

微电网研究综述

鲁宗相¹, 王彩霞¹, 闵勇¹, 周双喜¹, 吕金祥², 王云波²

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084; 2. 辽宁高科能源集团, 辽宁省沈阳市 110141)

摘要: 微电网已成为一些发达国家解决电力系统众多问题的一个重要辅助手段。文中旨在详细阐释微电网的结构和概念, 澄清微电网与分布式发电间的联系和区别, 并在总结微电网的国际研究动态和成果的基础上, 为中国的微电网发展提供建议。首先, 介绍了从分布式发电到微电网的发展历程, 通过一个典型的微电网结构对微电网的概念和特点进行了详细阐释。其次, 总结了微电网在一些发达国家的发展概况和研究进展, 并提炼出现阶段微电网研究中的关键问题和相关研究现状。最后, 结合中国的能源战略和电力发展现状, 对微电网在中国的发展潜力和应用形式进行了探讨。

关键词: 分布式发电; 微电网; 战略; 关键问题

中图分类号: TM61; TM91

1 从分布式发电到微电网

随着国民经济的发展, 电力需求迅速增长, 电力部门大多把投资集中在火电、水电以及核电等大型集中电源和超高压远距离输电网的建设上。但是, 随着电网规模的不断扩大, 超大规模电力系统的弊端也日益凸现, 成本高, 运行难度大, 难以适应用户越来越高的安全性和可靠性要求以及多样化的供电需求。尤其在近年来世界范围内接连发生几次大面积停电事故之后, 电网的脆弱性充分暴露了出来。人们不禁要问, 未来的电力系统应该采取什么样的发展模式? 一味地扩大电网规模显然不能满足要求。人们开始另辟蹊径, 分布式发电被提上了日程。分布式发电具有污染少、可靠性高、能源利用效率高、安装地点灵活等多方面优点, 有效解决了大型集中电网的许多潜在问题。

目前, 欧美等发达国家已开始广泛研究能源多样化的、高效和经济的分布式发电系统, 并取得了突破性进展。无疑, 分布式发电将成为未来大型电网的有力补充和有效支撑, 是未来电力系统的发展趋势之一。

实际上, 小电源分散发电并非新概念, 早期的电力系统都是规模较小的分散独立系统。随着交流高压远距离输电技术的发展, 联网的规模效益日趋显著, 人们开始将各分散系统连接起来并网运行。但在 20 世纪 60 年代的几次大停电事故后, 就有人开始对集中供电提出质疑^[1-2], 但其后并未开展深入研究。20 世纪 90 年代, 人们才开始对分布式发电系统的潜在效益展开认真研究, 并发表了许多研究报

告和论文^[3-4]。

分布式发电也称分散式发电或分布式供电, 一般指将相对小型的发电装置(一般 50 MW 以下)分散布置在用户(负荷)现场或用户附近的发电(供电)方式。分布式电源位置灵活、分散的特点极好地适应了分散电力需求和资源分布, 延缓了输、配电网升级换代所需的巨额投资, 同时, 它与大电网互为备用也使供电可靠性得以改善。

分布式电源尽管优点突出, 但本身存在诸多问题, 例如, 分布式电源单机接入成本高、控制困难等。另外, 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。IEEE P1547 对分布式能源的入网标准做了规定: 当电力系统发生故障时, 分布式电源必须马上退出运行。这就大大限制了分布式能源效能的充分发挥。为协调大电网与分布式电源间的矛盾, 充分挖掘分布式能源为电网和用户所带来的价值和效益, 在本世纪初, 学者们提出了微电网的概念^[5-8]。

微电网从系统观点看问题, 将发电机、负荷、储能装置及控制装置等结合, 形成一个单一可控的单元, 同时向用户供给电能和热能。微电网中的电源多为微电源, 亦即含有电力电子界面的小型机组(小于 100 kW), 包括微型燃气轮机、燃料电池、光伏电池以及超级电容、飞轮、蓄电池等储能装置。它们接在用户侧, 具有低成本、低电压、低污染等特点。微电网既可与大电网联网运行, 也可在电网故障或需要时与主网断开单独运行。它还具有双重角色: 对于公用电力企业, 微电网可视为电力系统可控的“细胞”, 例如, 这个“细胞”可以被控制为一个简单的可调度负荷, 可以在数秒内做出响应以满足传输系统

