

分布式能源系统微型电网技术

方文弟

(四川省电力公司, 四川 成都 610072)

摘要:介绍了分布式能源系统微型电网技术的原理及结构、在发达国家的发展情况以及典型工程事例, 针对中国的电力发展形势, 提出了相应的建议。

关键词:能源系统; 微型电网技术; 发电; 电网

Abstract: Introducing the theory and structure and developed country evolution & typical project case of micro-grid technology of distributed energy system; in allusion to the development of china electric power this paper presents the correlative suggestion.

Key word: energy system; micro-grid technology; generation; electric power network

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2008)04-0001-09

分布式能源系统微型电网技术, 是当代电力系统新技术之一, 是电力系统应用的最新科技成果之一, 它是将现代能源转换技术、电网技术、电力电子技术和自动控制技术相结合, 发展起来的。

能源的使用形式、使用强度、质量和可靠性的要求、使用地可能提供的能源资源、能源种类和形式以及环保的要求、可能的、环保的和有效率的能源转换及使用科技都促使分布式能源和系统及与之相应的分布式电源和负荷构成的微型电网得以迅速发展。在现代供能系统中, 模块化的整体能源系统 Integral Energy System (IES) 技术是最新的、大幅度提高能源使用效率、环境友好使用能源的先进科技, 它在建筑物综合用能、军事及岛屿和农场特殊用能、可再生分布式能源开发以及新能源和低碳能源开发使用中起着关键作用; IES 的电气设备及其互连网络——微型电网, 虽然不是 IES 最昂贵的部分, 但是它是 IES 成功的至关重要的部分, 是技术要求高、设计最复杂、变化最多的部分。

1 整体能源系统中的微型电网

整体能源系统 IES 有多种用途, 电气设备供电、电力驱动、制冷、供热、供热水及照明以及商业和公共建筑物室内空气送风和除湿等。在 IES 系统中, 若使用内燃机 (IC)、燃气轮机或燃料电池来发电, 可以使用吸收式制冷机、干燥剂除湿器或热回收装置来产生

蒸汽或热水, 回收余热用于制冷、供热、建筑物内的湿度控制, 这样将显著提高能源的利用效率, 最高可达 85%。与传统供能系统相比, 可以节省 40% 或更多的能量。有的文选将这些系统定义为建筑物冷热电联供系统, 有三种缩写: CHP (Cooling Heating and Power for Buildings)、CCHP (Combined Cooling Heating and Power) 及 BCHP (Buildings Cooling Heating and Power)。为提高整体能源系统 IES 的供能可靠性, 所有的子系统都并列运行。

可再生能源——水能、风能、太阳能、地热和生物质能等的使用, 形成的 DG 分布式发电电源, 大大丰富了 IES 的供能能源, 促进了 IES 技术的更新和发展。

2 分布式能源系统微型电网的发展

2.1 美国

2003 年 8 月北美大停电事故之后, 美国认识到电力系统可靠性的重要, 认为应该不惜任何代价来构建可靠的电力系统, 提出了一些改善电力系统的方案。1) 对应不同的需求, 提供多种质量和可靠性的电能类型; 2) 对不可避免的脆弱电网, 增加技术支持系统; 3) 给敏感负载提供本地电源。

技术进步所带来的经济发展使得对电力的需求越来越大, 并且已经逼近所能提供的电能质量极限。对电网的依赖程度越来越大的同时, 也开始出现了使用各种各样技术的小规模分布式能源及发电系统, 并

逐渐和远距离的大型集中电站展开竞争,这些系统大多数都是直接产生电能的电源,比如太阳能发电、小型风力发电等,还有现场能源变换等。燃料电池、生物燃气发动机等发电的废热利用显示了这些小规模发电的重要优势,这些发电装置在发电的同时还产生大量的热能,这些热能可以直接提供给终端用户使用,如果需要制冷,当然还需要吸收循环,这样做是非常值得的,因为它可以降低发电的成本、替代昂贵的高峰电力,同时降低本地的峰值电力需求。采用负载附近的小规模本地化发电系统来补充现有的电力系统是一种非常好的选择,组成热电联供的微网系统在提高供电系统的可靠性、提高能源效率、高效利用清洁能源方面具有明显的优势。

在美国可再生能源中,风电一直是增长最快的领域之一。2005年,美国风电新增装机容量 240 万 kW,总装机容量 915 万 kW,排在德国和西班牙之后位于世界第三位。美国政府对风电积极支持和大量投入研发资金,风电技术日趋成熟,机组可靠性不断提高,发电成本显著降低,风电造价已降至 1 000 美元 /kW 以下,与煤电成本接近;风电上网电价降到 45 美分 /kW h。预计 2015 年美国风电装机容量将超过德国和西班牙,重居世界第一位。

