加权平均的方法转化为单目标问题。另一种方法是采用多目标方法进行处理，要求找到由非占优解空间构成的 pareto 解，采用妥协方法等找到前沿中适合该问题的最优解。

对于采用多代理分散控制方式设计的微网，其能量管理的目标函数和约束条件与集中控制微网能量管理类似，但在具体组织时需建立不同元件的代理模型（如光伏代理 PVAs，风机代理 WTAs，蓄电池代理 BAs，电网代理 PGA，负荷代理 LA），通过代理之间的通讯和协调完成系统的优化目标。微网的多代理控制方式将独立设计和协调控制的理念引入微网的管理，有助于未来实现微网 DGs 的“即插即用”和智能化目标，也是减少分布式电源控制和管理复杂度的有效途径，是未来微网能量管理系统重要的理论研究和技术应用方向。

在微网中，预测数据的准确性将直接影响调度方案的最终效果，国内外学者已积极展开了这方面的研究工作，考虑包括负荷预测、发电预测、市场信息、设备故障等不确定性因素，评估不确定性对微网优化运行结果的影响，并采取相应措施提高系统优化运行的预期效果。相关的研究方法较多，一种典型的方法首先采用 Monte Carlo 方法对不确定性数据进行模拟，产生大量符合发电、负荷等数据分布规律的场景，然后结合概率论的方法取期望值作为最终的目标函数值，也可以使用机会规划理论对目标值和约束条件进行处理；另一种方法是直接使用

不确定数据的分布函数，建立含有概率分布函数的随机规划模型。考虑到随机规模模型通常规模较大，同时数据分布特征的提取和不确定性参数的制定都存在技术或政策不完善的问题，需要更为系统和深入的研究，制定较为完善的理论体系和评估标准。

2.3.3 方法与挑战

对于微网能量管理系统的研究工作也存在一些新的问题和挑战。例如，微网的经济最优化问题和大型电力系统有着很大不同，DG 可以以 CCHP 形式同时供给冷热能和电能。作为微网运行优化模型的输入数据，运行人员必须首先了解微网系统的冷、热、电负荷分布情况。此外，考虑风机、光伏等不可调度的电源，发电预测将成为运行优化的重要组成部分，这就需要了解 DGs 运行的环境条件和资源分布情况。在未来复杂的电力市场环境下，还需要对电价机制进行研究，把握电价变化规律，有效调控或预测电价信息。

微网系统的经济运行技术和能量管理方法是实现微网高效、稳定运行的基础。微网中的可调节变量更加丰富，如分布式电源的有功出力、电压型逆变器接口母线的电压、电流型逆变器接口的电流、储能系统的有功输出、可调电容器组投入的无功补偿量、热/电联供机组的热负荷和电负荷的比例等。通过对这些变量的控制调节，可以在满足系统运行约束的条件下，实现微网的优化运行与能量的合理分配，最大限度地利用可再生能源，保证整个微网运行的经济性。为此，需要开展多方面的研究工作。

(1) 微网内分布式电源和综合负荷功率预测技术：研究间歇式能源短、中期输出能量预测方法（如风速预测，光照强度和环境温度预测等）；针对微网内负荷设备种类繁多、特性各异、用能方式多变的特点，研究微网内包含冷、热、电在内的多类型负荷预测技术；研究功率型和能量型储能装置的实时荷电状态（SOC）估算方法。

(2) 微网能量管理方法：开展含多种分布式电源、融合辅助服务与需求侧响应的微网能量优化管理方法研究，发展能量集中调度并考虑需求侧响应的能量优化管理策略；研究微网优化调度方法，最大化微网内可再生能源发电，最小化微网运行燃料成本和最小化污染物排放，实现微网需求侧响应；研究微网内多种类型储能装置（氢储能、电储能和冷热储能等）的运行调度策略。

(3) 微网能量管理系统：基于 SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)、上级调度计划、负荷预测等相关系统数据，包括系统运行实时数据、负荷和发电预测、发电计划、检修计划等数据，研究数据挖掘等相关数据支撑技术；研究微网能量管理系统的各功能模块之间的相互关系和交互数据构成，微网能量管理系统与其它微网高级应用系统的数据接口技术，开发具有通用性的灵活、方便、友好的可视化微网能量管理系统。

微网作为分布式电源的一种组织形式，其内部包含多种复杂的微源组合方式，给控制带来一定的困难，同时也提高了系统优化运行的复杂性。通过微网 EMS 对微网进行合理控制和管理，将给电网和用户带来多种效益，包括提高电网的可靠性、提供高质量的电能、减缓电力系统的供电压力，推迟配电网硬件的更新以及减少碳的消耗和提高经济效益等。

尽管许多相关文献对微网的经济性和运行优化进行了相关的探讨，但随着微网的发展与成熟，如何将微网对用户、电力部门及社会的效益全面量化，仍将需更深入的分析研究。例如，由于微网的独特设计可以提供比一般配电网更高的可靠性，满足对可靠性有特殊要求的用户需求，可以提高电力附加价值。同时，对主网与微网的新型经济关系体系的研究，以及对微网技术的推广对电力市场的影响的研究，都是未来微网能量管理系统设计中的重要挑战。

2.4 微网仿真与实验系统

2.4.1 问题提出

采用仿真技术研究电力系统的稳态和动态行为是电力系统研究中最常用的方法，也是微网相关领域的重要研究手段。鉴于微网的复杂性，无论是研究其与大电网相互作用的机理，还是研究在各种扰动下的复杂动态行为；无论是研究其保护与控制问题，还是研究其规划设计问题，都需要强有力的仿真工具作为基础，同时需要构建兼容微网分析仿真实验平台。

数字仿真技术是微网系统的主要研究手段之一，对于提高微网系统的运行经济性和可靠性，解决微网系统并网运行以及能源的综合高效利用所涉及的理论和实际问题，提供了必要的工具，对促进微网示范工程建设以及分布式发电技术的推广应用具有重要的理论意义和实用价值。与微网实验系统相比，数字仿真在经

济性和灵活性等方面仍保持着独特的优势，具有不可替代的作用，具体体现在：1) 相对于物理模拟与仿真，数字仿真所需的投入较少；2) 可以实现对原型系统的快速建模与仿真；3) 不受硬件条件的限制，可实现对各种类型分布式电源与储能系统的建模；4) 不易受系统规模的限制，可实现不同规模、不同复杂程度的微网的仿真；5) 仿真结果可重复；6) 各种系统与元件参数易于调整；7) 可模拟各种极端的、复杂的系统运行环境与工作条件，实现各种大扰动条件下的系统动态过程仿真；8) 可进行硬件在回路仿真 (hardware-in-the-loop, HIL) 实现对各种控制与保护设备的调试与测试。当前，微网的数字仿真已用于微网的规划、设计、运行以及科学研究等各个方面。

数字仿真作为真实系统的一种近似模拟，不可能与实际系统完全一致。通过实验与仿真结果的对比能够对仿真模型及参数进行验证或修正，从而保证仿真结果的可信度。与传统电力系统相比，微网规模较小，其相关研究不仅可以借助真实的物理装置进行实验，甚至可以按 1: 1 的比例构建微网实验系统，真实地再现研究对象。构建微网物理模拟仿真实验室或示范性微网系统的意义在于：1) 通过微网实验与仿真结果的对比，验证或修正仿真模型与参数的正确性，为微网仿真研究提供验证平台；2) 通过微网实验发现微网实际运行中真实存在的问题，为更深入的研究创造条件；3) 微网实验系统能够做为微网的运行、控制、保护、能量管理及相关技术理论的实现载体。

数字仿真系统和物理模拟实验系统都有各自的优势，但也都存在一定的局限性，将是将二者结合，形成数字仿真与物理模拟的微网综合仿真和实验系统，是未来的发展趋势。

2.4.2 研究现状

微网的仿真与实验系统是研究微网特性，揭示微网与大电网之间相互作用机理的基本手段，美国的 Intelligrid 计划，以及欧洲的 FENIX 计划，都将含微网的新型配电系统快速仿真视为其整个研究计划的核心和基础。目前，该领域的研究主要集中在两个方面：

1) 微网的数字仿真，目的是实现对微网极快的电磁暂态过程、快速的机电暂态过程、慢速的中长期动态过程和系统稳态运行过程的全过程实时仿真。目前，国际上的主要做法是在常规电力系统仿真程序中增加分布式发电设备模型，但由

于微网的仿真过程有许多独特之处，对算法数值稳定性、收敛性、快速性、扩展性等提出了更高的要求。针对于微网不同的时间尺度下的模型，需要采用不同的计算工具进行仿真研究。目前国内外主要采用的是以电磁暂态为主的仿真工具，如 EMTP，EMTP-RV、ATP、PSCAD、MicroTran 和 Matlab/SimPowerSystems 等离线电磁暂态仿真软件，分析扰动前后分布式电源与网络中其它元件在故障或操作过程中及其后详细的快速动态响应特性。随着时间快速衰减，快速变化过程消失后，在更长的时间框架中机械传动过程、热力学动态以及化学和电化学反应这些较大时间常数的动态过程逐渐成为系统稳定性的主导因素。考虑到网络规模、电磁暂态仿真计算速度等因素，采用稳定性仿真程序分析这些慢动态过程是合适的选择。传统的 PSS/E, BPA 等机电暂态分析软件已经内置了典型风力发电系统、以及燃汽轮机的原动调速装置的部分模型，DIgSILENT 计算分析软件提供了相对比较完整的电力电子装置控制系统模型，但是这些软件对分布式电源建模仍然是以用户自定义方法为主。考虑到微网的电压等级、接入容量的限制，微网控制策略的特殊性，以及电源本身、电力电子装置控制系统的特点，上述软件对于微网稳定性仿真计算研究仍具有一定局限性。

2) 微网物理模拟仿真实验室或示范性微网系统，作为研究微网的重要手段受到各国政府重视。欧盟、美国、日本以及我国等各国从自身的国情出发，依据不同的发展目的，建立了一批微网实验室和示范工程。

美国的分布式发电和微网技术的研究，主要是由美国电力可靠性技术协会（CERTS）来引导的。CERTS 为验证其微网概念，在 Wisconsin 大学 Madison 分校建立了实验室微网，其一系列测试实验表明，通过本地下垂控制策略，可以实现微网的暂态电压和频率调整，并能实现微网联网和孤岛模式之间的无缝切换；为推动微网的工业化应用，在 CERTS 的微网概念得到实验室验证后，由美国电力公司（AEP）资助，在哥伦布的 Dolan 技术中心建立了 CERTS 的微网示范平台，主要用于验证分布式电源的并联运行及对敏感负荷的高质量供电问题；美国国家可再生能源实验室（NREL）在分布式发电和微网研究领域也进行了一些积极的探索，NREL 实验室是一个包括多种分布式电源和储能设备、用来协助美国分布式发电技术发展和配电系统测试的多功能分布式发电技术测试平台；Sandia 国家实验室为 DOE 分布式发电技术测试实验室（DETL），是一个包括多种分布式电源技术研究和测试中心，可进行联网和孤岛运行测试；DOE、加州能

源署和太平洋燃气和电力公司合作，于加利福尼亚的 San Ramon 开展的分布式电源综合测试项目（DUI）为美国的首个商用微网项目，主要用于多分布式电源的高渗透率对配电网影响的研究；北方电力、NREL 和华盛顿电力公司合作建立的乡村微网，用于检验微网安装于乡村时所需要的技术革新和难点；DOE 与通用电气公司合作，投资 400 万美元，集控制、保护及能量管理于一体的微网示范工程也正在建设中。此外，美国还有多个微网项目在筹备或正在建设中。

欧盟在第五、第六和第七框架计划下支持了一系列有关发展可再生能源及分布式发电技术的研究项目。作为欧盟微网项目的研究成果，欧盟的微网实验室和示范平台，体现了欧盟在微网领域所做的有益探索。雅典国立大学建立的 NTUA 微网是欧盟所倡导的一种结构，该微网为单相 230V、50Hz 系统，能够验证分层控制微网结构，验证微网的上层调度管理策略，对微网的经济性、降低环境污染方面的效益进行软件评估；德国卡塞尔大学的太阳能技术研究所（ISET）是最早应用于欧盟微网研究的实验室之一，其建立的 DeMotec 微网实验室对欧盟微网理论的发展起到了巨大的推动作用。法国巴黎矿业学院的能源研究中心的 ARMINES 微网、西班牙毕尔巴鄂市的 Labein 微网、意大利米兰市的 CESI 微网等微网实验室也取得了丰富的研究成果。除上述一些微网之外，欧盟微网示范项目还包括英国 UMIST 实验室，SMA 公司与 NTUA 合作的 Kythnos 微网，荷兰 Continuon 微网，希腊 Germanos 微网，丹麦 Bornholm 微网等。

为推动微网示范平台建设，日本专门成立了新能源综合开发机构（NEDO），统一协调国内高校、企业与国家重点实验室对新能源及其应用的研究。NEDO 的微网发展战略，主要集中在两个领域。NEDO 可再生能源区域电网计划（2003-2007），是其成立以来最著名的计划之一，其目的是建立含多种分布式能源的区域供电系统，并避免对大电网产生不良影响，包括 Archi 微网、Kyoto 微网和 Hachinohe 微网三个示范工程。NEDO 新型配电网计划（2004-2007）的目的是发展含有分布式电源和无功补偿、动态电压调节装置的新型配电网，包括两个子计划，其中一个为 Akagi 示范工程，主要研究无功补偿装置对配电网的影响；另一个就是知名的 Sendai 微网示范工程。除了 NEDO 之外，日本其它一些组织也致力于微网研究，并建立了各自的微网示范工程，如 Shimizu 微网示范工程和 Tokyo gas 微网。

近几年国内多所高校和研究机构已纷纷开展对微网的研究，并建立了一批微网实验系统和示范工程。合肥工业大学建设了综合性比较强的微网实验室，包括多种分布式电源和储能装置，采用底层控制和上层中央管理控制相结合的分层控制方案，对微网中各组件进行控制；2007年9月，国家发改委、浙江省发改委和 NEDO 合作，由杭州电子科技大学和日本清水建设公司共同实施，建立了一个“先进稳定并网光伏发电微网系统”，是光伏发电比例达 50% 的实验微型电网；三菱公司在中国新疆的星星峡建立的以光伏、蓄电池为主的微网，该微网结合我国的实际情况，通过蓄电池逆变器和光伏逆变器以及柴油机的协调控制，实现微网的无人值守运行；南方电网公司与天津大学合作的国家 863 目标导向型项目“兆瓦级冷热电联供分布式能源微网并网关键技术和工程示范”，为我国冷/电联供与微网技术的研究与发展提供了研究示范平台；2010 年，由浙江省电试院、天津大学、四方继保合作实施的“含多种分布式电源的灵活微网系统研究与实施”项目通过成果鉴定，是我国首个自主研发建立的含多种分布式电源的微网实验平台，研究成果对于可再生能源的合理利用，提高含分布式电源的配电网供电可靠性具有重要意义；天津大学正在自主建设的微网实验室是技术先进的微网综合实验系统，具有种类丰富的分布式电源和储能设备，灵活多变的拓扑结构，以及完善的监控通信系统，可以设计各种具有针对性的实验，开展与分布式电源并网和微网系统有关的实验和理论研究。