的需要;对于用户,微电网可以作为一个可定制的电
源,以满足用户多样化的需求,例如,增强局部供电
可靠性,降低馈电损耗,支持当地电压,通过利用废
热提高效率,提供电压下陷的校正,或作为不可中断
电源。由于微电网灵活的可调度性且可适时向大电
网提供有力支撑,学者形象地称之为电力系统的“好
市民”(good citizen)和“模范市民”(model citizen)。
此外,紧紧围绕全系统能量需求的设计理念和向用
户提供多样化电能质量的供电理念^[9]是微电网的
2个重要特征。在接入问题上,微电网的入网标准
只针对微电网与大电网的公共连接点(PCC),而不
针对各个具体的微电源。微电网不仅解决了分布式
电源的大规模接入问题,充分发挥了分布式电源的
各项优势,还为用户带来了其他多方面的效益。

2 微电网基本结构

图1是美国电力可靠性技术解决方案协会
(CERTS)提出的微电网基本结构。

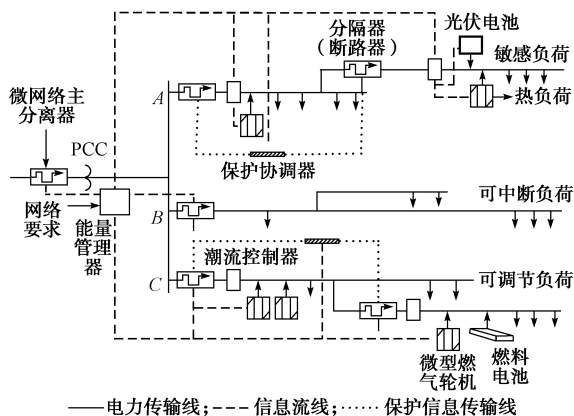


图1 CERTS提出的微电网结构

Fig.1 Topological structure of microgrid
proposed by CERTS

图中包括3条馈线A,B和C及1条负荷母线,
网络整体呈辐射状结构。馈线通过主分隔装置(通
常是一个静态开关)与配电系统相连,可实现孤网与
并网运行模式间的平滑切换。该开关点即PCC所
在的位置,一般选择为配电变压器的原边侧或主网
与微电网的分离点。IEEE P1547标准草案规定:在
PCC处,微电网的各项技术指标必须满足预定的规
范。负荷端的馈线电压通常是480V或更低。

图1展示了光伏发电、微型燃气轮机和燃料电
池等微电源形式,其中一些接在热力用户附近,为
当地提供热源。微电网中配置能量管理器和潮流控
制器,前者可实现对整个微电网的综合分析控制,
而后可实现对微电源的就地控制。当负荷变化时,
潮流控制器根据本地频率和电压信息进行潮流调
节,

当地微电源相应增加或减少其功率输出以保持功
率平衡。

图1还示范了针对3类具有不同供电质量要
求的负荷的个性化微电源供电方案。对于连接在
馈线A上的敏感负荷,采用光伏电池供电;对于连
接在馈线C上的可调节负荷,采用燃料电池和微型
燃气轮机混合供电;对于连接在馈线B上的可中
断负荷,没有设置专门的微电源,而直接由配电网
供电。这样,对于敏感负荷和可调节负荷都是采
用双源供电模式,外部配电网故障时,馈线A,C
上的静态开关会快速动作使重要负荷与故障隔离
且不间断向其正常供电,而对于馈线B上的可中
断负荷,系统则会根据网络功率平衡的需求,在
必要时将其切除。

该结构初步体现了微电网的基本特征,也揭
示出微电网中的关键单元:①每个微电源的接口
、控制;②整个微电网的能量管理器,解决电压控
制、潮流控制和解列时的负荷分配、稳定及所有
运行问题;③继电保护,包括各个微电源及整个
微电网的保护控制。

微电网虽然也是分散供电形式,但它绝不是
对电力系统发展初期的孤立系统的简单回归。微
电网采用了大量先进的现代电力技术,如快速的
电力电子开关与先进的变流技术、高效的新型电
源及多样化的储能装置等,而原始孤立系统根本
不具有这样的技术水平。此外,微电网与大电网
是有机整体,可以灵活连接、断开,其智能性与
灵活性远在原始孤立系统之上。

3 微电网在国外的研究概况与进展

负荷的持续增长、电力系统结构的不断老
化、环保问题、能源利用效率瓶颈以及用户对电
能质量的高标准要求,已成为世界各国电力工业
所面临的严峻挑战。微电网对分布式电源的有
效利用及灵活、智能的控制特点,使其在解决上
述问题方面表现出极大潜能,是许多国家未来若
干年电力发展战略的重点之一。目前,一些国家
已纷纷开展微电网研究,立足于本国电力系统的
实际问题与国家的可持续发展能源目标,提出了
各自的微电网概念和发展目标。作为一个新的
技术领域,微电网在各国的发展呈现不同特色。