太阳能技术是发展潜力最大的可再生能源技术。美国太阳能光伏发电已经形成了从多晶硅材料提纯、光伏电池生产到发电系统制造一套完备的生产体系。2005年,美国光伏发电总容量达到 100 万千瓦,排在日本和德国之后,居世界第三位。为降低太阳能光伏发电系统的生产成本,美国政府制定阳光计划,大幅增加光伏发电的财政投入,加快多晶硅和薄膜半导体材料的研发,提高太阳能光伏电池的光电转化效率。预计到 2015 年,美国光伏发电成本将从现在的 21~40 美分 /kW h 降到 6 美分 /kW h。

美国电力可靠性技术协会 (CERTS) 在微网技术的研究方面占领先地位。CERTS 的微网研究机构包括麦迪逊的威斯康星大学 Sandia 国家实验室、乔治亚理工学院和伯克利实验室。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示范运行阶段。CERTS 的微网系统的概念是一个半独立的微型电网,正常与公用电网并网运行,当由于成本或其它因素需要独立运行时就和公用电网解列或向公用电网反送电。CERTS 的微网系统是由一组发电装置和用电设施组成的半自治系统。发电装置可以

包括微型燃气轮机、燃料电池、太阳能发电、小型风力发电以及电力储藏装置,这些发电装置通过电力电子装置相互连接来完成微型电网系统所需要的功能,内燃机发电有时也被作为一种发电装置在微型电网系统中使用。可以控制微型电网的负载,提高运行效率,例如在用电高峰期切除一些可以退出的负载 Shedable loads (如蓄电池充电、水泵等)。微型电网可以独立于公用电网运行,称为“孤岛”。微网系统通常与公用电网并联,从公用电网获得经济的电力和其它一些辅助的服务。

CERTS 微型电网不是通过主动的高速通讯控制,而是通过被动的电气插拔来平衡电能的供需矛盾,即响应时间在几分钟之内。这种接口使得对装置的连接和分离不会影响到周围其它系统设备。系统在容许的空气质量标准、噪声以及并网的规范等许多限制和约束条件下,通过缓慢的通讯来达到经济、环保的运行。

CERTS 微网系统的主要特点是围绕整个系统的能源需求:热(冷)能和电能以及给用户不同种类的电能质量和可靠性来进行设计。首先,通过热电联产装置有效利用废热是其主要的设计思想和运行方法。虽然小规模发电产生的热能无法和大型集中供热竞争,但对废热的有效利用,尤其是利用制冷时吸收的热量,可以有效提高分布式能源的经济性。由于送热比输电更具有局限性,因此热能负载的位置对系统的配置更加具有主导作用。CERTS 微网的第二个主要目标是针对终端用户的不同需求来提供不同的电能质量和可靠性。微网保证对关键负载 (Sensitive loads) 提供可靠的、高品质的电能,而向其它的负载只提供和其重要性相对应的电力质量和可靠性,这种多种电能质量和可靠性的思想在提高关键设备整体可靠性的同时,也降低了成本。

CERTS 微网的关键特点是相对其周围的配电网来讲,可以看成是单独受控的系统,类似于一个现有的用户或者一个小的发电装置,这些特性需要通过采用先进、灵活的电力电子装置来控制发电装置和其周围的交流系统接口来实现。CERTS 微网的结构使得其对公用电网的影响和它的常规电力用户没有什么区别。

除了 CERTS 的微网项目,美国 GE 公司也对微网系统展开了研究,上层控制 (Supervisory control) 包括电气和热能的性能和成本优化控制,与公用电网的

并网控制及对可再生能源间歇性发电的管理。现地控制 Local control 包括对本地信息的响应、对系统干扰和管理层的指令响应以及提供系统稳定性控制和负载的调度控制。

2.2 欧洲

2.2.1 微型电网的迅速发展

欧盟是世界最主要的经济共同体之一, 2006 年欧盟国民生产总值为 10.8 万亿欧元, 居世界首位。在保持经济持续稳定增长的同时, 实现了能源消耗的缓慢增长, 至 2006 年 GDP 年均增长速度 2%, 能源消费增长 0.83%, 与欧盟能源结构的有效改善与其大力发展可再生能源密切相关, 到 2006 年欧盟可再生能源开发利用总量占其能源消费总量的比例已达到 6.3%。

欧盟国家经济社会发达, 能源利用技术先进, 能源消费水平比较高。为减少对外依赖, 保证能源供应安全, 占领全球能源技术的前沿, 履行京都议定书规定的到 2012 年与 1990 年相比减少温室气体排放 8% 的义务, 欧盟对可再生能源的发展高度重视, 对 2010 年各种可再生能源提出了明确目标, 如风电要达到 4 000 万 kW, 太阳能发电要达到 300 万 kW, 生物质能的利用量要达到 2 亿 t 标煤。