2.4.3 方法与挑战

1. 微网数字仿真

在传统电力系统数字仿真的研究中，分别针对电磁暂态过程与机电暂态过程发展出了相应的数字仿真方法，即电磁暂态仿真方法与机电暂态仿真方法。对于分布发电微网系统中的数字仿真方法的研究可借鉴传统电力系统数字仿真的经验，即以电磁暂态仿真方法为基础研究微网中相对较快的动态过程，而以机电暂态仿真方法为基础研究其中相对较慢的动态过程。

微网暂态仿真侧重于微网中各种快速变化的暂态过程的详细仿真，同时兼具含分布式电源及（或）微网的大电网的仿真能力，特别强调仿真结果的准确性和完整性，因此在系统层面采用详细的元件模型对包括电网、电力电子装置、分布式电源及各种控制器进行建模，采用电力系统电磁暂态仿真与电路仿真的基本理

论与方法；微网稳定性仿真则侧重于微网中各种变化较慢的暂态过程的仿真，通过采用简化的网络元件、电力电子装置、分布式电源及各种控制器模型对系统进行建模，适当忽略了系统中快动态过程的影响，基于电力系统机电暂态仿真的基本理论与方法，具有相对较快的仿真计算速度，适于高渗透率下大规模微网系统的仿真计算。微网的新特点，和微网研究的新需求，对微网的数字仿真提出了新的要求和挑战：

1) 建模方面

微网中动态过程的时间尺度范围跨度较大，如暂态过电压的时间尺度在微秒级，而对于外部环境的光照、温度等变量的时间尺度则在秒级，甚至是分钟、小时级。微网系统的控制由于需要面向不同的动态物理过程，因此也具有鲜明的时间尺度特征。对某一元件，研究不同问题时可能需要采用完全不同的数学模型，应针对不同的研究目的建立各种元件在不同时间尺度下的准确而有效的仿真模型。另外，与传统电力系统成熟与可靠的元件模型相比，微网中丰富的分布式电源类型及种类、不断发展的分布式电源模型、以及复杂的控制方式，需要数字仿真程序具有灵活方便的用户自定义建模能力，适应不同情况的建模需求。

2) 仿真算法方面

微网中的不同分布式电源和储能设备本身及其控制器模型多具有较强的非线性，整个微网是一个强非线性系统，当系统规模较大，同时含有多个分布式电源时，程序的计算负担大大增加。而且由于微网中动态过程的时间常数差异较大，整个系统是一个典型的强刚性系统。为了保证仿真结果的精度及算法的数值稳定性，若依据系统中快动态过程的时间常数选取仿真步长，可能需要很长的计算时间。为了在保证数值稳定性和仿真精度的前提下，提高仿真计算速度，可采用多速率仿真算法、并行仿真算法、电磁-机电混合仿真、数字-物理混合仿真方法等。

多速率法是通过估算变量的计算误差选择恰好能够满足其计算精度的积分步长，从而提高计算效率的算法。其关键在于合理的对快慢变量进行分组，不同分组选择合理的仿真步长。多速率方法在存在少量快动态的大规模系统的动态过程仿真计算中有明显的加速效果。

并行仿真算法用于电磁暂态仿真，在进行大规模电力系统求解时采用网络分割的办法，将整个网络分块后，由多个处理器并行计算，子网之间通过通讯完成

各部分信息的交互。该方法能够大大加快电磁暂态仿真速度，其核心是网络分割和并行计算技术，及多节点、多任务之间的数据通讯技术。

电磁-机电混合仿真是对整个网络进行分块，具有快速暂态过程的部分采用较小的步长进行电磁暂态仿真，常规交流系统采用较大的步长进行机电暂态仿真。其关键为分块后的网络等值和电磁-机电的接口技术。该方法在一定程度上弥补了两种仿真方法的不足。

数字-物理混合仿真是将已有的物理仿真实验设备与数字仿真实验设备联接起来组成物理与数字联合实时仿真系统。可以扩展已有物理动模实验室的仿真规模，充分发挥现有动模实验室的仿真能力，适应较大规模电力系统的仿真要求。

2. 微网实验系统

相比于数字仿真，微网物理模拟实验系统的成本较高，因此在进行微网实验系统建设时，希望尽量满足开展丰富的与分布式电源并网和微网系统有关的实验和理论研究的需求。因此，在资金预算范围内，微网实验室应考虑以下需求：

1) 丰富的电源和负荷类型

考虑分布式能源的多样性、分布性、间歇性和不可预见性等特点，系统将包括：模拟风力发电机（双馈风力发电机和永磁同步风力发电机）、实际小型风力发电机、光伏发电（包括单晶，多晶和非晶硅薄膜）、燃气轮机、燃料电池等多种分布式电源；蓄电池、飞轮、超级电容器等多种储能装置。

微网中的负荷，应既有传统的阻性、感性和容性负荷，也有可控的电力电子负荷，用于产生各种谐波电流。在负荷分类上，按照不同的电能质量等级对负荷进行分类，既包含有对电能质量要求不高的一般需求负荷，还含有对电能质量高要求的敏感负荷及直流负荷，并能够对电能质量进行在线监测与分析，可进行电能质量分析理论和指标体系的研究。

2) 灵活的结构和运行模式

微网在结构上具有灵活性，要求上述各种分布式电源和储能装置均可通过可控开关并入微网，利用上层中央控制器，可进行微网的网络重构，开展不同目的的微网实验系统研究。微网内的线路阻抗均为可调节阻抗，能够模拟不同电压等级和不同长度的实际架空线路或者电缆。

微网实验系统要求通过网络重构出的各个微网均能实现联网和孤岛运行，并

能实现二者之间的平滑切换；微网既可以整体作孤岛运行，也可解列成几个小型微网各自孤岛运行。

3) 继电保护需求

微网中多个分布式电源及储能装置的接入，彻底改变了配电系统故障的特征，使故障后电气量的变化变得十分复杂，传统的保护原理和故障检测方法将受到很大影响，可能导致无法准确的判断故障的位置；因此，微网实验系统应该能计及分布式电源接入后的继电保护需求，能对微网及含微网配电系统的保护原理与技术进行研究，开展与分布式电源和微网相配合的保护装置配置和保护装置的研发。

4) 微网综合自动化系统

要求能够实现对微网的整体监控，不仅可以对微网的运行状态、微网内各种分布式电源的运行信息、微网电能质量进行有效的监控，还可以为微网网络重构、综合保护控制系统和高级能量管理系统提供支撑平台。此外，该系统还应具有故障监视与报警、运行设备的监测和故障诊断、远程数据访问和查询、历史数据查询等功能。

2.5 微网关键装备

微网关键设备主要有发电设备、辅助设备和二次设备。

(1) 发电设备：

- 风力发电机组：包括风力机、发电机、变流器、电控系统等。
- 并网光伏系统：包括光伏阵列、自动跟踪器、并网逆变器、监控系统等。
- 储能系统：包括储能装置、双向变流器、DC-DC 充电控制器、电压源特性的逆变器、储能电池状态巡检仪等。
- 燃料电池系统：包括储氢装置、燃料电池和并网逆变器等。
- 冷热电联供系统：包括热力机、发电机、换热设备和制冷设备等。
- 柴油发电机组

(2) 辅助设备

- 静态开关：实现微网和上级电网“无缝切换”的电力电子装置。
- 无功补偿装置

— 电能质量调节装置

(3) 二次设备

- 微网继电保护装置：重点解决配电网传统继电保护装置不能适应用户侧接入分布式电源的问题，有人正在研究自适应保护、网络化数字保护、系统级保护和单元级保护等。
- 微网控制系统：欧盟和日本均在研究分层控制结构，欧盟提出的三层控制结构包括上层配电网管理系统、中间层微网中心控制器和下层电源或负荷控制器。
- 微网能量管理系统：关于中央能量管理系统的研究较多，它实现与下层设备控制器、上层电网调度系统之间协调控制，目前也有人研究多代理分散式能量管理系统。
- 微网适用的各类传感器和通信设备。

第三章 独立型微网系统

3.1 发展现状

独立型微网 (Isolated Micro-grid) 与大电网没有连接, 并且通过多能互补的供能供电方式, 保证良好的供电可靠性和系统可扩展性, 适合在我国有人居住岛屿、边远农牧区等地区推广应用。独立型微网系统的典型特征:

- (1) 与大电网没有物理连接, 系统电压等级不高, 网络结构薄弱。
- (2) 电源类型“因地制宜”, 可再生发电渗透率较高。
- (3) 负荷以生产、生活用电为主, 波动大, 峰谷差、季节差较大。
- (4) 通常对电能质量要求不高。

从微网独立运行的组网方式来看, 国内外现有示范系统的技术方案可归为三类: 1) 同步发电机作为组网单元, 控制微网系统频率和电压, 其他发电单元并网发电; 2) 储能逆变器或含储能的光伏电站作为组网单元, 其他发电单元并网; 3) 同步发电机和储能逆变器交替组网。

3.1.1 同步发电机组网方案

同步发电机组网方案通常以燃油发电机组、小型水电机组等发电单元作为调频机组, 光伏、风电、生物质等可再生发电系统并入微网提供电量或满足在特定时间段内的负荷功率需求。丹麦Bornholm岛智能电网曾经脱离北欧电网孤岛运行长达3个月, 35MW的热电联产机组 (CHP) 在此期间作为组网单元, 由于不可控风电机组对电网冲击较大, 仅允许接入2MW以下, 而可控制型风电机组的接入容量达到12MW。我国青海玉树电网远离大电网孤岛运行, 包含13MW水电机组和2MW光伏电站, 水电机组作为组网单元, 2MW光伏电站的输出有功功率和无功功率均可接受电网调度。国外以同步发电机组网的微网系统还有许多, 例如日本冲绳县宫古岛柴/风/光/生物质/储能微网示范系统、美国夏威夷拉奈岛柴/光/储微网示范系统等。我国沿海不少有人居住岛屿, 使用柴油发电机组供电, 可以通过发展多能互补微网系统, 缓解供电压力、降低发电成本。

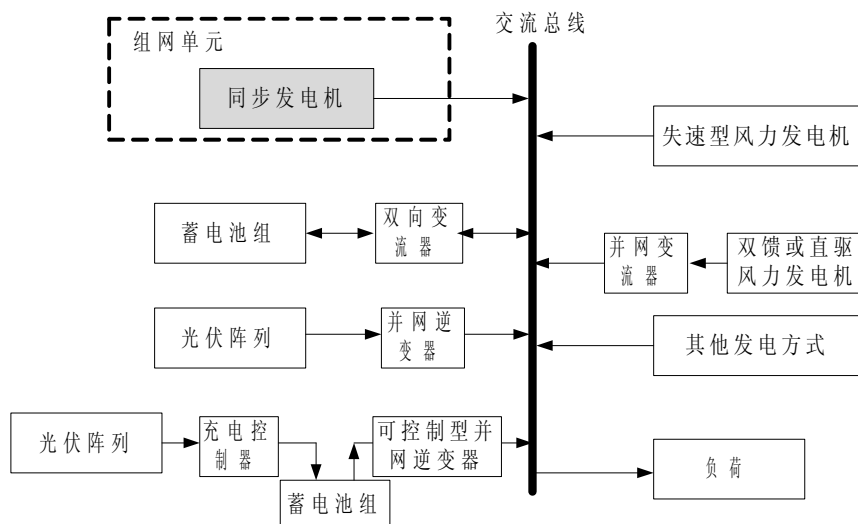


图3-1 同步发电机组网方案

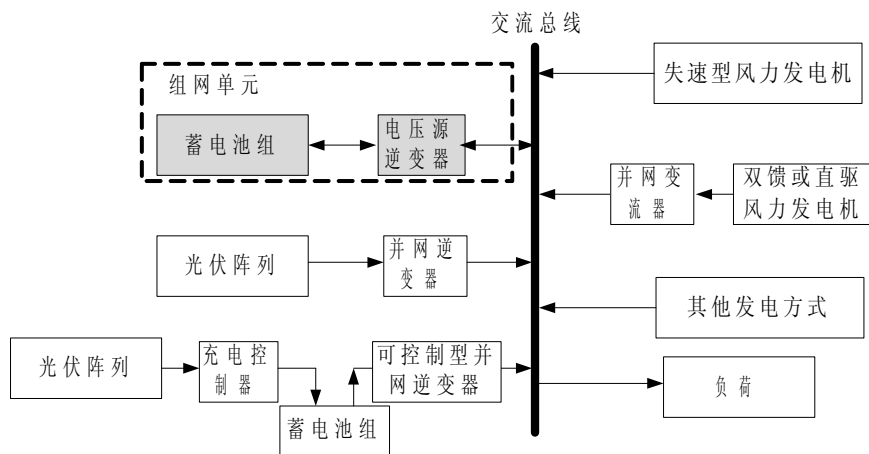
同步发电机组网技术相对比较成熟，传统大电网就采用这种方式。微网电源的组成配置较简单，可控型发电单元承担主要甚至全部负荷，不可控型发电单元可以简单地限制在适当比例范围以内，储能单元按照改善电能质量、平抑短时功率波动进行配置，例如Bornholm岛智能电网不包含储能单元，在孤岛运行期间不可控风电机容量被限定在10%以下。微网运行控制相对简单，系统稳定性好，并且可以借鉴传统电网的运行经验，例如Bornholm岛、青海玉树电网均采用人工调度。然而，为了提高可再生发电利用率、实现微网经济运行，还需要突破可控制型光伏发电系统、可控制型风电机组、储能系统双向变流器、多种电源能量管理、用户侧负荷管理等关键技术，目前国内外刚刚开始这方面研究。