3.1 美国的微电网研究

美国CERTS最早提出了微电网的概念^[6-8],
并且是众多微电网概念中最权威的一个。美国
CERTS提出的微电网主要由基于电力电子技术
且容量小于等于500kW的小型微电源与负荷
构成,并引入了基于电力电子技术的控制方法。
电力电子技术是美国CERTS微电网实现智能、
灵活控制的

重要支撑,美国 CERTS 微电网正是基于此形成了“即插即用”(plug and play)与“对等”(peer to peer)的控制思想和设计理念。美国 CERTS 在文献[10]中对其微电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 微电网的定义、结构、控制、保护及效益分析等一系列问题。目前,美国 CERTS 微电网的初步理论研究成果已在实验室微电网平台上得到了成功检验^[11-12]。由美国北部电力系统承建的 Mad River 微电网^[13-14]是美国第 1 个微电网示范工程,学者们希望通过该工程进一步加深对微电网的理解,检验微电网的建模和仿真方法、保护和控制策略以及经济效益等,并初步形成关于微电网的管理政策和法规等,为将来的微电网工程建立框架。

美国的微电网工程得到了美国能源部的高度重视。2003 年,布什总统提出了“电网现代化”(grid modernization)的目标,指出要将信息技术、通信技术等广泛引入电力系统^[15],实现电网的智能化。在随后出台的“Grid 2030”^[16]发展战略中,美国能源部制定了美国电力系统未来几十年的研究与发展规划,微电网是其重要组成之一。在 2006 年的美国微电网会议上,美国能源部对其今后的微电网发展计划进行了详细剖析^[17]。

从美国电网现代化角度来看,提高重要负荷的供电可靠性、满足用户定制的多种电能质量需求、降低成本、实现智能化将是美国微电网的发展重点。CERTS 微电网中电力电子装置与众多新能源的使用与控制,为可再生能源潜能的充分发挥及稳定、控制等问题的解决提供了新的思路。

3.2 日本的微电网研究

日本立足于国内能源日益紧缺、负荷日益增长的现实背景,也展开了微电网研究,但其发展目标主要定位于能源供给多样化、减少污染、满足用户的个性化电力需求^[18]。对于微电网的定义,日本三菱公司将微电网从规模上分为 3 类,具体如表 1 所示。

表 1 日本三菱公司对微电网的分类
Table 1 Classifications of microgrids by Mitsubishi Ltd

类型	发电容量/MW	燃料	应用场合	市场规模
大规模	1 000	石油或煤	工业区	10~20
中规模	100	石油或煤、可再生能源	工业园	100
小规模	10	可再生能源	小型区域电网、住宅楼、岛屿和偏远地区	3 000

从表中可看出,以传统电源供电的独立电力系统也被归入微电网研究范畴,大大扩展了美国 CERTS 对微电网的定义范围。基于该框架,目前日本已在其国内建立了多个微电网工程^[18]。此外,

日本学者还提出了灵活可靠性和智能能量供给系统(FRIENDS—flexible reliability and intelligent electrical energy delivery system)^[19],其主要思想是在配电网中加入一些灵活交流输电系统(FACTS)装置,利用 FACTS 控制器快速、灵活的控制性能,实现对配电网能源结构的优化,并满足用户的多种电能质量需求。目前,日本已将该系统作为其微电网的重要实现形式之一,文献[19]还将该思想与热电联供设计理念相结合,以期更好地实现环境友好和能源高效利用。

多年来,新能源利用一直是日本的发展重点。为此,日本还专门成立了新能源与工业技术发展组织(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。NODE 在微电网研究方面已取得了很多成果^[20]。日本对微电网定义的拓宽以及在此基础上所进行的控制、能源利用等研究,为小型配电系统及基于传统电源的较大规模独立系统提供了广阔的发展空间。

3.3 欧洲的微电网研究

从电力市场需求、电能安全供给及环保等角度出发,欧洲于 2005 年提出“聪明电网”计划^[21],并在 2006 年出台该计划的技术实现方略^[22]。作为欧洲 2020 年及后续的电力发展目标,该计划指出未来欧洲电网需具备以下特点:

- 1) 灵活性:在适应未来电网变化与挑战的同时,满足用户多样化的电力需求。
- 2) 可接入性:使所有用户都可接入电网,尤其是推广用户对可再生、高效、清洁能源的利用。
- 3) 可靠性:提高电力供应的可靠性与安全性以满足数字化时代的电力需求。
- 4) 经济性:通过技术创新、能源有效管理、有序市场竞争及相关政策等提高电网的经济效益。