由于可再生能源科技的研发取得突破性进展, 和提供相应设备的产业发达, 质量稳定可靠, 欧盟各国可再生能源使用广泛, 发展迅速。

在可再生能源中风电占据了主导地位, 2005 年装机容量达到了 4 000 万 kW, 提前 5 年实现了 2010 年风电装机发展目标。2006 年风电新增装机容量在全部新增发电装机容量的比例达到了 30% 以上, 仅次于天然气发电, 累计风电装机容量已达到 4 855 万 kW, 占世界风电装机总容量的 65%。成为世界风电发展的领头雁。

2006 年风电装机容量和发电量占欧盟 25 国总装机容量和发电量的比例达到 5.4% 和 3%, 其中丹麦风电装机容量和发电量占该国总发电装机容量和发电量的比例分别为 25% 和 20%、德国为 17% 和 7%, 西班牙为 15% 和 6%。2006 年, 在欧盟新增发电装机容量中, 风电的增长量超过核电、水电和煤电等, 仅次于天然气发电, 占全部新增发电装机容量的 30%。

2.2.2 德国可再生能源的发展

德国可再生能源发电量占总发电量的比例, 已从

1998 年的 4.7% 提升到 2003 年的 8%。政府计划到 2020 年使这一比例达到 20%, 在本世纪中叶至少达到 50%。这其中开发量最大的是风能, 占总发电量的 4%, 占全世界风能发电量的三分之一。政府还正在推动近海专属经济区的风力发电, 并准备通过这一行动将风能发电量在 25 年后提高到全国总发电量的 25%。其他领域的可再生能源发展也十分迅速。目前, 生物质能供热总量已达到全国供热量的 4%。10 万个房顶太阳能发电计划 "已于去年完成, 太阳能取热器总面积已达到 560 万平方米, 比 1998 年增加了一倍; 各水力发电厂不断采取新技术提高发电效率; 德国还在 2003 年开始地热发电。随着《可再生能源法》的颁布, 德国的可再生能源得到了快速发展。2003 年, 该产业总产值达 100 亿欧元, 其中风能占 47.9%, 然后依次是生物质能 28.6%、太阳能 14.1%、水力发电 8.1%、地热 1.2%。可再生能源的快速发展, 对于经济、产业、社会等都产生了积极而深远的影响。目前, 德国不仅是世界上最大的风力机市场并伴有大量出口, 还是欧洲最大的太阳能设备市场; 2003 年, 可再生能源产业的迅速发展为社会创造了 13.5 万个工作岗位。其次, 该法律对环境保护起到了良好作用, 二氧化碳、二氧化硫、一氧化碳等有害气体得到了大幅度减排。德国太阳能工业发展迅速。2003 年德国太阳能发电量已从 2002 年的 38 MW 增加到 83 MW。德国在全世界居领先地位。在全球 10 个最大的太阳能企业中, 德国就占了 4 个。2005 年德国现有的和新增加的太阳能利用设备, 将使德国的太阳能发电量达到 200 MW, 太阳能工业的营业额将从 7.5 亿欧元上升到 10 亿欧元。

德国莱比锡市的世界上功率最大的太阳能发电站 2005 年正式并网发电。整套发电装置由 3.35 万块光电池板组成, 占地面积 21.6 公顷, 发电站功率为 5 MW, 可为 1 800 户住家提供生活用电。发电站投资 2 200 万欧元, 由德国太阳能协会、西部基金和壳牌太阳能公司联合兴建的。目前, 德国太阳能发电设施的总功率为 500 MW。

2.3 日本

除了美国和欧洲, 日本近年来也对微型电网的研究十分重视, 例如在 2005 年的爱知县世博会上, 三菱公司展示了以燃料电池为主的供能系统, 采用自主负载跟随控制来减小对电网的影响, 系统采用了燃料电池、太阳能发电、NaS 蓄电池等先进能源技术, 使用木

材和废弃物来生产燃料电池的气体燃料,燃料电池产生的热能用于建筑物的空调系统。试验证明这种能源系统是一种十分环保的供电、供热系统。

日本京都的生态能源项目,采用生物燃气发动机、溶解碳酸燃料电池、太阳能发电、风力发电、蓄电池等构成微网系统,与公用电网连接,通过系统内部各单元之间的调度控制,来尽量降低并网时对电力系统的影响,使用以生物燃气为燃料的发动机和燃料电池发电向建筑物提供电能,此项目总的装机容量达到 850 kW。2006 年 7 月,日本清水公司建成了以燃气发动机、镍氢电池和电气双层电容器等装置构成的微网系统,采用远程控制对断路器等开关进行操作,在并网连接点进行恒功率控制,系统独立运行时进行电压和频率的稳定化控制。

2.4 特点

美国、欧洲和日本三个地区研究微网的出发点有所不同,美国强调供电系统的可靠性、降低电力系统建设成本和缩短建设周期,降低能源成本;欧洲的注意力主要集中在降低能源成本、减少温室效应气体的排放和解决岛屿等边远地域的供电问题;日本研究微网系统的主要目的是解决环保问题、提供能源供应的多样性和岛屿等边远地域的供电问题。