从经济性上来看，同步发电机组网方案一般具有较低的初投资成本，但是考虑到燃料费、维护费等运行成本，其生命周期成本可能较高。我国南方岛屿柴油发电成本在2元/kWh以上，青海、西藏等高海拔地区甚至高于4元/kWh，接近甚至超过同一地区的光伏或风力发电成本，并且预计油价还会持续上涨，从而进一步推高柴油发电成本，与光伏、风电等可再生发电系统组成微网联合供电，可以起到降低发电成本的作用。水电站发电成本不高，青海、西藏等水资源丰富的地区建有不少小型水电站，但在连续数月的枯水期，供电能力受限甚至停运，光伏、风电等可再生发电系统则可以承担枯水期的供电需求。由于同步发电机必须长期带负荷工作，当光伏、风电出力较大而负荷较小时，不得不弃光、弃风，在光伏、风电发电成本较低的情况下，这也意味着发电收益的损失。因此，同步发电机组

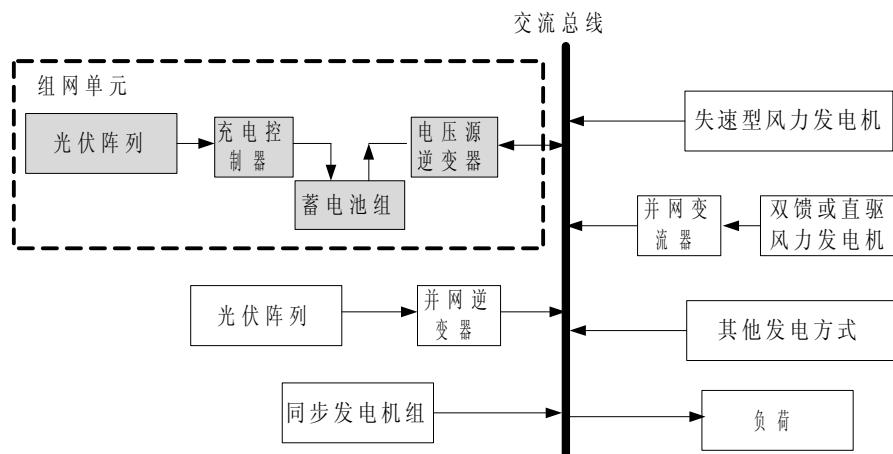
网方案应当充分利用光伏、风电等较成熟的可再生发电技术，减少燃油或燃气用量，降低发电成本。

3.1.2 储能逆变器组网方案

在储能逆变器组网方案中，储能系统作为调频发电单元，由储能逆变器向其他发电单元提供频率、电压信号，储能装置起到在发电单元和负荷之间平衡功率、能量差额的作用。希腊基斯诺斯岛在2009年建成独立型微网系统，由48V/1000Ah铅酸蓄电池组和3台5kVA电压源双向逆变器（Sunny-Island 5048）组建三相交流微网，7×2kW的光伏系统通过电流源并网逆变器（Sunny-boy）从交流侧分散接入微网运行，1台12kW柴油发电机组作为微网系统的冷备用，整套系统为12户住宅供电。我国2011年底在青海代格村灾后重建中建成60kW光伏双模式供电系统，由1200kWh铅酸蓄电池组和1台150kVA电压源/电流源双模式三相逆变器（中科院电工所研制）组建交流微网，60kWp光伏阵列通过1台100kW充电控制器接入直流母线，该村还规划建设百千瓦级光伏屋顶系统，从交流侧接入微网运行。由于储能系统的快速电量吞吐能力和逆变器的四象限调节能力，能够有效提高系统稳定性和可再生发电系统接入容量，储能逆变器组网方案具有广阔的推广应用前景，目前在国内外还处于示范阶段，系统容量普遍在数百千瓦以内。



(1) 方案一



(2) 方案二

图3-2 储能逆变器组网方案

国内外目前正在进行储能逆变器组网技术研究和关键设备研制。电压源逆变器是实现组网功能的关键设备，德国SMA公司的Sunny Island系列逆变器通过模拟同步发电机的下垂特性实现无互联通讯线的组网和并机功能，并实现了最多36台5kW逆变器的并联组网；我国已经研制出250kVA自同步电压源逆变器，并基于下垂控制技术实现了多机并联组网。如果储能系统不用于组建微网，仅是用于平衡功率或能量差额，则可以采用电流源型的双向变流器，国内外已有不少这类产品。在光伏与储能直流耦合系统中，光伏/储能充电控制器是实现MPPT跟踪、储能充电控制等功能的关键设备，我国已经研制出150kW充电控制器。微网能量管理系统是实现电源、负荷和网络的智能化、自动化运行控制的关键系统之一，美国GE公司、德国IWES、日本NEDO等均各自开发了微网能量管理系统，数据采集及通信系统大多采用RS485、ModBus、InterBus、以太网、无线网等成熟通讯技术实现，微网能量管理策略是当前研究热点。储能系统组网方案的系统集成、关键设备、能量管理等技术还存在较大挑战，在百千瓦级系统建设和设备研制方面，我国已经积累了一些技术和经验。

储能逆变器组网方案通常初投资成本较高，但是考虑到没有燃料费用、维护成本较低、可再生发电利用率高，这类微网系统也可能具有较好的经济性。光伏电站、风电场初投资成本较高，但主要设备的使用寿命在20~30年，运行维护费用很少。蓄电池使用寿命与运行状况有关，通常需要几年更换一次，因此关键设备的更换周期和更换成本是微网系统经济性分析的一个重要考虑因素。铅酸蓄电

池是目前最成熟、价格最低、应用最广泛的储能电池，一般每3年需要更换一次，如果对铅酸蓄电池组的充/放电深度和频度进行优化控制，则更换周期可延长到5年以上。大容量磷酸铁锂电池在国内的一些示范工程也已经开始试用，例如比亚迪坪山园区1MW×4h锂电池储能电站、中国电科院张北微网实验室100kW×4h锂电池储能系统等，磷酸铁锂电池比铅酸蓄电池寿命更长，但目前价格也更高。日本宫古岛微网系统试用了3790kWh钠硫电池，丹麦RISØ实验室试用了15kW×8h全钒液流电池，还有一些微网示范系统配置了数百千瓦秒的超级电容器用于平抑秒级功率波动，这些新型蓄电池除了技术尚待发展和验证以外，目前成本过高也制约了大规模使用。抽水蓄能是一种比较成熟的储能措施，实际工程除了需要具备现场条件以外，还要考虑上下游水库建设成本、抽水蓄能效率等经济性问题。

3.1.3 交替组网方案

交替组网方案是同步发电机组组网模式和储能逆变器组网模式的一种折中方案，我国东福山岛风/光/柴及海水淡化系统、广东东澳岛MW级光/风/柴/蓄微网系统等均采用了交替组网方案。从经济性上来看，交替组网方案的初投资成本低于储能逆变器单独组网模式，在微网采取最优控制的情况下发电成本低于同步发电机单独组网模式。另一方面，交替组网方案的控制更加复杂，并且发电成本依赖于是否进行优化控制，例如白天最大化利用光伏发电、夜间最大化利用风力发电，实际工程中还很难做到优化控制。由于柴油发电机工作噪声较大，在一些示范工程中居民要求不得在夜间使用柴油发电机，这也是实际工程应用中需要考虑的限制因素。

3.2 系统组成与配置原则

3.2.1 典型独立微网系统组成

独立型微网比较适合在海岛和边远地区推广应用，两种应用情景的特征又有所不同。在海岛地区，独立微网适合于没有海底电缆联接或者海底电缆弱连接、且有一定用电负荷的应用情景，代替柴油发电，具有更好的经济性和环保性。典型系统组成如下：

(1) 风/光/柴/蓄：在我国东部沿海岛屿上，太阳能和风能资源一般比较丰富。发展风/光/柴/蓄微网系统，可以采用柴油发电机组和蓄电池逆变器交替组网模

式，或者以蓄电池逆变器作为主要组网单元，柴油机组作为冷备用。

(2) 风/光/柴/生物质/蓄：在以渔业为主的海岛上，还可以利用渔业副产品、垃圾等资源，发展生物质发电，与光伏、风电、柴油机组互补发电。

(3) 风/光/气/生物质/蓄：在天然气条件较好的海岛上，可以利用天然气发电代替柴油发电，降低发电成本，改善微网系统性能。

在边远地区，独立微网适合于大电网未覆盖、且有一定规模的用电负荷地区，解决无电地区和缺电地区的可持续供电问题，代替柴油发电，具有更好的经济性和环保性。典型系统组成如下：

(1) 水/光/柴/蓄：西藏、青海、新疆等省份有不少水电资源和太阳能资源均比较丰富的边远地区，发展水/光/柴/蓄微网系统，可以采用水发电机组和蓄电池逆变器交替组网模式，柴油机组作为冷备用。

(2) 风/光/柴/蓄：在风能和太阳能资源均较好的边远地区，发展风/光/柴/蓄微网系统，充分利用风能和太阳能资源的互补特性，柴油机组和蓄电池逆变器交替组网，或者逆变器组网，柴油机组作为冷备用。

(3) 光/柴/蓄：在许多边远地区已经建成独立光伏电站，考虑到将来有可能接入大电网，可以利用微网技术对原有独立光伏电站进行升级改造，使这些光伏电站不仅可以独立运行、也可以并网运行。

3.2.2 独立微网系统组成与配置原则

(1) 因地制宜选择供电模式。在可再生资源丰富地区，优先发展可再生发电，如光伏发电、风力发电、生物质发电等。在水资源丰富地区，可采用水发电机组组网模式，或者交替组网模式，还可以考虑抽水蓄能作为储能措施。在燃油或燃气发电机组网模式下，应保证柴油、汽油、天然气等燃料供应充足，必要时需要考虑燃料储存措施。在高海拔地区，由于降容问题，应慎重使用燃油、燃气发电机。

(2) 满足长期独立运行要求。首先，各类电源的容量配置不仅要满足负荷的年总电量需求，也要考虑到电源与负荷的季节差异、昼夜差异，例如枯水期对水发电机组出力的影响，昼夜交替对并网光伏系统出力的影响，冬季照明和取暖负荷较重等。其次，组网发电单元应有连续可靠的一次能源供应，并且具有在故障条件下单独向全部负荷或关键负荷供电的能力，在故障后的黑启动能力，必要时需配备冷备用机组。第三，考虑到独立型微网一般建在边远农牧区、沿海岛屿，以

照明、取暖等生活负荷为主，可以承受每天数分钟的间歇性停电，如果微网包含对供电质量敏感的负荷，则应采取相应措施加强电能质量。

(3) 接纳大量可再生发电。光伏、风电的输入能源均具有随机波动性，直接并网发电对微网稳定运行会带来冲击，而可控制型光伏系统、风电机组消除了这种冲击影响，甚至能够参与微网控制和调度。在不含储能系统的微网中，不可控发电单元的渗透率可限制在10%以内，可控制型发电单元不进行限制；在含储能系统的微网中，需根据储能系统容量、负荷水平和微网安全稳定性要求，具体分析不可控发电单元的渗透率。对于生物质发电及其他可再生发电单元的渗透率，也可以根据资源有效性、发电特性和对微网影响进行具体分析得出。

(4) 维持适当较低的发电成本。首先，光伏、风电等可再生发电成本逐年降低，我国西部地区光伏上网电价1.15元/kWh，风电上网电价不高于0.61元/kWh，在资源丰富地区已经与常规发电可竞争，而另一方面燃油、燃气发电成本较高，并且燃料费用逐年上升，从降低发电成本的角度，应尽量多用光伏、风电等可再生发电系统。其次，目前光伏、风电、储能等投资成本仍然较高，发电效益在运营期内逐渐收回，在投资额比较紧张的情况下，可以采取适当的折中方案。第三，微网能量管理应以发电成本最低为控制目标之一，推荐配备智能化、自动化的微网能量管理系统。

(5) 根据需要配置储能系统。在同步发电机组网模式下，储能设备不是必需的，为了减小负荷、不可控发电单元功率变化的影响，可配置数秒到数十分钟的储能系统，额定功率不低于负荷和/或不可控发电单元的最大功率变化量。在储能逆变器组网模式下，储能系统应满足特定时间内负荷电力电量需求，额定功率不低于该时间段内全部负荷或关键负荷总功率，储能时间可达到数小时甚至数天。

3.3 系统适用性分析

独立型微网系统的适用条件：

(1) 沿海有人居住岛屿、边远农牧区等边远地区，电网难以延伸到达、与大电网仅有弱连接、或者已建有孤立电网。

(2) 生产、生活用电负荷相对比较集中，如果包含较高比例的电动机、电力电子设备等特殊负荷，需要制定有针对性的系统方案。

(3) 在可再生资源丰富地区, 优先发展可再生发电或者多能互补发电, 满足不同时间、不同季节的供电需求。

(4) 在小水电、光伏电站、柴油发电机等供电的孤立电网地区, 充分利用已有电力设施, 优先发展多能互补发电。

(5) 在燃油或燃气供应充足的地区, 可考虑燃油发电或燃气发电方式。

独立型微网系统的不适用条件:

(1) 在负荷较小、非常分散、不具备联网条件时, 适宜独立户用供电系统等其他方式解决供电问题。

(2) 在电网已覆盖地区或者与电网有弱连接地区, 如果仅在少数情况下有独立供电需求, 适宜联网型微网、独立供电系统等其他方式解决。

(3) 在燃料供给困难、成本高昂的地区, 燃油、燃气效率较低的地区(如高海拔地区), 不适宜长时间、大量使用燃油和燃气发电。

3.4 典型案例

3.4.1 玉树水/光互补微网示范系统

玉树州是青海省唯一远离电网的自治州, 全州下辖6县共31万人口, 仅靠13座小型水电站组成的4个孤立电网供电, 由青海水利水电集团公司经营管理。2009年7月, 青海省水利水电集团公司和中科院电工所共同完成玉树光伏电站调研与现场查勘, 由青海省水利水电集团公司作为业主建设第一期2MW光伏电站, 与玉称电网中的水电站互补, 形成微网向负载供电。2009年底, 青海省玉树州水/光互补微网发电示范项目列入“金太阳示范工程”首批资助名单。

2011年12月建成第一期2MW光伏电站, 建设地点位于玉树州种畜场内, 座落在玉树州东南部、距结古镇25公里处的巴塘滩上, 海拔高度3980米, 占地面积105.56亩。