基于上述特点,欧洲提出要充分利用分布式能源、智能技术、先进电力电子技术等实现集中供电与分布式发电的高效紧密结合,并积极鼓励社会各界广泛参与电力市场,共同推进电网发展。微电网以其智能性、能量利用多元化等特点也成为欧洲未来电网的重要组成。目前,欧洲已初步形成了微电网的运行、控制、保护、安全及通信等理论,并在实验室微电网平台上对这些理论进行了验证。其后续任务将集中于研究更加先进的控制策略、制定相应的标准、建立示范工程等^[23],为分布式电源与可再生能源的大规模接入以及传统电网向智能电网的初步过渡做积极准备。

除美国、日本、欧洲外,加拿大、澳大利亚等国也展开了微电网研究^[24-27]。从各国对未来电网的发展战略和对微电网技术的研究与应用中可清楚看出,

微电网的形成与发展绝不是对传统集中式、大规模电网的革命与挑战,而是代表着电力行业服务意识、能源利用意识、环保意识的一种提高与改变。微电网是未来电网实现高效、环保、优质供电的一个重要手段,是对大电网的有益补充。

4 微电网中的关键问题及相关研究

4.1 电力技术方面

4.1.1 微电网的控制

由微电网的结构分析可看到,微电网如此灵活的运行方式与高质量的供电服务,离不开完善的稳定与控制系统。控制问题也正是微电网研究中的一个难点问题。其中一个基本的技术难点在于微电网中的微电源数目太多,很难要求一个中心控制点对整个系统做出快速反应并进行相应控制,往往一旦系统中某一控制元件故障或软件出错,就可能对整个系统瘫痪。因此,微电网控制应该做到能够基于本地信息对电网中的事件做出自主反应,例如,对于电压跌落、故障、停电等,发电机应当利用本地信息自动转到独立运行方式,而不是像传统方式中由电网调度统一协调。

具体来讲,微电网控制应当保证^[10]:①任一微电源的接入不对系统造成影响;②自主选择运行点;③平滑地与电网并列、分离;④对有功、无功进行独立控制;⑤具有校正电压跌落和系统不平衡的能力。

目前,已有3类经典的微电网控制方法:

1)基于电力电子技术的“即插即用”与“对等”的控制思想^[26]

该方法根据微电网控制要求,灵活选择与传统发电机相类似的下垂特性曲线进行控制,将系统的不平衡功率动态分配给各机组承担,具有简单、可靠、易于实现的特点。但该方法没有考虑系统电压与频率的恢复问题,也就是类似传统发电机中的二次调整问题,因此,在微电网遭受严重扰动时,系统的频率质量可能无法保证。此外,该方法仅针对基于电力电子技术的微电源间的控制。

2)基于功率管理系统的控制^[29]

该方法采用不同控制模块对有功、无功分别进行控制,很好地满足了微电网多种控制的要求,尤其在调节功率平衡时,加入了频率恢复算法,能够很好地满足频率质量要求。另外,针对微电网中对无功的不同需求,功率管理系统采用了多种控制方法,从而大大增加了控制的灵活性并提高了控制性能。但与第1种方法类似,这种方法只讨论了基于电力电子技术的机组间的协调控制,未综合考虑它们与含调速器的常规发电机间的协调控制。

3)基于多代理技术的微电网控制方法^[30]

该方法将传统电力系统中的多代理技术应用于微电网控制系统。代理的自治性、反应能力、自发行等特点^[31]正好满足微电网分散控制的需要,提供了一个能够嵌入各种控制性能但又无需管理者经常出现的系统。但目前多代理技术在微电网中的应用多集中于协调市场交易、对能量进行管理方面,还未深入到对微电网中的频率、电压等进行控制的层面。要使多代理技术在微电网控制系统中发挥更大作用,仍有大量研究工作需要进行。

文献[32]综合各国研究现状,指出微电网控制系统的未来研究方向是:①在独立和并网2种运行方式下,已有的频率、电压控制方法在微电网中的适用性校验;②不同类型微电源(如基于变流器和不基于变流器;可控和间歇)的运行和控制;③更加先进、智能的控制策略。

4.1.2 微电网的保护

微电网的保护问题与传统保护有着极大不同,典型表现有:①潮流的双向流通;②微电网在并网运行与独立运行2种工况下,短路电流大小不同且差异很大。因此,如何在独立和并网2种运行工况下均能对微电网内部故障做出响应以及在并网情况下快速感知大电网故障,同时保证保护的选择性、快速性、灵敏性与可靠性,是微电网保护的关键,也是微电网保护的难点。

传统的电流保护显然无法满足微电网保护的特殊要求。目前,针对单相接地故障与线间故障,有学者提出了基于对称电流分量检测的保护策略^[33]。该方法以超过一定阈值的零序电流分量和负序电流分量作为主保护的启动值,将传统的过电流保护与之结合可取得良好的效果。