随着小规模分布式发电技术的发展,应更有效地综合开发利用本地的各种可再生清洁能源,为本地的用户提供更可靠的高品质电能、热能,在解决用户能源需求的同时,对环境进行保护。这些分布式能源发电构成的微网,除了自身的经济性和技术性能的优化之外,还应表现出优良的并网运行特性。

3 微型电网技术

3.1 可再生能源、新能源发电并网技术

3.1.1 微型电网的分布式电源及接入模式

分布式电源 (distributed generation DG) 的发电类型、容量范围、是否再生及与电网的接口如表 1 所示。

分布式发电的特点,一是安全、高效、经济、环保,是供电安全防护和应急处理的理想设施;二是投资少、回收快,这也是它们在市场环境下发展较快的一个主要原因。

国际上随着电力市场的开展,由于受到发电投资回报周期长以及几次大面积停电的影响,新增电源中分布式发电所占的比例,正呈强劲的上升趋势。2000

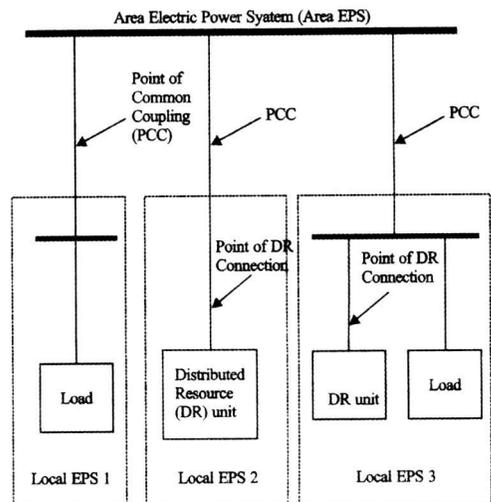
年全球新增电源 110 GW,其中分布式发电占 3%;2004 年新增 114 GW,分布式发电所占份额上升到 7%,预计 2008 年新增 120 GW,分布式发电所占份额将达到 40%。因此,如何应对分布式发电的日益发展,是一个不容回避的问题。

表 1 分散发电一览表

分布式能源发电类型	容量范围	是否再生	与电网的接口
太阳能	几 W ~ 几百 kW	再生	D/A 变换
风能	几百 W ~ 几 MW	再生	异步发电机
地热	几百 kW ~ 几 MW	再生	同步发电机
生物质能	几百 kW ~ 几十 MW	再生	同步发电机
燃煤循环热电联产	几十 MW ~ 几百 MW	不再生	同步发电机
燃汽轮机	几 MW ~ 几百 MW	不再生	同步发电机
微型燃汽轮机	几十 kW ~ 几 MW	不再生	A/A 变换
燃料电池	几十 kW ~ 几十 MW	不再生	D/A 变换

IEEE1547 含有分布式能源发电机组的区域电网示意图,见图 1。大概有三种模式的局部电力系统 Local EPS₁、2、3 与区域电力系统 Area Electric Power System (Area EPS) 互联。局部电力系统 1 是负荷通过 PCC 直接受电的地方电力系统;局部电力系统 2 是分布式电源通过 PCC 与 Area EPS 并列;局部电力系统 3 是分布式电源和负荷通过 PCC 与 Area EPS 并列。

当区域电力系统 Area EPS 比局部电力系统 Local EPS 强得多时,与 Area EPS 发电不同,这些可以视为虚拟负荷的分布式发电设备直接由用户控制启停,也不参与自动发电控制,只要在配网侧安装逆功率继电器,正常时不向电网注入功率即可。



Note: Dashed lines are EPS boundaries. There can be any number of Local EPSs.

图 1 EPS 互联终端的关系

注:虚线是 EPS 的界线,局部 EPS 可以是任意数量的。

- Area Electric Power System (Area EPS) 区域电力系统 (Area EPS);
- Point Common Coupling (PCC) Area EPS 连接的公共连接点 (并网点);
- Point of DR Connection DR 并网点;
- Local EPS1 局部电力系统 1——负荷通过 PCC 直接受电的地方电力系统;
- Local EPS2 局部电力系统 2——分布式电源通过 PCC 与 Area EPS 并列;
- Local EPS3 局部电力系统 3——分布式电源和负荷通过 PCC 与 Area EPS 并列。



图 2 Area EPS 与 DR 的互联系统 (ICS) 示意图

对于局部电力系统 Local EPS2、3, 只要分布式发电机组的启动和停运、异常和故障, 对区域电力系统 Area EPS 的影响明显, 就必须通过 Area EPS 与 DR 的互联系统 ICS 联网, 如图 2 所示。