(1) 系统组成结构

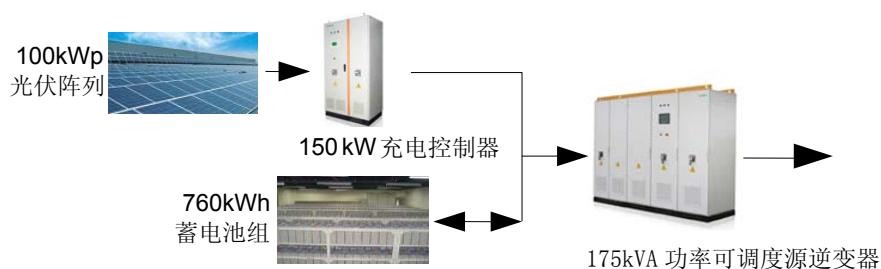
玉树微网系统在正常运行时由同步发电机组网, 2MW光伏电站的输出有功和无功功率可以接受微网调度; 在电网故障时, 2个双模式光伏发电单元又可单独组网, 带300kW以下的关键负载。玉树光伏电站总容量为2.01204MW_p, 配备总容量15.2MWh的铅酸蓄电池, 光伏阵列采用平单轴跟踪式系统, 其中包括3种光伏发电

系统:

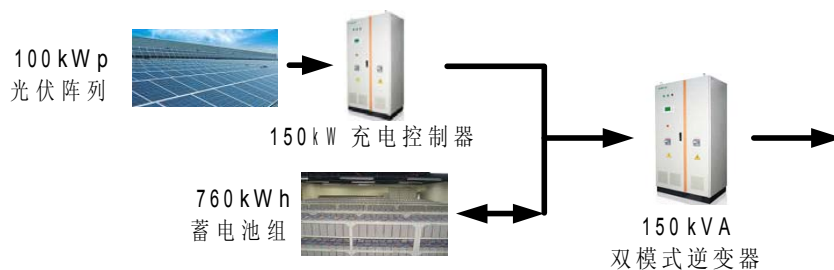
1) 功率可调度发电单元: 由1条100kWp光伏阵列、150kW光伏充电控制器、760kWh蓄电池组组成的直流支路, 接入1台175kVA功率可调度逆变器, 共有15个单元;

2) 双模式发电单元: 由1条100kWp光伏阵列、150kW光伏充电控制器、760kWh蓄电池组和150kVA双模式逆变器组成, 共有2个单元;

3) 自同步电压源发电单元: 由1条100kWp光伏阵列、150kW光伏充电控制器、760kWh蓄电池组和200kVA自同步电压源逆变器组成, 共有3个单元。



(a) 功率可调度光伏发电单元



(b) 双模式光伏发电单元



(c) 自同步电压源光伏发电单元

图3-3 三种光伏发电单元组成结构图

2MW光伏电站通过变压器升压至10kV, 汇总至综合楼10kV母线上, 再升压至

35kV，以单回35kV线路接入玉称电网的禅古电厂35kV母线。在玉树地震前，玉称电网水电装机容量17MW，地震后部分水电站报废，目前水电可用容量约12MW。2MW光伏电站接入后，光伏占总可用发电容量的比例为14.3%，通过增加储能装置以及接受电网调度，整个系统可达到稳定运行。

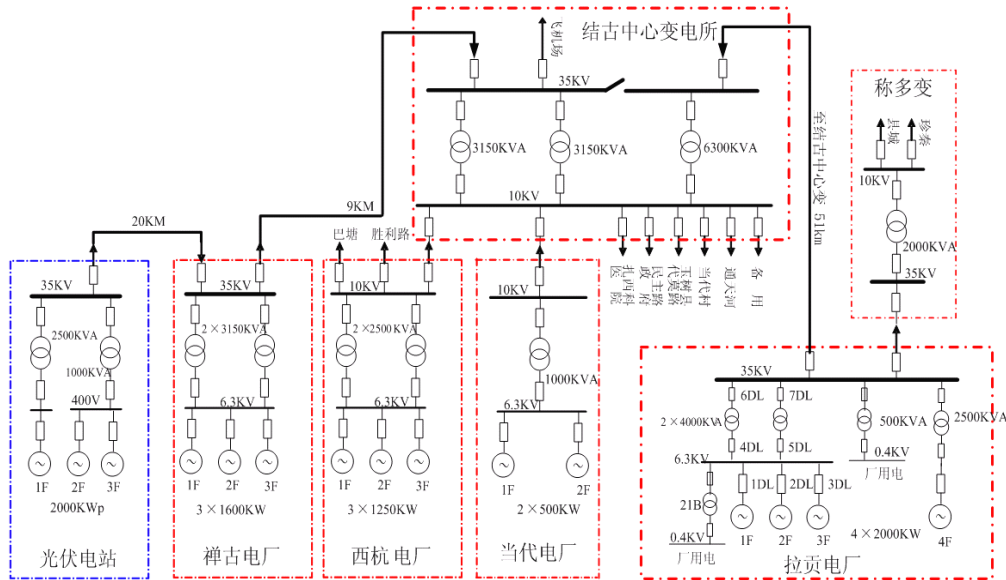


图 3-4 三种光伏发电单元组成结构图

(2) 运行控制策略

按照最大限度的提高光伏系统利用率，设计光伏电站和水电站的互补运行方案。综合考虑储能的使用寿命和投资规模，来确定铅酸蓄电池容量和充放电控制策略。在制定系统组成结构和运行控制策略时，还考虑了电力负荷增长等因素。

总体来看，玉称电网的水电装机容量可以满足白天负荷功率需求，但是低于晚高峰用电功率需求，长期来看发电量不足。依据业主要求，玉树2MW光伏电站主要用来满足晚高峰（3小时）的用电需求。

光伏电站与水电站的互补运行模式为：白天，水电站支撑电网运行，光伏阵列所发电能储存在蓄电池中，在水电站出力不能满足负荷需求时，光伏电站按照调度指令向电网输送电力；夜间负荷晚高峰时期，水电站和光伏电站均按照调度指令向电网输送电力，在发电功率不足情况下采取减负荷措施；深夜负荷低谷时期，如果光伏电站的蓄电池放电深度已接近或达到50%，光伏电站停止发电，水电站维持电网运行。

在互补工作模式下，光伏系统每日发电量直接供给负载或存储到储能装置中，

当光伏系统电量不足时投入使用，充分利用了太阳能资源。水电站负责支撑电网电压和频率，根据负荷状况和水资源状况，在必要时由光伏电站增加出力，水电站节水，从而节约水电资源。

(3) 关键设备研制情况

在该项目中，150kVA双模式逆变器、200kVA自同步电压源逆变器和150kW充电控制器均属于国内首次研制，研制单位是中科院电工研究所和北京科诺伟业公司。截止2011年10月，3种关键设备样机均已完成，并在玉树现场投入试运行。

在前期的台面实验中，主要对自同步电压源逆变器的硬件进行了验证，完成并网运行试验和独立运行试验。其中独立运行试验是重点，在10kVA的自同步电压型逆变器并联系统实验平台上完成2机并联组网、带三相不平衡负载、并网运行、并网/独立平滑切换等试验，结果表明满足单机及多机并联的独立运行要求。

150kVA双模式逆变器、200kVA自同步电压源型逆变器和150kW充电控制器已完成研制，并通过了设备出厂检验。



图 3-5 200kVA 自同步电压源型逆变器样机和 150kW 充电控制器样机



图 3-6 玉树 2MW 光伏电站

3.4.2 东福山岛风/光/柴及海水淡化系统

东福山岛位于浙江省舟山本岛普陀区沈家门镇东北方向约 50 公里，是我国有人居住的最东端岛屿，全岛面积 3.27 平方公里。2011 年以前，岛上居民由驻岛海军的柴油发电机提供少量照明用电，用水主要靠现有的水库收集雨水净化和从舟山本岛运水，用水成本很高。随着海岛旅游业的发展，用水及用电成了东福山岛迫在眉睫需要解决的实际问题。

2011 年国电集团浙江分公司自筹经费，建成东福山岛风/光/柴及海水淡化综合系统工程，基本满足岛上居民生活用电需求。浙江电力试验研究院负责该系统的技术支持和运行维护。项目总投资约 2200 万元，目前没有收取电费。

(1) 系统组成结构

东福山与外接电网没有连接。本地电源包括 250kW 柴油发电机组、210kW 风电机组、100kW 光伏电站，系统总发电容量 560kW。蓄电池组 980kWh。负荷包括东福村、部队和 50 吨/d 海水淡化装置。所有电源均接入 380V 交流母线，经 0.38/10kV 变压器升压到 10kV，再连接到用电负荷。



图3-7 东福山岛微网主接线图

微网电源和蓄电池组均集中安装在东福山电站及周围。电源包含 1 台 250kW 柴油发电机组；7 台 30kW 风电机组，由华鹰风电提供；100kW 地面安装式光伏电站，采用单晶硅电池组件；阀控式铅酸蓄电池组容量 980kWh，剩余电量保持在 50%以上，单块蓄电池容量 2V 1000Ah，2 组 245 块蓄电池串联，额定端电压达到 490V。光伏汇流箱、风机逆变器、柴油发电机组、海水淡化装置、环境监测仪、各种系统保护及测控装置等均采用 RS485 通信，再通过串口服务器接入电站层工业以太网；光伏储能变流器直接接入以太网。



(a) 7×30kW风电机组

(b) 100kW光伏电站

图3-8 东福山岛风电和光伏

蓄电池组和光伏阵列接入同一台 300kW 光伏储能变流器 (PCS), PCS 输入/输出功率实际是蓄电池组充/放电功率与光伏阵列输出功率的差额。从系统接线图可以看出, 2 路蓄电池组和 2 路光伏阵列分别通过 DC/DC 变流器连接到一条直流母线, 再通过 DC/AC 双向变流器接入交流母线。实际上这些 DC/DC 部分和 DC/AC 部分均集成在同一个 300kW 光伏储能变流器柜, 该变流器具有电流源/电压源两种工作模式。在柴油机组网运行时, PCS 工作在电流源模式下, 按照能量管理系统指令调节输入/输出功率; 在柴油机组停机时, PCS 工作在电压源模式下, 承担微网组网任务, 为其他并网发电单元提供电压和频率参考信号。该变流器还做不到多机并联, 与柴油机组之间也不能无缝切换。

50 吨/天的海水淡化系统是一个最大的用电负荷, 主要是 14 台水泵需要用电, 其中最大的 1 台水泵功率是 11kW, 其余水泵功率均为 1kW、2.2kW, 系统总功率约在 30~50kW。实际上, 目前通过雨水净化得到的淡水基本满足岛民日常生活用水, 只在旅游旺季供水需求较大时会使用海水淡化系统。

(2) 运行状况

东福山岛微网运行控制策略为: 驻岛部队要求夜晚不能发出噪音, 因此白天由柴油发电机组网运行, 晚上由储能逆变器组网运行, 每天早上和傍晚各进行一次模式切换; 蓄电池组白天以恒定功率充电, 夜晚放电, 放电深度达到 50% 时停止。在系统发电功率过剩、且蓄电池充满的情况下, 首先弃光、其次弃风。

根据 2011 年 11 月 1 日 12:17 的系统监控信息, 当天白天系统总发电功率 123.5kW, 其中柴油机组输出 67kW; 7 台风电机组中只有 2 台投入工作, 输出功率 15.6kW; 光伏阵列也仅有一部分投入运行, 输出功率 40.9kW。系统总负

荷 43.6kW，其中部队 37.4kW，东福村 4.2kW，海水淡化装置 1kW，电站自用电 1kW。蓄电池组以 70kW 的恒定功率充电，充电电压在直流 525~528V 之间。

11 月 1 日晚 19:40 左右，柴油机组停机，PCS 切换到电压源模式组网运行，切换过程中间停电十余秒。从傍晚到次日早晨，均由 PCS 组网运行，由蓄电池和风电供电。早晨从 PCS 切换到柴油发电机组网的过程不用停电，但是在切换瞬间，柴油机工作状态是随机的，有可能工作在电动机、发电机或中间状态下。

(3) 系统性能总结

东福山岛风/光/柴/蓄及海水淡化系统满足当地用电、用水需求，并且采用柴油发电机和储能逆变器交替组网，实现了微网系统稳定运行。

系统核心设备是一台 300kW 光伏-储能变流器，具有双向变流功能和电压源/电流源双模式，在东福山岛微网系统中起到了功率平衡和稳定组网作用。如果在 MW 级以上独立型微网中使用，还需要接近多机并联组网、电压源/电流源无缝切换等技术问题。

系统配备了能量管理系统，然而由于驻岛部队要求夜间不得使用柴油发电机，大大限制了能量管理系统的优化控制效果，特别是白天柴油发电机组网、蓄电池恒功率充电，使得弃光、弃风现象比较严重。

第四章 联网型微网系统

4.1 发展现状

4.1.1 联网型微网的技术特点

微网主要有两种典型的运行模式：联网运行模式与孤岛运行模式。联网型微网（MG Connected Regional Grid）是指，微网以联网运行模式为主，在大电网正常情况下，微网和大电网联网运行。当检测到大电网故障或电能质量不满足要求时，微网与大电网断开，转入孤岛运行模式，由微网内的分布式电源给微网内关键负荷继续供电，保证重要负荷的不间断电力供应，维持微网内自身供需能量平衡。待大电网故障恢复或者电能质量满足要求时，微网重新并网，继续以联网模式运行。

联网型微网主要有以下几个技术特点：

（1）联网模式下并网点功率可控。运行于联网模式时，微网一般被要求控制为一个“好公民”或者“模范公民”，即要求微网对大电网表现为一个单一可控的单元，从而减小分布式电源并网对电网的影响。这主要依赖于微网先进的控制技术及内部的可控发电单元或储能装置。

（2）孤网模式下可持续稳定运行。孤网模式下微网内电源能够支撑重要负荷的连续持续运行，同时微网监控系统需要从整体上负责系统运行的控制和协调，包括完成自动频率控制、自动电压控制、自动稳定控制，必要时的黑启动等。

（3）能运行在两种模式：联网模式和孤网模式。在联网模式下，负荷既可以从电网获得电能也可以从微网获得电能，同时微网既可以从电网获得电能也可以向电网输送电能（根据接入电网的准则）。当电网的电能质量不能满足用户要求或者电网发生故障时，微网与主电网断开，运行于孤网模式。在孤网模式下微网必须能满足自身供需能量平衡；当电网恢复之后，微网能自动恢复为并网模式。

（4）两种运行模式能实现无缝切换。微网控制器需要根据实际运行条件的变化实现两种模式之间的自动平滑无缝切换，即切换过程不需要人为干预，也不会导致对用户的供电中断。

根据外部电网对微网的接入要求,按照联网运行模式下微网与大电网的交换功率,联网模式下微网运行方式主要有不控方式、定交换功率方式、零负荷方式、可控负荷(电源)方式和经济运行方式等几类。