虽然国际上已有学者研制出微电网保护的硬件装置^[34],但人们仍在对更加完善的保护策略进行积极探索。发电机和负荷容量对保护的影响、不同类型发电机(如基于变流器和不基于变流器)对保护的影响及微电网不同运行方式和不同设计结构对保护的影响等问题都是微电网保护策略研究中所关注的重点。

4.1.3 微电网的接入标准

微电网的接入标准也是人们较为普遍关注的问题。目前,IEEE已重新修改了分布式电源的入网标准。新标准中的IEEE P1547.4对分布式独立电力系统的设计、运行及接入系统导则^[34]进行了详细规定。

除上述提及的几点外,微电源也是微电网技术的研究重点。虽然燃料电池、光伏发电、储能系统等在发挥微电网节能、降耗及环保效益方面具有极大潜力,但目前这些新型电源的成本仍然较高。加快

对这些电源的技术研究、降低其成本也是增强微电网竞争力、推动其发展的有力因素^[10]。

4.2 经济性方面

微电网的经济性是微电网吸引用户并能在电力系统中得以推广的关键所在。在经济运行方面,微电网虽然可以从大电网的调度原则、电能交易、资源配置原则等方面借鉴众多经验,但微电网本身的许多独特之处也使得其经济运行问题带有自身特点。文献^[10]对微电网的经济性做了概括性总结。从目前研究来看,微电网的经济性研究主要体现在2方面:

1) 微电网系统设计的研究

微电网的经济效益是多方面的,但从用户来看,其效益主要集中于能源的高效利用和环保以及个性化电能供给的安全、可靠、优质2方面。

优化资源配置、实现高效能源供给是体现微电网经济性的重要方面,也是微电网研究中的一项重点。目前,由美国 CERTS 提出的分布式电源用户侧模型(DER-CAM—distributed energy resource-customer adoption model)是对微电网资源结构进行经济设计的重要工具^[35-37]。该模型将分布式发电的安装和运行成本等与电力部门的供电费用结构进行比较,可以为用户提供供电效果佳且成本低廉的分布式发电技术组合以及热电联产的技术配置决策。更进一步的研究还将该模型与地理信息系统相结合^[38],应用地理信息系统的数据信息对用户周围的地理因素进行识别和分析,采用就近组合原则形成用户群,为实现微电网良好的经济效益提供了重要的现实基础。

许多学者已将该模型应用到基于微电网的热电联供设计中,并取得了一定成果^[39-42]。但该模型还只是针对简单的微电网结构进行设计,仍需在微电网的发展中不断完善。

多样化的电能供给也是微电网为用户带来的另一效益。文献^[43]提出了较为具体的利用微电网提供多种电能质量,改善系统可靠性、安全性与可用性水平的思想。按用户对电力供给的不同需求,负荷将被分类和细化,最终形成金字塔式的负荷结构。其中,对电能质量要求不高的多数负荷位于金字塔的底端,而对电能质量要求极高的少数负荷位于金字塔顶层。负荷电能质量的分级的确体现了微电网个性化供电的特点,但如何设计合适的微电网以实现这个复杂的分级结构仍是实际应用中的难点。

2) 经济效益的评估和量化

微电网的经济效益评估和量化是微电网吸引力的最直接表达。虽然目前已有相关文献对微电网的

热电联产效益^[44-45]及可靠量化指标^[46]等进行评估,但至今尚无有效方法将微电网对用户、电力部门及社会的效益全面量化。随着微电网研究的深入与成熟,微电网经济效益的不确定性必将成为阻碍其发展的重要因素。这方面的研究亟待深入与加强。

4.3 管理和市场方面

除了技术和经济上的问题外,微电网发展还有许多管理和政策上的障碍。灵活协调微电网内部的能量交换与管理,建立高效、公正、安全的市场机制,重新定位供电方、电网及用户三者的角色与责任,加紧制定相应的管理政策和法规等是当前及今后一段时期的努力方向。

5 微电网在中国的发展前景

目前,中国尚未提出明确的微电网概念,但微电网的特点适应中国电力发展的需求与方向,在中国有着广阔的发展前景,具体体现在:

1) 微电网是中国发展可再生能源的有效形式。“十一五”规划已将积极推动和鼓励可再生能源的发展作为中国的重点发展战略之一。一方面,充分利用可再生能源发电对于中国调整能源结构、保护环境、开发西部、解决农村用能及边远地区用电、进行生态建设等均具有重要意义;另一方面,中国可再生能源的发展潜力十分巨大。据专家估计,中国新能源和可再生能源的可获得量是每年 7.3×10^9 t 标准煤,而现在的每年开发量不足 4×10^7 t 标准煤。中国制定的2020年可再生能源发展目标也已将可再生能源发电的装机容量定位为100 GW^[47]。然而,可再生能源容量小、功率不稳定、独立向负荷提供可靠供电的能力不强以及对电网造成波动、影响系统安全稳定的缺点将是其发展中的极大障碍。如前所述,若能将负荷点附近的分布式能源发电技术、储能及电力电子控制技术很好地结合起来构成微电网,则可再生能源将充分发挥其重要潜力。例如,对于中国未通电的偏远地区,充分利用当地风能、太阳能等新能源,设计合理的微电网结构,实现微电网供电,将是发挥中国资源优势、加快电力建设的重要举措。日本已对中国多个偏远地区和较发达市区利用新能源发展的潜力与效益进行了分析^[48],并已在中国新疆维吾尔自治区建设了微电网工程^[18]。中国也应尽快加紧在这方面的研究与开发。

2) 微电网在提高中国电网的供电可靠性、改善电能质量方面具有重要作用。中国的经济已进入数字化时代,优质、可靠的电力供应是经济高速发展的重要保障。在大电网的脆弱性日益凸显的情况下,将地理位置接近的重要负荷组成微电网,设计合适的电路结构和控制,为这些负荷提供优质、可靠的电

力,不仅可省去提高整体可靠性与电能质量所带来的不必要成本,还可减少这些重要负荷的停电经济损失,吸引更多的高新技术在中国发展。

3)微电网对于在中国发展热电联供有极大的指导意义。目前,中国已建立了许多热电联供项目,而微电网研究中的资源配置与经济优化思想非常值得借鉴。如何就近选择合适容量的热力用户与电力用户组成微电网,并进行最佳的发电技术组合,对于中国提高能源利用效率、优化能源结构、减少环境污染等具有重要意义。

4)微电网与大电网间灵活的并列运行方式可使微电网起到削峰填谷的作用,从而使整个电网的发电设备得以充分利用,实现经济运行。

此外,对于中国已有的众多独立系统,在系统中加入基于电力电子技术的新能源并配以智能、灵活的控制方式,一方面可提高系统的智能化与自动化水平,另一方面也可为企业带来可观的经济效益。

通过上述分析可以清楚地看到,作为大电网的有效补充与分布式能源的有效利用形式,微电网已引起各国科学家的广泛关注。虽然将其实用化还有许多问题尚待解决,但毫无疑问,微电网的发展潜力十分巨大。

参 考 文 献

- [1] SCHUMACHER E F. Small is beautiful: a study of economics as if people mattered. London, UK: Blond & Briggs, 1973.
- [2] LOVINS A. Energy strategy: the road not taken? [EB/OL]. [2006-12-05]. http://www.rmi.org/images/PDFs/Energy/E77-01_TheRoadNotTaken.pdf.
- [3] LOVINS A. Small is profitable: the hidden economic benefits of making electrical resources the right size. Snowmass, CO, USA: Rocky Mountain Institute, 2002.
- [4] IANNUCCI J J. DER benefits analysis studies: final report [EB/OL]. [2006-11-30]. <http://www.mptc.org>.
- [5] ENGLE D. CERTS proves two grids are better than one [EB/OL]. [2007-03-01]. http://certs.lbl.gov/press/distributedenergy/de_0503_certs.html.
- [6] MARNAY C, RUBIO F J, SIDDIQUI A S. Shape of the microgrid [EB/OL]. [2007-01-01]. <http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=3379&context=lbln>.
- [7] LASSETER B. Microgrids//Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting: Vol 1, Jan 28-Feb 1, 2001, Columbus, OH, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 146-149.
- [8] LASSETER R H. Microgrids//Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting: Vol 1, Jan 27-31, 2002, New York, NY, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 305-308.
- [9] MARNAY C, BAILEY O C. The CERTS microgrid and the future of the microgrid [EB/OL]. [2006-11-01]. <http://certs.lbl.gov/pdf/55281.pdf>.
- [10] LASSETER R, AKHIL A, MARMAY C, et al. Integration of distributed energy resources: the CERTS microgrid concept [EB/OL]. [2007-04-01]. <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>.