3.1.2 微型电网的分布式电源并网技术

图 3 显示了 Interconnection System (ICS)、EPS 和 DR 之间关系及其之间的分界。ICS 互联系统是微网至关重要的部分, 是技术要求高、设计最复杂、变化最多的部分, 它包括分步式电源 DR 的能量转换装置逆变和整流器, 感应同步发电机; 系统控制、电气保护、稳态控制和辅助设备等。ICS 的功能包括: 系统的启动、停止, 输入、输出等控制; 对系统稳态量电压、电流、有无功率和电量自动调整, 确保电能数量和质量; 系统异常或故障时, 对系统和元件实施保护和安

全控制等。

在分布式电源 DG 中内燃机、燃气轮机、热电联产燃煤机组和生物质能发电等, 均采用常规同步发电机实现能量转换。

在众多的可再生能源技术中, 风电一直是增长最快的领域之一; 太阳能技术是发展潜力最大的可再生能源技术。风能的容量在几百 W ~ 几 MW 之间, 通常使用异步发电技术, 将风能转换为电能使用。太阳能的容量在几 W ~ 几百 kW 之间, 通常使用 D/A 变换技术, 将太阳能直接转换为电能使用。

3.2 变速恒频双馈异步风力发电系统

图 4 是变速恒频双馈异步风力发电系统示意图, 变速恒频双馈异步风力发电机 (DFIG—doubly fed induction motor) 将风能直转换为电能, 其定子与电网并列, 转子通过矩阵变换器实现交流励磁。风力发电系统的目标是要求发电机在输出电压频率恒定的同时, 将风能最大可能地转换成电能并输出到电网上。当风速发生变化时, 为捕获最大风能, 发电机转速随之改变, 此时应控制转子励磁电流频率, 保证定子输出电压频率的恒定, 实现变速恒频发电。其关键技术包括: 基于大功率矩阵变换器的变速恒频双馈风力发电系统建模技术、无功功率优化分配技术、交流励磁控制技术以及大功率矩阵变换器的高性能调制技术。

3.3 太阳能光伏发电和热发电技术

太阳能光伏发电和热发电技术是比较成熟、比较常见的利用太阳能发电的技术, 受到普遍重视。太阳能热发电是利用聚光集热器把太阳能聚集起来, 将某种工质加热到较高的温度 (通常为几百摄氏度到上千摄氏度), 然后通过常规的热力发电机发电或通过其他发电技术将其转换成电能。太阳能热发电技术已完成从实验室走出, 实现商业化的过程。西班牙、美国、德国、以色列、意大利、澳大利亚、日本、韩国等投入了大量资金和人力, 取得了大量科研成果, 先后建立了 20 余座塔式太阳能热发电示范电站。除聚光集热器外, 太阳能热发电机部分是常规发电技术, 这里不予赘述。

当今太阳能光伏发电正呈现加速发展势头, 成为发展最迅速的高新技术产业之一。太阳能光伏发电硅光电池的输出受外界环境温度、光照条件等众多因素影响, 其输出功率随温度升高而降低, 随光照强度的增加而增大。此外, 硅光电池的等效串联电阻和并联电阻对电池的输出也有极大的影响。必须与储能装置和其他分布式电源构成优势互补的微网电源, 如储能锂电池和或者燃料电池 (PEMFC), 或者内燃机, 或者燃气轮机等供能和储能单元组合, 通过电力电子变换装置、系统控制单元, 实现能量的收集、转换、输送、储存和使用, 构成独立运行 (孤网) 和并网运行的分布式混合供能系统, 其电气设备及电气连接形成微型电网。

3.4 微燃机和燃料电池

除了前述分布式电源 DG 外, 微燃机 MT (Micro-turbine) 和燃料电池 FC (fuel cell) 也是常使用的 DG。微燃机的特点是功率小 (25 至 100 kW), 转速高 (5

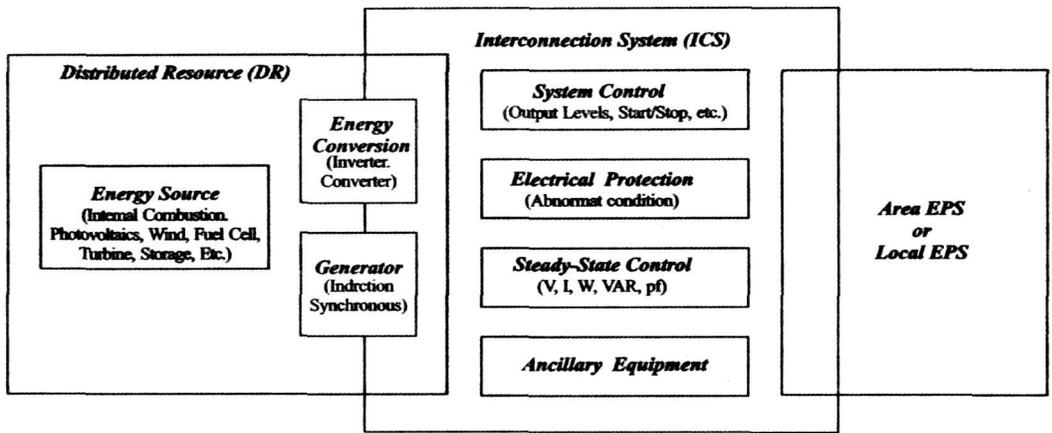


图 3 ICS, EPS, 和 DR 之间的分界线

Interconnection System (ICS) 互联系统 ; Distribution resource (DR) 分布式电源 :