不控方式下,微网与常规电网并网运行时向电网提供多余的电能或由电网补充自身发电量的不足,在电网没有特殊规定时,微网内储能装置不动作,并网点功率会随着微网内负荷及电源出力的波动出现随机性变化。这种运行方式对电网的影响相对较大,但对微网而言有时可能却是最经济的一种运行方式。

定交换功率运行方式下,控制微网与大电网联络线上的交换功率恒定,微网对大电网来说,表现为一个功率恒定的电源或者负荷。

零负荷型运行方式下,微网能够通过自身的控制维持微网内部的电量平衡,与大电网的交换功率为零,大电网起到事故备用的作用。是定交换功率运行方式的一个特例。

可控型负荷(电源)方式下,微网根据调度的指令,通过自身内部的协调控制,调整自身和大电网的功率交换,对大电网而言表现为一个可调的负荷或电源。

经济运行方式下,微网根据损耗和经济性等控制目标,通过优化算法,实现微网的最经济性运行。

不控方式下微网同分布式电源直接接入类似,会对大电网的运行和规划造成复杂的影响。其他几种运行方式,能很好的减轻分布式电源并网对电网的冲击,在技术上完全可以实现,但是控制较为复杂,对控制器的设计和储能装置的容量要求较高。

4.1.2 联网型微网的国外发展现状

目前,欧盟、北美、日本等国家和地区已纷纷展开了对微网的研究。各个国家或地区从本地的能源发展策略及所面临的电力系统现状出发,确定了各自的微网研究范畴和发展规划。科研人员从理论层面、技术层面、实验平台及示范工程的建设方面正逐步展开对微网的研究,已取得了一定的进展,验证了微网技术的可行性。

(1) 欧盟

欧洲能源政策的核心是发展可持续、具有竞争力和安全的能源。近些年来,

欧洲各国对微网的研究越来越重视，各国之间开展了许多合作和研讨。欧洲对微网研究和发展主要考虑的是有利于满足用户对电能质量以及电网的稳定和环保的要求，所有的微网研究计划都围绕着可靠性、可接入性、灵活性 3 个方面来考虑。电网的智能化、能量利用的多元化等将是欧洲未来电网的重要特点。

欧盟在第 5、6、7 框架计划中资助了多个科研项目，参与方包括高校、制造商(ABB、西门子等)、电力公司，研究涵盖分布式供电的多个方面。欧盟第五框架计划专门拨款 450 万欧元资助微网研究计划。该项目已完成并取得了一些颇具启发意义的研究成果，如 DERs 的模型、可用于对逆变器控制的低压非对称微网的静态和动态仿真工具、孤岛和互联的运行理念、基于代理的控制策略、本地黑启动策略、接地和保护的方案、可靠性的定量分析、实验室微网平台的理论验证等。欧盟第六框架计划资助 850 万欧元继续资助了 4 个分布式供电项目，分别针对现有应用于分布式发电储能技术进行评估和分析，制定了未来评估规划；对成员国分布式电源并网政策和管理进行调研，提出改进方案；就分布式电源给配电网带来的安全稳定问题提出解决方案，并提出合适的标准、政策及商业模型来促进分布式电源在欧洲电网中的应用；还对分布式电源接入系统的设计、相关标准的制定及设备测试开展工作。2006 年 4 月，欧盟发布了“智能电网—欧洲未来电力发展战略及前景”绿皮书，阐述了智能电网的概念，提出了欧盟电力发展的远景规划：建立以集中式电站和微网为主导的供电可靠，少环境污染，高经济效益的智能电网形式，并将其作为欧盟第七研究框架（2007-2013）的核心议题之一。欧盟第 5、6 框架研究项目中与微网相关的项目主要包括：

(1) MICROGRIDS：项目提出“微网”的概念，试图将分布式电源以“微网”的形式接入电网并网运行，与电网相互支撑，发挥分布式电源的最佳效能。该项目的参与者包括法国的 EDF 电力公司、希腊的 PPC 电力公司、葡萄牙的 EDP 电力公司，制造商、高等院校。该项目取得如下成果：分布式电源模型及稳态和暂态分析工具，用于仿真以低电压逆变器为主的微网不平衡运行；孤岛和并网运行机理；包含层次算法和分布式算法的控制算法；本地黑启动技术；分布式电源接口响应和功能要求；接地和保护方案；可靠性效益的量化分析方法；结构和功能各异的多个实验室微网。

(2) MORE MICROGRIDS（欧盟第 6 框架计划资助）：继续微网的研究，

该项目的参与方包括来自丹麦、德国、葡萄牙、荷兰、波兰的电力公司。研究内容包括:分布式电源控制器;利用下一代信息与通信技术开发新的控制策略;开发微网设计的新方法,研究现代保护技术,固态开关,以及异频微网运行技术;多微网在商业和技术上的融合以及非集中式的电力市场和附加服务市场运行;微网孤岛和并网运行标准的制定;微网对电力系统的影响,包括衡量微网对地区、国家和欧盟层面的可靠性、损耗、环境等方面效益的量化方法;探讨微网对电网基础设施发展的影响;微网试点工程及现场试验。

在开展研究的同时,欧洲部分国家建设了多个微网实验室和试点工程。欧盟微网实验室和示范平台目前绝大多数采用图 4-1 所示的微网结构。

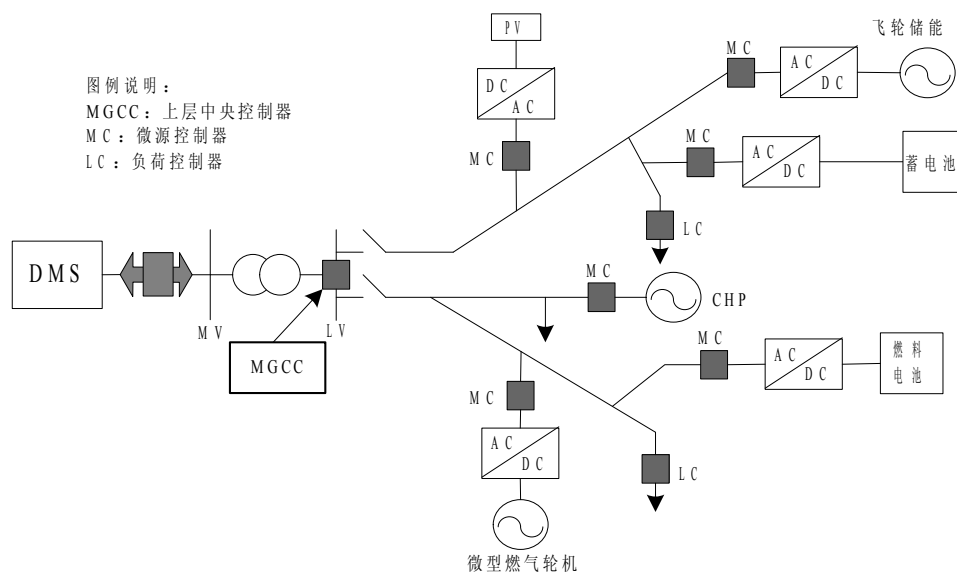


图4-1 欧盟微网结构

其中,光伏、燃料电池和微型燃气轮机通过电力电子接口连接到微网,中心储能单元被安装在交流母线侧。微网系统采用分层控制策略,底层控制包括分布式电源控制和负荷控制。上层控制负责底层分布式电源和储能装置的参数设置和管理,维持微网的最优运行。并且允许微网作为电网中分布式电源的一部分向大电网供电。

从欧盟的微网实验室和示范平台来看,除丹麦的 Bornholm 微网为中压微网示范平台外,其余的微网示范平台均为低压微网,包含多种分布式电源,电压等级在 400V,容量均在数兆瓦以内。

(2) 美国

美国自上世纪 90 年代以来发生了几次较大的停电事故，使其电力行业十分关注电能质量和供电可靠性。因此美国对微网的研究重点主要集中在满足多种电能质量的要求、提高供电的可靠性、降低成本和实现智能化等方面。

美国的分布式发电与微网技术研究主要由电力可靠性技术解决方案协会 (CERTS)、制造商(以 GE 为代表)、高等院校等进行，侧重于微网方面的研究。CERTS 最早提出了微网的概念，颇具权威性，其在 2003 年为美国能源部及加州能源委员会编写的《微网概念》白皮书中对其微网的主要思想及关键问题进行了描述和总结，系统地概括了美国 CERTS 微网的定义、结构、控制、保护及效益分析等一系列问题。

CERTS 微网的初步理论研究成果已在实验室微网平台上得到了成功检验。2005 年 CERTS 微网的研究已经从仿真分析、实验研究阶段进入现场试点运行阶段。由美国北部电力系统承建的 Mad River 微网是美国第一个微网试点工程，用于检验微网的建模和仿真方法、保护和策略以及经济效益等，并初步形成关于微网的管理政策和法规等，为将来的微网工程建立框架。

美国能源部还与 GE 共同资助了第二个“GE 全球研究”计划，GE 的目标是开发出一套微网能量管理系统(Microgrid energy management, MEM)，包括电气和热能的性能和成本优化控制，与公用电网的并网控制及对清洁能源间歇性发电的管理。

在微网方面其它一些机构也开展了研究，如在加州能源委员会的资助下，美国配电企业联合会 (Distribution Utility Associates) 开展了一项名为“Distributed Utility Integration Test”的科研项目，首次对分布式电源融入公用电网进行了全方位的试验，提出了一个关键的技术问题：大量种类繁多的分布式电源并入配电系统时对系统产生的影响。该项目对分布式电源整合于配电系统的可行性和价值进行了全面深入的试验研究。美国国家可再生能源实验室完成了对佛蒙特州微网的安装和运行的检验。DTE Energy 电力公司利用 EPRI (美国电科院) 开发的工具 DEW 重点研究了分布式电源对配电系统影响的量化分析；开展了热电联产、异步发电机、逆变型电源、同步型电源的建模仿真；微网电压、谐波分析以及包含故障特性研究、继电保护调整在内的多分布式电源的故障分析，这些工作的开展逐步丰富了微网的基础理论体系，为未来微网关键技术突破和试点应用奠定了基

础。

美国典型微网实验室和试点工程中，以低压微网为主，除 DUIT 微网实验室为 21kV 的中压微网以外，Mad River Park 微网 7.2kV，其余为 480V 系统；容量也均在 MW 级以下；系统包含多种分布式电源及储能设备。

美国的微网建设，提倡各分布式电源应具有即插即用能力，储能装置连接在直流侧与分布式电源一起作为一个整体通过电力电子接口连接到微网，微网通过单点接入公共电网，到目前为止，不允许微网向大电网供电。微网中不存在主控制器，各分布式电源以对等的形式接入微网，并通过本地下垂控制策略维持微网功率平衡，在可靠性和灵活性方面更具优势。但是，此种结构微网的稳定性问题值得关注。

(3) 日本

日本的国内能源日益紧缺、负荷日益增长，日本政府十分希望可再生能源(如风能和光伏发电)能够在本国的能源结构中发挥越来越大的作用，但是这些可再生能源的功率波动性降低了电能质量和供电的可靠性，因此其发展分布式发电与微网的目标主要定位于能源供给多样化、减少污染、提供多重电能质量和可靠性，满足用户个性化电力需求上。同时日本发展微网是希望其通过控制原动机平衡负载的波动和可再生能源的输出来达到电网的能量平衡，例如配备有储能设备的微网能够补偿可再生能源间歇式的能量供应。因此从大电网的角度看，微网相当于一个恒定的负荷。针对这一理念，日本的微网发展更加侧重于储能和控制的研究。对此，有日本学者提出了灵活可靠性和智能能量供给系统(flexible reliability and intelligent electrical energy delivery system, FRIENDS)，利用 FACTS 元件快速灵活的控制性能实现对配电网能量结构的优化。

日本新能源产业技术综合开发机构(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)在微网研究方面已取得了很多成果，在 2003 年的“Regional Power Grid with Renewable Energy Resources Project”项目中，着重开展 3 个微网的试点项目建设。这 3 个测试平台的研究都着重于清洁能源接入本地配电网的技术和管理问题，分别在青森县、爱知和京都。清洁能源在 3 个地区微网中都占有相当大的比重。目前日本在微网试点工程的建设方面处于世界领先地位。

目前，欧美日本等国家的微网试点工程，一般均以开展微网技术的试验验证为基本目的，均未考虑商业化运行。

总体来说，目前，欧美日等国家的联网型微网实验系统都可以实现正常运行：联网运行、孤岛运行、稳定对电网的输出、设备间的通信和控制、对电力市场的实时跟踪和与电力市场的互动等。像在实验室中那么完善的微网系统，也已经部分在示范工程中得到应用。但是这些微网试点工程，均以开展微网技术的试验验证为基本目的，均未考虑商业化运行，微网系统总的来说尚处于研究阶段。

4.1.3 联网型微网的国内发展现状

与发达国家相比，我国对分布式发电和微网的研究起步较晚。目前，电力公司和很多高校、研究机构都关注这一领域，并在国家“973”、“863”计划的支持下在该领域开展了一些研究工作，取得了一些阶段性的研究成果。其中，清华大学在微网运行的安全稳定性分析、分布式电源电力电子接口通用模型、微网一体化控制模型、微网实验平台等方面开展研究，取得了一些成果；天津大学对微网建模、微网的控制方法进行了研究；中科院电工所研制出适合微网的250kVA以下多款逆变器和100kW光伏-储能充电控制器，并研制完成了分布式电源数据采集和管理终端系统，开发了相应的微网能量管理软件；合肥工业大学依托教育部光伏系统工程研究中心建立了分布式发电与微网实验系统，在此基础上开展了分布式发电与微网运行控制、能量管理、安全保护等关键技术的研究。中国电科院在张北国家能源大型风电并网系统研发（实验）中心建成了微网实验平台，主要开展设计、控制、能量管理和保护等研究。

结合微网技术的发展，国家电网公司也推出了一批微网技术示范工程，主要包括：浙江省电力试验研究院微网实验系统、河南郑州财专光储微网试点工程、北京左安门微网试点工程、天津中新生态城智能营业厅微网试点工程和内蒙古呼伦贝尔盟陈巴尔虎旗赫尔洪德移民村微网工程等。

目前，国内联网型微网的功能相比起国外还较为简单，在技术层面上还需要解决以下问题：（1）联网运行状态下多目标优化控制，孤网运行状态下的电能质量控制技术；（2）双模式平稳无缝切换技术，多电压源并联稳定组网技术；（3）微网的保护技术，等。需要解决这些技术问题，为下一步在国内推广微网