- [11] STVENS J. Development of sources and a testbed for CERTS microgrid testing// Proceedings of 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Jun 6-10, 2004, Denver, CO, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 2032-2033.
- [12] NICHOLS D K, STVENS J, LASSETER R H, et al. Validation of the CERTS microgrid concept the CEC/CERTS microgrid testbed [EB/OL]. [2007-05-01]. <http://certs.lbl.gov/pdf/microgrid-testbed.pdf>.
- [13] KLINGER A. Northern power systems' microgrid power network to address risk of power outages [EB/OL]. [2007-05-01]. <http://www.northernpower.com>.
- [14] LYNCH J. Northern power system update on Mad River microgrid and related activities [EB/OL]. [2006-11-17]. http://der.lbl.gov/new_site/2005microgrids_files/presentation_pdfs/CERTS-Lynch.pdf.
- [15] Office of Electricity Delivery & Energy Reliability, United States Department of Energy. Gridwise overview [EB/OL]. [2007-03-01]. http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/oe_fs_grid_web.pdf.
- [16] Office of Electric Transmission and Distribution, United States Department of Energy. "Grid 2030": a national vision for electricity's second 100 years [EB/OL]. [2007-02-01]. http://www.climatevision.gov/sectors/electricpower/pdfs/electric_vision.pdf.
- [17] AGRAWAL P. Overview of DOE microgrid activities [EB/OL]. [2007-02-23]. http://www.energy.ca.gov/pier/conferences+seminars/2006-06-23_microgrids_montreal/presentations/Presentation_7_Part1_Poonum-agrawal.pdf.
- [18] TADAHIRO Goda. Microgrid research at Mitsubishi [EB/OL]. [2006-10-17]. http://www.energy.ca.gov/pier/esi/documents/2005-06-17_symposium/GODA_2005-06-17.PDF.
- [19] KIICHIRO Tsuji. FRIENDS in the context of micro grid research [EB/OL]. [2006-10-17]. http://der.lbl.gov/new_site/2005microgrids_files/presentation_pdfs/CERTS-Tsuji.pdf.
- [20] SATOSHI Morozumi. Overview of microgrid research and development activities in Japan [EB/OL]. [2006-10-23]. http://www.ceem.unsw.edu.au/content/userDocs/OverviewofMicrogridManagementandControl_000.pdf.
- [21] European Commission. European smartgrids technology platform [EB/OL]. [2007-05-01]. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.
- [22] European Commission. Strategic research agenda for Europe's electricity networks of the future [EB/OL]. [2007-05-01]. http://www.smartgrids.eu/documents/sra/sra_finalversion.pdf.
- [23] SANCHEZ M. Overview of microgrid research and development activities in the EU [EB/OL]. [2006-10-23]. http://www.energy.ca.gov/pier/conferences+seminars/2006-06-23_microgrids_montreal/presentations/Presentation_