Energy Conversion (Inverter Converter) 能量转换 (逆变和整流) ;

Generation (Induction Synchronous) 发电机 (感应同步) ;

Energy Source (Internal Combustion, Photovoltaic, Wind, Fuel Cell, Turbine, Storage, etc) 能源 (内燃机、光伏、风能、燃料电池、燃气轮机和储能装置) ;

System Control (Output levels, Start/Stop, etc) 系统控制 (输出、启动、停止等) ;

Electrical Protection (Abnormal Condition) 电气保护 (异常条件下) ;

Steady-State Control (V, I, W, VAR, P&Q) 稳态控制 (电压、电流、有功功率和电量) ;

Ancillary Equipment 辅助设备。

至 10 万 r/min), 应用空气轴承, 使用气体和液体燃料天然气、丙烷等。如 Capstone^{30~60 kW}; Honeywell Parallon^{75 kW}; 欧洲 Bowman Turbec。燃料电池有磷酸燃料电池 PAFC (Phosphoric Acid fuel cell)、质子交换膜燃料电池 PEMFC (Proton Exchange Membrane FC)、熔融碳酸盐燃料电池 MCFC (Molten Carbonate FC) 和固体氧化物燃料电池 SOFC (Solid Oxide FC)。

3.5 分布式发电系统 DG 采用的储能技术

储能技术是分布式发电系统 DG 稳定运行的关键技术之一, 储能设备的投资和运行成本, 在总投资和成本中占有较大的份额。分布式发电系统 DG 可采用多种储能方式, 主要为化学储能——蓄电池和电容器储能和物理储能——飞轮、抽水、超导及压缩空气储能。

飞轮储能技术在 20 世纪 70 年代提出, 直至 90 年代, 高强度碳纤维材料、低损耗磁悬浮轴承、电力电子学技术的发展, 才得以快速的发展。飞轮储能具有

效率高、寿命长、储能量高、充电快捷、动态性能优良等优点, 具有良好的应用前景。但成本偏高是其主要缺点。

超导储能技术是利用超导线制成的线圈, 将电网供电产生的磁场能量储存起来, 需要时再将储存的能量释放, 返送电网。在 DG 系统中, 超导储能常用于孤岛型的风力、光伏发电系统。超导储能变流器和控制策略, 降低损耗和提高稳定性, 开发高温超导线材, 失超保护技术等是当前的主要研究方向。

蓄电池储能系统由蓄电池、控制装置和辅助设备等组成, 在小型 DG 中广泛应用。有铅酸、镍镉、镍氢、锂离子蓄电池等, 传统的铅酸电池采用较多。耗资三千万美元的美国阿拉斯加电网安装的提供功率峰值达 26.7 MW 蓄电池储能系统, 提高了电网抵御停电事故的能力, 据称可减小 60% 系统大停电的可能性。中国西藏双湖 25 kW 光伏电站, 采用了 480 kWh 的铅酸电池组。

超级电容器是 20 世纪在 80 年代走向市场的新兴储能器件。使用特殊材料制作电极和电解质, 存储

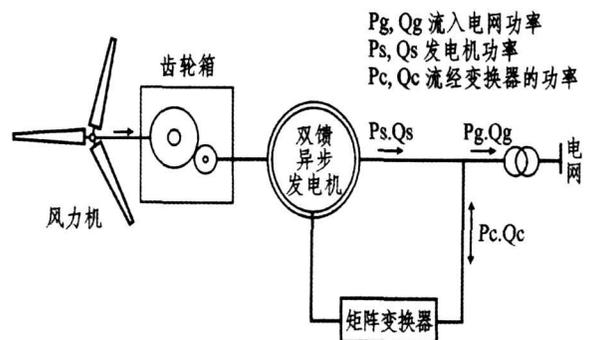


图 4 基本矩阵变换器的变速恒频双馈风力发电系统示意图

容量是普通电容器的 20~1 000 倍,同时保持了动态性能好,释放能量速度快的特点。随着分布式电源的发电容量在电力系统中份额的提高,系统稳定性和电能质量成为重要的研究课题。当微型电网解列、离网运行时, DG 启停及功率变化、负荷的启停及功率变化、系统操作及故障、离网及并网过程等,风力发电、光伏发电、燃料电池和微型燃气轮机等 DG 的动态性能,不能快速抑制系统扰动,保持系统稳定运行。将快速储能器件通过功率变换装置接入系统,利用储能装置的快速储能或释能,可以实现系统内部能量的瞬时平衡,提高动态响应速度和稳定性。