示范工程提供关键设备和技术保障。

4.2 系统组成与配置原则

4.2.1 联网型微网系统的典型组成

联网型微网适合具备多种能源综合利用条件的地区，具有较好可再生能源资源，可再生能源高比例接入，且大电网覆盖的负荷中心区。联网型微网系统的典型组成主要包括光伏发电、风力发电、天然气发电和蓄电池等，典型系统主要有：

(1) 由风电、光伏等可再生能源和储能装置组成的以可再生能源为主的微网；(2) 由燃气轮机冷热电联产、柴油机等组成的多能互补微网。

4.2.2 联网型微网系统组成与配置原则

对微网的整体规模进行合理的规划设计，对微网内部各种微电源进行优化配置能够在保证微网内用户的能源需求，保障用户供电可靠性的同时，充分、合理地利用能源资源，提高分布式能源的利用效率，提高微网及外部电网运行的安全性、可靠性和经济性。如果微网内分布式能源类型、安装地点、容量等不合适，不仅不能发挥分布式能源的作用，还可能对配电系统运行产生负面影响，如增加电能损耗，导致电压越限等。为了建设可持续发展的微网及配电系统，必须对微网进行科学的规划与建设。

微网的系统组成方式与各种电源容量的优化配置，需根据因地制宜的原则，结合当地的资源和负荷情况进行具体规划设计，实现当地可再生能源的充分利用并保障当地负荷的可靠供电。一般来说，联网型微网内的分布式电源的优化配置，需满足以下几个基本原则：

(1) 结合当地的资源条件和气象条件，确定微网内分布式电源的类型及安装容量。首先，充分利用当地的资源条件和能源消耗特点，确定分布式电源的类型，如在日照强度较高的地区，可选择较多容量的太阳能电池板；在风光资源在时间和空间分布上具备互补性的地区，安装一定容量的光伏和风力发电；在热能需求量较大的地区，可选用热电联产的微型燃气轮机。其次，根据用户所在地的地理位置、地形条件、气象条件、资源条件、组件（包括风机、太阳能电池、蓄电池、柴油发电机、转换器等）实际的工作特性以及用户用电需求等来确定系统各部分

容量，使系统各部分尽可能工作在理想状态下。

(2) 在明确微网联网运行方式（定交换功率、零负荷、可控负荷等）的前提下，对微网内的分布式电源进行优化配置。

对于定交换功率型和零负荷型微网，需要对可控型的分布式电源的容量进行优化配置，保证微网内部自身能量的平衡。对于以可再生能源分布式电源为主的微网，需要对可再生能源的输出功率和负荷急剧波动时，平滑输出功率所需的蓄电池的容量进行优化配置。

除了零负荷或向电网吸收功率的微网外，向电网输出功率的微网和包含可再生能源分布式电源的不可控型微网接入大电网，都将对大电网造成一定的影响。由于联网运行是联网型微网的主要工作模式，所以在对微网内各种分布式电源的容量进行规划时，首先需要考虑微网接入对大电网的影响，使电网能够安全经济运行，从而对微网的规模进行限制。不可控型微网的规划模型，通常以各种分布式电源的安装容量为决策变量，以微网接入电网后，配电网的电压和短路电流限制、系统的功率平衡、分布式电源出力、线路的输电容量和接入点的短路容量等为约束条件，以系统的网损最小和微网的总投资以及环境效益最优为目标，通过对该规划模型进行优化求解进而确定各微电源的最优容量。

(3) 微网内各种微电源的优化配置需满足微网双模式运行的需要。联网型微网具有并网运行和孤岛运行两种运行模式，在确定微网内各种微电源的容量时，还要保证微网由并网转孤岛状态时以及微网短时的孤岛运行状态下系统的稳定性、经济性和可靠性。考虑极端天气情况下，微网孤岛运行的时间，从而确定微网内储能装置及可控微源的容量。

(4) 在有条件建设热电联产的地区，必须同时考虑热负荷的需求。为缓解能源紧张问题，加大燃气能源利用力度，近年来，冷热电联产作为一种燃气资源高效利用的先进技术受到越来越广泛的关注。包含冷热电联产的微网在规划设计时，要实现冷热电负荷之间的灵活匹配，提高系统整体的经济和社会效益。

4.3 微网与电网的相互影响

微网是一个以分布式发电为基础的复杂供能网络，相对于大电网存在着并网运行、大电网故障时解列孤岛运行、重新并网等多种运行状态。微网的大规模接

入必将对大电网的稳态潮流分布、暂态故障特性产生重大影响，给大电网的规划设计、潮流计算、电能质量、调度运行以及保护控制等方面带来新的问题。因此，有必要对微网接入对电网规划、运行和保护等方面影响进行研究，明确微网与大电网相互影响的作用规律及机理，进而提出微网与大电网在规划、运行、保护等方面的改进措施，为新型电网系统进行的技术升级和改造提供有力的理论依据。

(1) 对电网潮流的影响

分布式电源的接入会给配电网的潮流带来许多不利影响。风力发电、光伏发电系统等分布式电源的出力、启停受自然条件的影响较大，其功率输出具有较大的随机性，增加了潮流波动的随机性，进而导致配电网电压波动的随机性，增加了潮流控制的难度。

利用微网技术将各种形式的分布式电源、储能装置、用户等整合起来，通过集中的协调控制，可以获得负荷、分布式电源随机性的相互抵消效果，使微网作为一个整体所表现的随机性大大降低，从而降低了对配电网潮流的不利影响。通过对微网内部的控制，微网还可视为一个可调度的负荷或电源，当配电网潮流过重时，微网可转入孤岛运行；当配电网潮流过轻时，微网可以作为一个负荷并入电网。微网的这一特点，使其可作为一种配电网潮流调整控制的手段加以利用。微网作为可调度负荷，可以在一定程度内起到优化电网运行方式的作用，对电网的经济运行具有积极意义。

从运行特点上看，微网并网运行较分布式电源并网运行有一定的优势，由于自身的可控性，有利于配电网的潮流控制和优化运行，但仍会对配电网潮流计算带来一定的影响。例如，虽然微网并网比受自然条件影响的分布式电源并网带来的随机性减少，但由于微网联网运行时对外表现特性的不确定性以及孤岛、并网两种运行方式的随机性，仍会造成配电网网络拓扑的随机变化。因此需要对传统的配电网潮流算法进行改进。

(2) 对电网规划的影响

传统的配电网规划是在分析和预测配电区域负荷增长情况基础上，考虑一定的供电可靠性、网损因素，确定变电站的增容、新增变电站的定容定址、网架扩展及无功补偿。微网接入大电网尤其是配电网中，使配电系统由原来单一电能分配的角色转变为集电能收集、电能传输、电能存储和电能分配为一体的新型电力

交换系统,原有的将配电系统作为无源系统进行规划的方法已不再适应新环境下的系统规划要求。

如前面所述,联网型微网在配电网的规划和调度角度上,基本可以划分为可控负荷(电源)、不可控负荷、零负荷等。不控型微网是对负荷和分布式电源的简单组织,同分布式电源直接接入相似,不控型微网的接入会对配电网负荷预测、网损、无功平衡等方面带来影响,从而对接入配电网运行和规划产生复杂影响。可控负荷与零负荷属于可控微网,通过其内部控制器的先进控制技术和大容量蓄电池,对内部不同类型分布式电源和负荷进行封装,可以在并网点对公共电网表现更为简单和统一的负荷特性或电源特性,对配电网规划的影响与分布式发电的影响相比总体上更容易处理。随着控制技术的发展和储能成本的降低,不控型微网会被可控型微网取代,即未来配电网主要面向可控负荷(电源)和零负荷型微网,此类型微网将传统负荷转换为可调度负荷(电源),减轻了配电网的负担,便于配电网规划和调度。

在微网高渗透率的情况下,电网的负荷增长模式会发生很大变化,直接并入电网的负荷会随着微网的发展增长变慢,甚至出现负增长,公共电网对于负荷的功能由唯一供电方式转变为备用供电方式,将对电网公司传统的电网规划方式和整体发展思路带来深刻影响。

(3) 对电网稳定性的影响

微网中的分布式电源利用大量的风能、太阳能和生物能等可再生资源,能量的输出受地理情况、天气和气候等外界因素影响,导致微网与大电网的功率交换特性复杂,交换功率水平波动范围大,具有间歇性和不可预知性,大规模的微网接入势必会对大电网的电压、频率和功角稳定性造成影响。

微网接入后,大电网首先要研究的就是自身的稳定安全问题。当微网的渗透率能够影响到大电网的电压频率和功角稳定性时,微网对大电网稳定性的影响形势、内在机理及大电网提高稳定性的策略等问题就需要尽快开展研究。此外,微网中的分布式电源在扰动下的运行特性不同,这导致了当含有大规模微网接入的大电网在大、小不同的扰动下,与传统的电力系统在进行稳定理论分析、提高稳定性手段等问题上存在很大的不同。

(4) 对电网可靠性和电能质量的影响

微网的出现对配电网供电可靠性有重要影响。一方面，微网改变了传统配电网的供电模式，使配电网从辐射式的网络变为一个遍布电源和用户互连的网络，从而使配电网可靠性评估的模型和算法发生了本质性变化。另一方面，微网中往往采用风电和光伏发电等可再生能源电源，它们受季节、天气、时间等因素的影响，输出功率呈一定的随机特性，也大大增加了可靠性分析的复杂性。

含有微网的大电网，由于微网中分布式电源出力的随机变化，以及微网中的大功率电力电子变换装置，导致配电网在与微网的公共连接点处电压电流波形发生畸变，或者发生以随机波动为特征的稳态电能质量扰动；除此之外，微网的并网、与大电网解列、微电源的投退与切换、负荷冲击、故障等暂态过程，也会对电网的电能质量产生暂态扰动，使电网的电压电流短时偏移额定值。

(5) 对电网继电保护的影响

我国传统的中低压配电网主要是不接地、或经消弧线圈接地的单电源辐射型供电网络，线路保护多采用传统的三段式电流保护，并配有三相一次重合闸。联网型微网接入配电网，将使网络的结构将发生根本变化，变为多电源网络。联网型微网的接入将对配电线路故障电流的大小和方向带来影响，主要有以下几个方面：

- 改变了保护范围，可能引起保护拒动或误动。由于微网内分布式电源提供的故障电流的汲出作用，降低了流过保护的电流值，使其因达不到阈值而不能动作；或者由于微网内分布式电源提供的故障电流的助增作用，使得流过保护的电流增大，从而破坏了与下级保护的配合关系，而越级动作。
- 引起保护误动作。由于配电网原为单电源网络，保护装置通常不装设方向元件，微网的接入使得功率变成双向，从而在相邻线路发生故障时，保护误跳闸。
- 配电网故障水平的变化。微网内的分布式电源既可能造成故障电流的增加，也可能造成故障电流的减少。若微网的接入使得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。
- 当微网内分布式电源多为电力电子型时，可能产生某些高次谐波，此时需要对原保护继电器的滤波硬件或软件进行相应的调整，以滤除这类谐波。另外，其产生的电压闪变会对某些以电压为保护判据的继电保护装置产生影响。
- 影响自动重合闸。当电网发生故障并且相应的保护动作后，由于分布式电源

没有及时跳开，造成故障线路重合闸不成功。

- 非同期合闸。分布式电源与电网断开后重新并网时，必须检同期，避免非同期合闸对电网的影响。

因此，需要对典型微电源的故障特征，及微网的故障特征进行研究，从而明确微网接入对配电网继电保护系统的影响，提出新型配电网的继电保护策略。

4.4 系统适用性分析

联网型微网和大电网互联时能够通过内部自身的控制平滑其输出，当大电网发生故障时，也能够自动平滑过渡到孤岛运行状态，并能保证孤岛运行状态下系统的稳定运行，因此，基于上述优势，联网型微网主要适用于以下几种场合：

(1) 分布式可再生能源渗透率较高的地区（例如：建筑光伏接入较多的工业园区和城市屋顶、配电网结构薄弱的边远地区）。

在分布式可再生能源比例较高的地区，将分布式电源和负荷整合成微网的形式，统一接入大电网，可以平抑分布式可再生电源并网对电网的影响，提高电网对分布式可再生能源的接纳能力。

除了大规模可集中利用的可再生能源之外，我国广泛分布着以分布式电源出现的分布式可再生能源。由于这些分布式电源具有明显的随机性、间歇性和布局分散性的特征，因此随着分布式发电越来越多的与大电网联合运行，将会给电力系统的运行和控制带来不利影响。微网通过将地域相近的一组分布式源、储能装置与负荷进行整合，使其作为一个整体通过单点集中接入大电网，可通过内部不同分布式电源的互补特性、以及内部储能装置的控制，平滑分布式电源输出功率的波动，使微网对配电网表现为输出功率平稳的可控发电单元或者负荷，从而减少了各类分布式电源直接并网对大电网的影响，能够加快我国可再生能源的发展。

(2) 热电联产等多能互补地区。

微网将多种具有可互补性的分散型能源集中在同一物理网络中，通过多个能量转换环节，实现一次能源到二次能源的转化，能够有效提高对一次能源的利用效率。

目前，很多热电联产项目的供热集合程度以及综合效率发挥的并非很好，将

合适容量的热力用户与电力用户组成微网，作为一个整体供能系统，在满足用户供电需要的同时，还能满足供热、制冷、湿度控制和生活用水等多种需求，对于提高能源利用效率，优化能源结构、减少环境污染具有重要意义。

(3) 对电能质量和供电可靠性有特殊要求的电力用户。

配电网中的关键用户或敏感用户如医院、军事基地等，对电能质量和供电可靠性的要求较高，不仅要提供满足其特定设备要求的电能质量，还要能够避免暂时性的停电，满足对重要负荷的不间断供电需求。

由于微网具有定制性的特点，其主要体现在用户对电力的需求：1) 微网可以组建在中心城区，通过对负荷分级，提供分级供电，满足不同用户的电能质量需求，实现灵活供电；2) 微网通过电力电子装置、固态控制器、快速故障解除开关、储能系统等元件，确保电能质量敏感用户的供电可靠性和电能质量。因此，一方面，微网能够满足特定用户的电能质量需求。随着当前用电设备数字化程度的提高，其对电能质量也越来越敏感，电能质量问题可以导致终端系统的故障甚至瘫痪，对社会经济发展带来重大损失。另一方面，微网能够实时监测主电网的运行状态，在主电网故障时迅速从公共连接点解列平滑切换到独立运行状态，从而保证内部重要负荷的供电不受影响。