- 11_Manuel-Sanchez. pdf.
- [24] IRAVANI R. Impact of power management strategies on micro-grid dynamic performance [EB/OL]. [2007-04-17]. http://der.lbl.gov/new_site/2005microgrids_files/presentation_pdfs/CERTS-Iravani.pdf.
- [25] DIGNARD-BAILEY L, KATIRAEI F. Overview of microgrid research and development activities in Canada[EB/OL]. [2006-10-23]. http://www.energy.ca.gov/pier/conferences+seminars/2006-06-23_microgrids_montreal/presentations/Presentation_1_Lisa_Dignard.pdf.
- [26] IRAVANI R. Control and protection requirements for microgrids[EB/OL]. [2006-10-23]. http://www.energy.ca.gov/pier/conferences+seminars/2006-06-23_microgrids_montreal/presentations/Presentation_2_Iravani.pdf.
- [27] SPOONER T. Microgrids and hybrids in remote environments [EB/OL]. [2007-04-17]. http://der.lbl.gov/new_site/2005microgrids_files/presentation_pdfs/CERTS-Spooner.pdf.
- [28] PIAGI P, LASSETER R H. Autonomous control of microgrids// Proceedings of 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Jun 18-22, 2006, Montreal, Quebec, Canada. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006; 8-15.
- [29] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.
- [30] DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. A MAS architecture for microgrids control//Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, Nov 6-10, 2005, Washington, DC, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005; 402-406.
- [31] 刘伟达, 孟建良, 庞春江, 等. 多 Agent 在电力系统中的应用. 电气时代, 2004(8): 72-74.
LIU Weida, MENG Jianliang, PANG Chunjiang, et al. Application of multi-agents in power systems. Electric Age, 2004(8): 72-74.
- [32] Montreal 2006 Symposium on Microgrids. Pre-symposium summary results [EB/OL]. [2006-10-23]. http://www.energy.ca.gov/pier/conferences+seminars/2006-06-23_microgrids_montreal/04_Microgrid_Symposium_Questionnaire_Results.pdf.
- [33] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Microgrid Fault protection based on symmetrical and differential current components[EB/OL]. [2006-12-01]. <http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/publicatio/2007public/microgridprotection-1.pdf>.
- [34] KROPOSKI B. Microgrids-hardware testing and standards development[EB/OL]. [2007-04-06]. http://der.lbl.gov/new_site/2007microgrids_files/US-Kroposki.pdf.
- [35] RUBIO F A, SIDDIQUI C, MARNAY C, et al. CERTS customer adoption model [EB/OL]. [2007-03-01]. <http://certs.lbl.gov/pdf/47772.pdf>.
- [36] SIDDIQUI A, MARNAY C, HAMACHI K, et al. Customer adoption of small-scale on-site power generation [EB/OL]. [2007-05-01]. http://der.lbl.gov/new_site/pubs/IBNL_47896.pdf.
- [37] MARNAY C, CHARD J S, HAMACHI K S, et al. Modeling of customer adoption of distributed energy resources[EB/OL]. [2006-10-01]. http://der.lbl.gov/new_site/pubs/LBNL-49582.pdf.
- [38] EDWARDS J, MARNAY C, BARTHOLOMEW E, et al. Assessment of μ Grid distributed energy resource potential using DER-CAM and GIS [EB/OL]. [2007-01-01]. <http://rael.berkeley.edu/files/2002/EdwardsEtal-Microgrid-LBNL-2002.pdf>.
- [39] STADLER M, FIRESTONE R, CURTIL D, et al. On-site generation simulation with energypus for commercial buildings [EB/OL]. [2006-12-01]. <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/883118-4C7tSU/883118.PDF>.
- [40] MARNAY C, VENKATARAMANAN G, STADLER M, et al. Optimal technology selection and operation of microgrids in commercial buildings[EB/OL]. [2007-01-15]. http://der.lbl.gov/new_site/pubs/LBNL_62315.pdf.
- [41] ZHOU N, MARNAY C, FIRESTONE R, et al. An optimization and assessment on DG adoption in Japanese prototype buildings[EB/OL]. [2006-11-01]. <http://eetd.lbl.gov/EA/EMP/reports/61116.pdf>.
- [42] FIRESTONE R, MARNAY C, WANG J. Integrated modeling of building energy requirements incorporating solar assisted cooling[EB/OL]. [2006-12-01]. http://der.lbl.gov/new_site/pubs/LBNL-58783_10Jan2006.pdf.
- [43] MARNAY C. Microgrids and heterogeneous security, quality, reliability, and availability [EB/OL]. [2007-01-31]. http://der.lbl.gov/new_site/pubs/LBNL_62460.pdf.
- [44] ZHOU N, MASARU Nishida, GAO W J, et al. Assessment of distributed energy adoption in commercial buildings[EB/OL]. [2006-12-01]. http://der.lbl.gov/new_site/pubs/LBNL_60494.pdf.
- [45] ZHOU N, MARNAY C, FIRESTONE R, et al. Assessment of distributed generation potential in Japanese buildings [EB/OL]. [2007-05-01]. <http://eetd.lbl.gov/ea/EMS/reports/57978.pdf>.
- [46] HATZIARGYRIOU N. DER and microgrids: research topics within EU framework programs [EB/OL]. [2006-12-17]. http://der.lbl.gov/new_site/2005microgrids_files/presentation_pdfs/CERTS-Hatziargyriou.pdf.
- [47] 周风起. 中国可再生能源发展战略. 石油化工技术经济, 2005, 21(4): 1-6.
ZHOU Fengqi. Strategy of renewables in China. Techno-economics in Petrochemicals, 2005, 21(4): 1-6.
- [48] Research on the formation of sustainable society by renewable energy: scenario development of solar and wind energy in urban and rural area in China [EB/OL]. [2007-02-01]. <http://www.esri.go.jp/jp/prj-rc/kankyoku/kankyoku16/06-1-R-2.pdf>.
-
- 鲁宗相(1974—),男,博士,副教授,研究方向为电力系统可靠性、新能源及分布式发电。E-mail: luzongxiang98@tsinghua.edu.cn
- 王彩霞(1985—),女,硕士研究生,研究方向为微电网运行与分析。
- 闵勇(1963—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统安全稳定分析与实时监控技术。

Overview on Microgrid Research

LU Zongxiang¹, WANG Caixia¹, MIN Yong¹, ZHOU Shuangxi¹, Lü Jinxiang², WANG Yunbo²

(1. State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Liaoning Gaoke Energy Group, Shenyang 110141, China)

Abstract: As an effective way to solve various problems in modern power systems, microgrid is increasingly adopted in many developed countries. Via detailing the concept and schemes of microgrid worldwide, the paper aims to clarify the differences and similarities between microgrid and distributed generation (DG), and give some advices on its application in China. Firstly, the transition from DG to microgrid is presented and a typical topological structure of microgrid is employed to demonstrate its unique characteristics. Secondly, researches and developments on microgrid in various countries are summarized. The key topics and ongoing research and development programs are also listed and analyzed. Finally, based on the energy strategies and status of power systems in China, the developing potentials and the possible applications of microgrid in China are discussed.

Key words: distributed generation; microgrid; strategy; key topic