超级电容器与传统的蓄电池相比具有能量密度高,充放电循环寿命长,能量储存寿命长等特点。与飞轮储能和超导储能相比,它在工作过程中没有运动部件,维护工作极少,可靠性非常高。在小型 DG 中,如边远的缺电地区,太阳能和风能是最方便的能源,超级电容器的性能和价格性能比,使其成为较理想储能装置,具有优势,在高山气象台、边防哨所等场合超级电容器已不断得到应用。

飞轮储能,仿真结果证实,系统在离网及并网运行时的可靠性和稳定性大为提高,并可以实现两种运行状态之间的平滑过渡。

图 5 是采用超级电容和电池作为储能元件的混合储能的 DG 系统,主辅能量源——蓄电池和超级电容均通过 DC/DC 变换器汇入直流母线,其优点是对各个能量源均可有效控制,充分发挥不同能量源的优势,其缺点是增加了一个 DC/DC 变换器,使得系统的体积、重量和成本有所增加。在 DG 系统中,这几项

因素虽有影响,考虑到 DG 要求的动态性能,混合储能系统采取了这种结构。

超级电容器储能系统研究、带有超级电容器储能的分布式发电系统控制技术研究、快速储能应用于分布式发电系统的标准规范研究,以及快速储能应用于分布式发电系统的经济性研究,是混合储能研究的重点。

3.6 微型电网是具有潜在功率产品价值的需求侧竞价响应资源

与区域电网并网的微型电网的分布式电源启停,直接减少或增加了区域电网的负荷,可以看成是虚拟负荷的减少和增加。同样,负荷的减少和增加也可等效于虚拟发电的增加和减少。随着电力市场的深入发展,负荷相当于潜在的功率产品的价值正在日益凸现。微网管理者能够通过改变运行方式参与电力市场竞争,响应需求侧竞价 (demand side bidding DSB) 的要求,获得相应的经济利益,成为电力市场的短期负荷响应行为和市场机制形成的主动参与者,可按电力用量希望价格的需求曲线进行竞价,也可与其他发电商签订双边合同,竞价增、减负荷。

微网管理者还可参与各种形式的辅助服务 (频率控制、电压控制、备用和黑启动)、参与可中断供电合同或峰谷电价计划、在平衡市场中竞价增减出力以及缓解输配电阻塞等。

4 微型电网关键技术

微型电网是局地负荷和分布式能源的集合,以在单一系统中同时提供电力和热 (冷) 能的方式运行,应用电力电子技术,形成灵活的单一集合系统,对区域电网而言微型电网是受控系统,满足当地供能负荷的可靠性和安全性,剩余能源以电能方式反馈系统。

微型电网运行方式一般根据热能需求安排,实现热电冷联产,产生的热 (冷) 能就近、就地使用,灵活方便。微电源控制器 (Micro-source Controller) 根据就地信号,调节负荷和电压,毫秒级响应。微网保护在微网与系统并联时,投入运行,故障发生时,将微网与大网隔离 (解列)。采用无功补偿如 SVC,提高微网电压稳定水平,电压剧降时,可避免与大网隔离 (解列)。

微型电网可采用电力园区 (Power Parks) 的方式实现与区域电网的互联,它是区域电网的一个资源,区域电网可根据需要对微网进行调控;区域电网向微

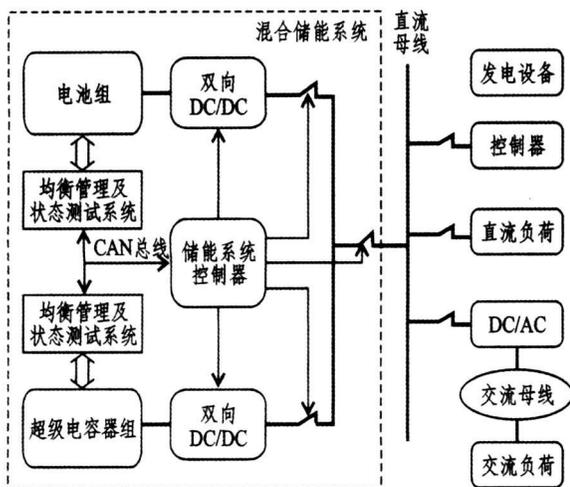


图 5 DG 采用超级电容作储能元件的混合系统

网供电时,微型电网可视为区域电网的负荷,必要时可切除。多个微网接入时,系统动态时必然相互影响。可设置微网能量管理器 Energy Manager 对热能、电力及其安全质量进行调度,满足设定值要求,响应时间分钟级。微型电网内电源和负荷,应满足“即插即用”的原则,仅依靠就地信息,不需要其他电源的信息和通信,独立控制有、无功输出。