因此，联网型微网在满足特定用户对电能质量和供电可靠性要求方面具备一定的适用性。

(4) 灾害多发地区。

在灾害多发地区的负荷中心建立微网，可以提高供电备用，有利于故障后黑启动。微网对提高电网整体抗灾能力和灾后应急供电能力注入了一种新的思路。首先，作为大电网的一种补充形式，在特殊情况下（例如发生地震、暴风雪、洪水、飓风等意外灾害情况），微网可作为备用电源向受端电网提供支撑；同时，微网能够独立运行，可以迅速与大电网解列形成“孤网，从而保证重要用户的不间断供电；另外，在自然灾害多发地区，通过组建不同形式和规模的微网，能够在发生灾害后迅速就地恢复对重要负荷的供电，具有“黑启动”的能力。

综上，微网表现为一个有源配电单元，而不是传统意义的无源配电、用电环节。这种无源网向有源网的转变将有助于提高终端用户的供电可靠性和电能质量，提高系统的节能减排指标并改善突发事件下对用户的供电能力。同时，微网

作为智能电网的有机组成部分，需结合自身特点，立足我国国情，充分发挥微网小型化、模块化、分散式的特点，并充分体现微网的包容性、定制性、经济性和自治性的特点，积极推进微网在我国的发展和应用。

然而，总体来说，目前微网技术主要以科研为主，其技术成熟度尚未达到产业化的程度，还存在一些没有完全解决的技术问题，并且由于某些先进的监控和储能装置成本昂贵，导致目前微网的建设运营成本很高，所以在分布式电源渗透率不高的地区，分布式电源直接并网对电网影响不大的情况下，应首先考虑将分布式电源直接并网，或者简单的将分布式电源配备一定容量的储能并网。

4.5 系统经济性分析

通过对海岛型、偏远地区型和城市型三个方案进行国民经济评价，提出各方案评价结果如下。

(1) 海岛型微网项目

假定某海岛与大电网距离约 40km，如联入大电网需要采用海底电缆。海岛电网由 7 台单机容量 30kW 风力发电机组、100kWp 光伏发电系统、960kWh 蓄电池储能、300kW 光储一体化变流器（PCS）、1 台 200kW 柴油发电机及 1 套 50t/d 海水淡化系统组成。在实际运行中，微网系统根据可再生能源出力、蓄电池剩余容量状态及负荷大小情况，以有效使用可再生能源及合理使用蓄电池为原则，按照既定的运行策略在 PCS 模式或柴发模式下工作，根据系统内运行状态的变化对运行模式进行自动切换。

该岛建设项目按照微网建设、按照负荷直接接入大电网两种情况分析比较如下表所示：

表 4-1 微网运行与分布式发电直接接入主要经济技术指标

海岛项目主要经济技术指标比较		
电源类型	通过海底电缆大电网供电	微网
总建设成本（万元）	12890	1150.2
运行成本（万元）	385.8 万元/年	33.76 万元/年
其它成本	发电成本 27.8 万/年	更换储能 108 万元/3 年 燃料成本 61 万/年

发电小时（小时）	-	光伏 1000，风电 1200，柴油 1460
实际年发电量（万 kWh）	-	新能源 33.9 万 kWh，柴油发 电 29.2 万 kWh
接入电网费用（万元）	12800	0
电网配套成本（万元）	90	0
间接效益		节能效益 0.3 元/kWh，碳排放 税 10 元/吨（部分）
弃光量（万 kWh）	0	0
成本电价（元/kWh）	24.95	3.73

由上表可以得到微网国民经济评价结果远远高于负荷直接接入大电网经济性，主要是由于该岛与大电网距离超过 40km，需要采用海底电缆敷设，综合费用超过 300 万元/km。通过测算，保证微网国民经济评价满足社会折现率的要求，其单位电量成本约为 3.73 元/kWh，而通过海底电缆直接接入大电网，单位电量成本为 24.95 元/kWh。

该海岛项目国民经济评价结果显示，微网国民经济性远远优于负荷直接接入大电网。

（2）偏远地区型

假定某偏远地区微网内拟建光伏发电系统 150kWp 和 20kW 风力发电站，储能配置 100kW×2h 锂离子电池。按照负荷直接接入大电网、建设微网分析比较如下表所示：

表 4-2 微网运行与分布式发电直接接入主要经济技术指标

偏远地区项目主要经济技术指标比较		
电源类型	负荷直接接入大电网	微网
总建设成本（万元）	810.0.0	659.5
运行成本（万元）	22.5 万元/年	19.3 万元/年
其它成本	发电成本 10.54 万元/年	更换储能设备 100 万元/5 年
发电小时（小时）	-	光伏 1360，风电 2030
实际年发（用）电量（万	23.9	23.9

kwh)		
接入电网费用	710 万元 (超过 40km, 35kV)	0 万元
电源/电网建设成本	60 万元	0 万元
间接效益	0	同前
弃光量 (万 kWh)	0	0
成本电价	4.05 元/kWh	3.76 元/kWh

通过测算，若保证微网国民经济评价满足社会折现率的要求，其电价成本约为 3.76 元/kWh。本项目国民经济评价结果显示，其中接入电网费用是离网型微网是否经济的直接影响因素，本项目接网费用 710 万元时，建设离网型微网经济性较好，综合测算，在供电距离要求较远时（超过 10kV 允许供电范围，需要采用更好电压等级）离网型微网的经济效益才开始显现。

(3) 城市电网项目

某新区规划住宅 6856 户，规划总人口为 23996 人。根据建筑建设情况及负荷预测，电网建设方案为：建设 9 个区域 10kV/0.4kV 变压器 15 台，变压器单台容量 1250kVA；光伏项目最大发电为 13.4MWp；配置 6MW、4 小时锂电池储能装置；电网通过 3 回 10kV 电缆接入地区 10kV 配电站与主网联络。采用微网方案与光伏直接并网方案经济技术比较如表 4-3 所示。

表 4-3 微网方案与光伏并网方案经济技术比较

城市电网项目主要经济技术指标比较		
电源类型	光伏发电直接并网	微网
总建设成本 (百万元)	338.4	432.4
运行成本 (万元)	109.1	692
其它成本	0	更换储能设备 10800 万元/5 年
发电小时 (小时)	1179	960
实际年发电量 (万 kWh)	1580	1296
接入电网费用	45 万元	135 万元
电网配套成本	8680 万元	1890 万元
间接效益	节能效益 0.3 元/kWh, 碳税 10	同前

	元/吨	
弃光量 (万 kWh)	0	284
成本电价	2.11 元/kWh	4.70 元/kWh

由上表可以得出, 在本案例中微网国民经济评价结果低于光伏直接并网的经济性, 主要表现在本案例微网建设成本和运行成本高于光伏直接并网系统, 在保持与系统电力电量交换平衡的条件下, 会出现弃光电量损失。

3. 微网适用范围建议

国民经济评价结果显示, 海岛、农牧区等远离大电网地区, 电网延伸供电方式的成本过高, 独立型微网在这类地区具有显著的经济优势。在电网覆盖的城市中, 联网型微网经济性与建设成本、运行成本以及控制调度策略有紧密关系, 在建设初期应对相关因素进行综合评估, 否则发电成本有可能远远超过可再生能源直接并网发电系统。

4.6 典型案例

4.6.1 国外典型联网型微网示范工程及实验系统

(1) 欧洲典型的联网型微网示范工程包括:

丹麦 Bornholm 项目。Bornholm 为波罗的海中的一个岛屿, 其发电装置包括 34MW 的柴油发电机, 25MW 燃油汽轮发电机, 35MW 热电联产、2MW 沼气发电以及 30MW 的风力发电机, 为岛内的 28000 户居民提供电力供应 (峰值负荷为 55MW)。岛内包括 950 个 10/0.4kV 的变电站, 16 个 60/10kV 的变电站, 并通过一个 132/60kV 的变压器与瑞典电网相连。该示范平台用于多微网的建模、负荷和发电预测、基于潮流计算的安全运行准则、运行过程的仿真、有功和无功平衡、黑启动和重新并网研究等。资助和运行机构为 ELTRA。孤网运行时由热电联产机组作为主网单元, 此时不可控的风力发电机组的接入容量不得超过 10%, 可控风机只有 12MW, 实际接入孤岛微网的风力机不超过 15MW。该项目传统发电机组占比较大, 且孤岛运行时风电运行出力受到很大的限制, 部分关键技术还需要取得进一步的突破。

希腊国家可再生能源中心 (CRES) 及其实验室。该中心的实验微网系统配置如下:

- 2个多晶硅光伏方阵，1.1kW + 4.4kW，4.4kW方阵向南倾角45度（当地纬度37度58分），1.1kW方阵为双轴追日系统，各自通过单相并网逆变器并入微网；
- 一组 96V/400Ah铅酸蓄电池通过一台96V/9kW的三相双向逆变器与微网并网；
- 一组60V/690Ah铅酸蓄电池通过三台SMA单相双向逆变器组成三相电源并入微网；
- 一台三相12.5kVA柴油发电机组，输出400V/50Hz交流；
- 一套5kW质子交换膜燃料电池系统通过三台单相电压源并网逆变器(不是双向逆变器)并网。逆变器是Conergy的产品；
- 13kW三相平衡阻性负载、三相容性负载、2.2kW感性负载和2台单相水泵。

这个微网系统可以通过遥控方式与主电网相连接获断开，设备之间的通信和控制通过 Interbus 标准工业总线完成，设备通信采用 RS485 协议。数据采集和监控采用 SCADA 标准过程控制和调度自动化平台，可以在数据和控制界面观察所有微网中各个设备的运行状态，而且能够随意设定参数和控制设备的启停。微网可以联网运行也可以计划性孤岛运行。从孤岛运行切换到联网运行完全可以做到无缝切换，但联网运行时主电网突然断电，从断电到转到孤岛运行需要经过1.2秒。

(2) 美国典型的联网型微网示范工程包括：

Mad River Park 项目。供电区域为 6 个商业、工业厂区和 12 个居民区，分布式电源包括两台 100kW 的生物柴油机、两台 90kW 的丙烷柴油机、30kW 的燃气轮机。之后，将会陆续加入燃料电池、风机、飞轮等分布式电源和储能装置。结构如图 4-2 所示，接入 7.2kV 配网，既可独立运行，也可并网运行。资助和运行机构为北方电力 Northern Power Systems 和 NREL。

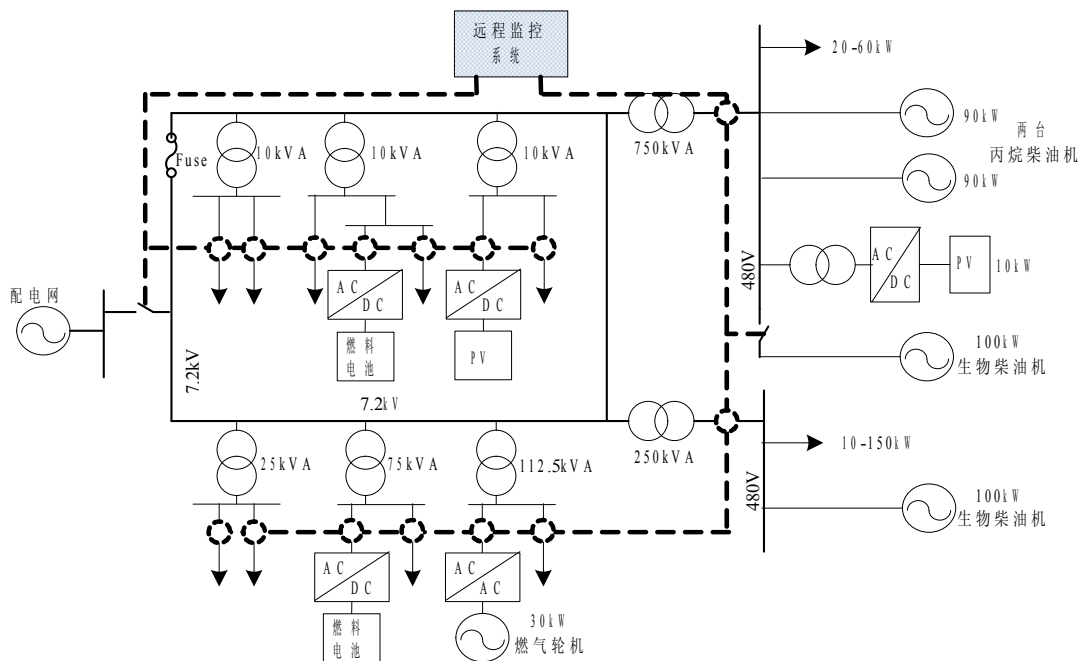


图 4-2 MAD river 微网结构

美国夏威夷Lanai island（拉奈岛）微网示范系统。拉奈岛光伏微网示范系统由1.2MW单轴跟踪光伏系统、储能系统、光伏逆变器、配电系统和升压变组成，最终并入当地电网。当地目前是由柴油发电机组供岛上用电，拉奈岛光伏微网系统能提供岛上10%的电力需求，穿透率达30%。拉奈岛光伏微网系统的工作模式设计为600kW恒功率输出模式，当光伏阵列输出功率大于600kW时，光伏阵列为储能系统（液流电池）充电，光伏微网系统输出维持在600kW；当太阳辐射较弱，光伏阵列输出低于600kW时，储能系统放电，使光伏微网输出仍维持在600kW。

(3) 日本典型的联网型微网示范工程包括：

Hachinohe project 项目。如图 4-3 所示，污水处理厂配有 3 个 170kW 燃气轮机，80kW 光伏发电系统，20kW 风机，100kW 铅酸蓄电池，接入 200V 电压等级，发出电力通过 5km 的私营配线输送到 4 个学校、水利局办公楼和市政办公楼，学校内也有小型风机和光伏发电系统。Hachinohe 微网通过单点接入电网，不允许反向潮流，并且与电网之间的功率交换维持恒定。既可并网运行也可独立运行。控制目标是 6 分钟内供需不平衡控制在 3%以内。在测试过程中，该目标完成率为 99.99%。在 2007 年 11 月独立运行一周。

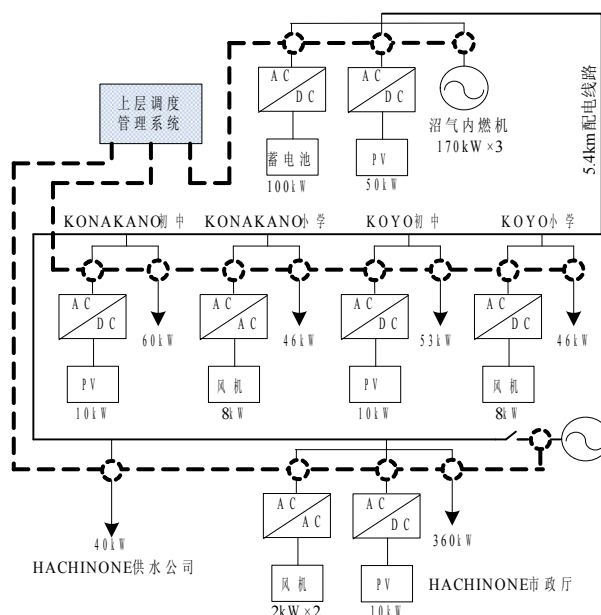


图 4-3 Hachinohe 微网结构

日本群馬县太田市高密度高渗透率太阳能应用实证系统。本项目2002 - 2004年，由日本NEDO建设，2004 - 2010年进行示范运营和实证。项目地点方圆5公里，共覆盖553户居民光伏建筑，合计装机容量2129kW，接入当地配电侧电网。

本项目的实证目的是研究配电侧光伏并入电网时避免弃光和功率抑制；研究新型孤岛保护技术、研究高次谐波分析评价技术以及仿真技术等。实证了每户家庭不同装机容量（3、3-3.5、3.5-4.0、4.0-4.5 KW）、不同安装方位（东、南、西、东+南、东+西、南+西、东+南+西）光伏与建筑结合方式和性能；实证期间，每个家庭系统安装了9KW铅酸蓄电池储能单元，控制策略是光伏发电馈入电网时容易导致电压升高，储能系统白天起到稳定电压作用，晚上放电使用。

项目利用光纤对550户家庭系统发电和用电信息收集到统一的管理服务器上进行集中管理和监视。

实证期间的购电电价为深夜低谷电价9日元/kwh，白天高峰电价40日元/kwh，一般时间平均电价24日元/kwh；光伏上网电价24日元/kwh。项目采用双表单向计量。

4.6.2 国内典型联网型微网示范工程及实验系统

北京左安门微网试点工程。该系统是北京市电力公司按照国家电网公司建设智能电网的总体部署和技术要求，在左安门公寓建设的智能用电小区试点展示

项目的组成部分。该系统配置 50kWp 光伏、30kW 三联供机组和 72kWh 铅酸电池，接入 0.4kV 电压等级，既可独立运行，也可并网运行。左安门微网试点项目于 2011 年年初投入运行。

天津中新生态城智能营业厅微网试点工程。国家电网智能电网首批综合试点重点工程。微网以智能营业厅为依托，装机规模 35kW。配置 30kWp 光伏、5kW 风电和 25kW×2h 锂电池，电压等级为 380V。该项目由国家电网公司出资建设并负责运营管理。

内蒙古呼伦贝尔盟陈巴尔虎旗赫尔洪德移民村微网工程。国家电网公司智能电网建设项目。配置 30kWp 光伏、20kW 风电和 42kW*1h 锂离子电池，接入 0.4kV 电压等级，既可独立运行，也可并网运行。在陈巴尔虎旗赫尔洪德移民村选取 24 户居民和挤奶站作为微网负荷，建设并网型微网试点工程，主要研究并网型微网，该项目由国家电网公司出资建设并负责运营管理，目前已完成技术方案的修订，处于建设阶段。

中国电科院张北微网实验系统。如图 4-4 所示，该系统由 10kW 风力发电系统、80kW 薄膜电池光伏发电系统、400kWh 双模式锂电池储能系统、200kWs 超级电容器储能系统、滤波补偿成套装置以及可控负载组成。该微网能够实现并网运行状态下的功率控制、稳定的孤岛运行、并网/独立运行状态的无缝切换、以及黑启动等功能。

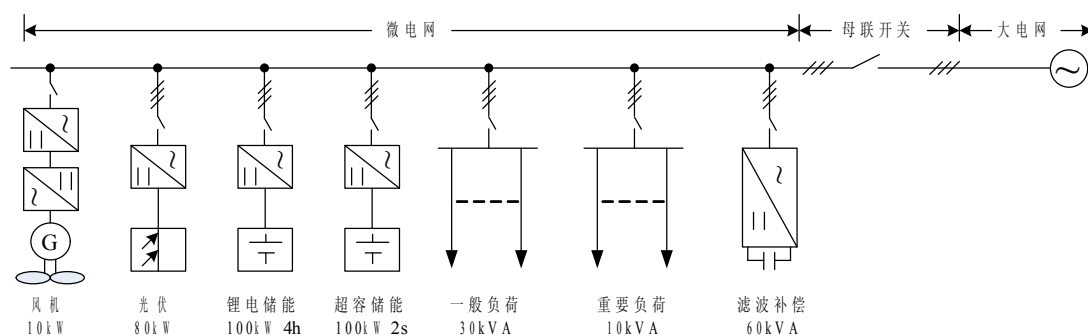


图 4-4 中国电科院张北微网实验平台

该微网并网运行时，通过能量管理系统对锂电池储能系统进行控制，可以抑制微网内负荷、风电和光伏发电出力的随机性和波动性引起的并网点功率波动，实现并网点功率灵活控制。该微网具有两种并网运行模式：（1）以最大利用风能和太阳能为目的，分布式电源以最大功率并网运行，储能系统只用于平抑并网点

功率突变,保障并网点电能质量在合格范围之内,此时微网并网点功率存在一定的随机波动性;(2)按照调度指令,或者按照网损、经济性等多目标优化控制策略,通过微网能量管理系统,对分布式电源出力和储能单元进行控制与协调配合,实现并网点功率可控,微网整体对于主电网而言成为一个可控单元。

该微网在独立运行状态时,微网的电压和频率由锂电池储能单元提供。能量管理系统基于风电和光伏发电功率预测技术,提前安排锂电池的出力计划,结合负荷调度技术,实现了微网的经济优化调度。

微网在运行过程中会根据大电网的实时状态可自动实现微网的并网/独立双模式的切换运行:在大电网断电时,微网可自动切换成独立运行模式;当大电网恢复后,微网可自动并网运行。两种运行模式切换不需要停电,实现了真正的无缝切换。

该微网实验室开展了微网黑启动相关技术研究,在极端情况下大电网和微网全停后,微网首先通过锂电储能主网单元建立微网的电压和频率,然后各类分布式发电单元依次并网,实现微网的独立稳定运行。

第五章 微网发展面临的问题与挑战

微网作为一种新兴的能源利用形式，在日本、美国和欧洲国家经过了多年研究和技术开发，但是国外实际运行的微网系统规模还不大（兆瓦级以下），核心技术及装备并不完善，管理体制也正在探索之中。我国在“十二五”期间发展和推广微网系统，将面临技术研发、政策探索和体系建设的巨大挑战，同时也面临利用先进的微网技术解决或缓解可再生发电大量接入、边远地区供电、电网用户可靠用电等问题的重大机遇。

5.1 研究与开发

(1) 微网系统集成是一个多变量、多目标、多影响因素的复杂系统设计问题，需要深入研究和示范。微网系统集成需要解决不同发电系统和储能系统，无功补偿装置、电能质量调节器等辅助设备，输配电网络及变电设备，测量、通信、控制与能量管理系统，以及供冷和供热系统的布局与配置；集成方案必须根据现场条件和用户需要，保证系统稳定性、可靠性和经济性，加大可再生能源利用水平，系统集成设计复杂多样，并且没有成熟的分析与设计工具。

(2) 适合微网运行的控制器、逆变器、继电保护装置和能量管理系统等关键装备亟待研发与产业化。在国内外，电压源特性的逆变器仅达到数百千瓦、且很少可并联运行，大功率的光伏-储能充电控制器仅有百千瓦级试验样机，储能装置的双向变流器产品尚不成熟，适应分布式电源双向功率流动的继电保护装置还是空白，实现微网最优运行的能量管理技术还有待完善。适合微网的各类电力电子设备、控制与保护装置等关键设备必须依靠我国自主研发及产品化开发。

(3) 我国对于微网的实证研究十分薄弱，可推广的系统方案和具体政策缺乏数据支持。我国还没有一个面向不同地域、不同资源和电网条件、不同应用需求的分布式发电和微网实证研究网络，已投运的微网工程还没有长期观测数据，风电场、光伏电站等分布式发电项目公开完整数据的很少，国内缺乏对不同系统适用性、经济性的比较研究，从而难以掌握有针对性的、适合推广的系统总体方案，也难以为国家制定微网中长期发展战略和具体政策制度提供支撑。

(4) 适合中国国情的微网市场化研究基本空白，从示范应用到规模化推广

的进程缺少路线图指引。我国对于用户侧的分布式发电和微网还没有制定发展路线图，联网型微网还存在不少制度上的障碍。当前亟需开展微网市场化研究，为发展战略、政策法规、管理体制等非技术问题找到解决方案，为如何逐渐推进微网市场化、在哪些应用环境首先实现市场化、制定哪些配套政策以及电价补贴调整等问题找到办法，最终实现在无补贴情况下的微网市场可持续发展。

5.2 政策制定与实施

国家“十二五”可再生能源发展规划中提出，到2015年建成30个“新能源微网示范工程”。为了使微网示范工程得以落实，当前必须推出相关政策和实施办法。

(1) 基于我国现行政策体制，需要确定不同类型示范工程的商业模式。 联网型微网有大电网依托，并网型风电、光伏发电技术比较成熟，在获得适当的电价补贴政策后，这类系统具备商业化运营条件。然而对于自用型、外送型和服务型微网系统具体采取什么经营模式，目前还存在较大争议，商业模式的选择既要能够推动微网的发展，也要兼顾电网企业和各利益相关方。

(2) 为落实“十二五”微网示范工程，当前亟需制定实施方案。 从示范工程的典型性考虑，独立型微网和联网型微网应该各有多少示范系统？怎样在全国范围内分布才更加合理？如何组织示范工程项目的策划、申报、监督和管理？许多问题目前无章可循，而示范工程项目一旦启动，在一、两年内就投入运行，因此必须提前制定相关的实施方案和管理办法。

(3) 针对微网的不同商业模式，亟需出台相应的国家投资和补贴政策。 根据风电、光伏发电的发展经验，上网电价是发展并网系统最有力的推动措施，类似经验可以移植到联网型微网，然而对于自用型、外送型和服务型等不同商业模式是否实行差别化电价，如何起到经济杠杆的作用，还需要深入研究。独立型微网适合在边远海岛、农牧区应用，是否延续国家“无电地区电力建设”项目的政策，或是统一实行上网电价政策，也需要进一步确定。

5.3 支撑体系建设

(1) 分布式发电和智能微网方面还没有国家级实验室、工程技术中心和实

验基地。分布式发电与储能、智能微网存在大量技术难题，相关检测技术及检测设备基本空白，组建国家实验室，有利于集中资源实现全面技术突破，在国际上取得优势竞争地位；组建国家工程技术中心，能够面向实际项目提供设计与工程技术支持，工程装备的研发支持，现场工程测试技术支持；组建国家级实验基地，能够为全行业提供新技术、新设备、新产品、新系统的实证研究平台。

(2) 分布式发电和智能微网的认证制度和标准体系还不完善。风电、光伏、储能等方面虽然有不少标准规范，并且也已经有了一些行业认证（如“金太阳认证”），但是从标准体系来看，针对微网的标准规范还有大量空缺，不少旧标准亟需更新，面向微网建设的认证体系还没有建立，国内标准和认证还没有完全实现与国际接轨。

(3) 面向分布式发电和智能微网的专业人才体系建设滞后严重。近年来风电、光伏的迅猛发展为社会创造了大量就业机会，但是从业人员数量众多，人员素质参差不齐，高端专业人才匮乏。建设和完善专业人才体系，建立工程师执业认证制度、专业水平测评制度，通过大专院校和社会培训机构提供专业化教育，有利于为各类专业岗位提供大量合格人才，提高从业人员的整体专业素质。

第六章 微网发展前景展望

微网是与主干电网并行发展的完全不同的供电模式，是未来电力系统主要供电方式之一。微网系统允许多种能源接入，包括水电、光伏、风电、燃气/燃油发电、储能、燃料电池等，能量供给的连续性比单纯的光伏发电和单纯的风力发电好得多，因此只需要相对少的储能就能够保证微网的稳定、持续和可靠供电，系统中除了基本负荷外，还配有可调节负荷。这样的微网可以脱离主干电网运行，也可以连接在主干电网上运行，电力的潮流可以双向流动，对于主干电网来说，微网属于“可控单元”。微网对分布式电源的有效利用及灵活、智能的控制特点，在解决间歇性的分布式电源接入问题中表现出极大潜能。

我国发展微网源于电力系统自身发展的需求。微网作为大电网的一种有益的补充形式，能够高效、经济地实现对用户的多样化、高可靠性的供电要求。而且，随着经济发展和人民生活条件的不断改善，夏季空调用电持续攀升，电网短时间的尖峰负荷越来越大。若采用增加发电装机容量的方法来满足高峰负荷是很不经济的，而利用微网来充分调动分布式电源和负荷参与系统调峰，则能够有效缓解峰谷差问题。我国发展微网源于提高电网抗灾能力的迫切需求。如何在极端恶劣的灾害条件下保障重要负荷的持续供电和提供可靠的应急电源，是提高电力系统的抗灾能力的关键。微网可以在故障时与大电网断开独立运行，在突发灾难时能够保障重要负荷的供电，具有一定的抗灾能力。

未来微网发展要充分利用可再生能源发电，发挥可再生能源优势；要积极与中小型热电联产相结合，发挥综合利用优势，提高能效，降低消耗；要积极结合小水电，解决偏远地区用电问题；要积极提高电力系统防御能力，在灾害多发地区组建微网，建立健全电力抗灾预警系统，提高电网供电可靠性和故障情况下应急能力。结合我国国情，光伏微网既可以部署在边远无电地区，也可以部署在城市建筑环境和海岛，受区域环境制约较小。在我国西藏、青海、新疆等太阳能资源优良的地区，建设水/光/储互补微网示范系统，可以解决无电地区生活生产用电问题；在电网已经覆盖的城市和乡镇等太阳能资源优良地区，建设光/储互补微网示范系统，可以提高抗灾应急能力。目前，微网的研究在我国还处于起步阶段，但随着智能电网发展战略的实施，微网将获得巨大的发展机遇。随着微网技

术的开发和创新，微网系统将逐步实现商业化，必将在我国现代化建设的进程中发挥更大潜力。