微型电网的控制装置应具有基本的有、无功控制功能;电压控制需要电压相对于无功电流的调差控制器,防止电压调整时出现的环流,影响微网安全运行。

孤岛运行,要确保储能装置正常,启动负荷快速跟随功能,避免燃机和燃料电池响应速度(10~200 s)太慢出现的动态功率缺额。使储能装置起到发电机转子的惯性功能。

微型电网的两种运行方式——并网运行和孤岛运行,要求使用反映阻抗、序电流、电压和增量参数变化的保护装置,使之具有符合要求的选择性、灵敏度,防止拒动和误动,不能按配网的惯例使用单一的电流保护装置。

变换器技术是微型电网的关键技术之一。矩阵变换器是 A/A 电力变换装置,优于传统 A/D-D/A 变换器,能量双向流通、输入输出电流为正弦波形、输入功率因数可控,无需直流大电容存储能量,结构紧凑,体积小,重量轻,比较适合变速恒频双馈风力发电系统。风力发电技术要求高功率密度(功率体积比和功率重量比大)、高可靠性和高性能的矩阵变换器,要求输入输出电压、电流波形质量高和损耗低,还

要求输入端具有较高的无功补偿能力,要有新的适合双馈风力发电系统的矩阵变换器的调制策略。关键是深入研究风能转换规律和传递机理,结合双馈异步发电机(DFIG)、矩阵变换器、风电机和电网的机电耦合关系,对 DFIG 的励磁进行均衡控制,对矩阵变换器输入输出性能进行优化调制,设计保护装置,并建立整个风电系统统一的数学模型和适用的简化模型,提高分析研究水平,达到风能有效利用和设备可靠运行,提高使用寿命的目的。

微型电网靠近用电负荷,供电可靠性、电能质量更能满足特殊用户的要求;电热冷复合供能效率由单一供电的 33% 提高到 80%。IEEE1547-2003 和 IEEE1547-2005 美国标准适用微型电网。

5 典型工程

5.1 欧洲某地海上微网与陆上区域电力系统互联

图 6 是欧洲某地海上微型电网、海上风电场、离岸油气平台微型电网与陆上区域电力系统互联的示意图。HVDC Plus 直流输电技术,海底直流输电电缆是实现互连的关键。

5.2 BCHP 和 CCHP 在上海、广州和北京的应用

1996 年黄埔中心医院 1 台 1 000 kW 柴油燃气轮机配套 1 台 3.5 t/h 余热蒸汽锅炉投产,2000 年浦东机场 1 台 3 500 kW 燃气轮机配套 1 台 5 t/h 余热蒸汽锅炉投产。东莞鞋厂 1 020 kW 柴油内燃机配套 0.5 t 余热蒸汽锅炉,广东铝业 225 t/h 重油配套余

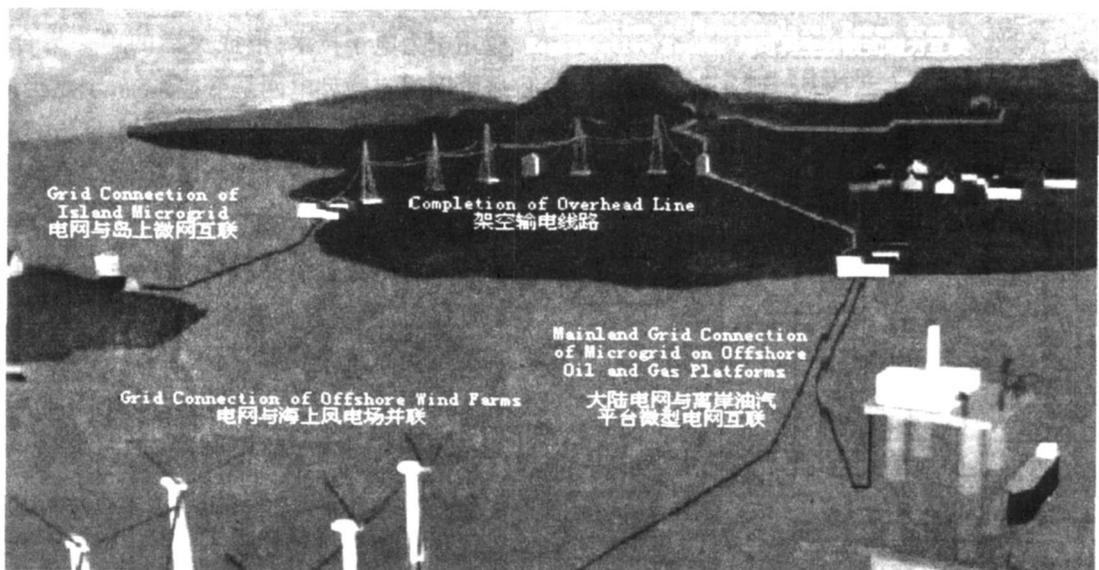


图 6 欧洲某地海上微网与陆上区域电力系统互联示意图

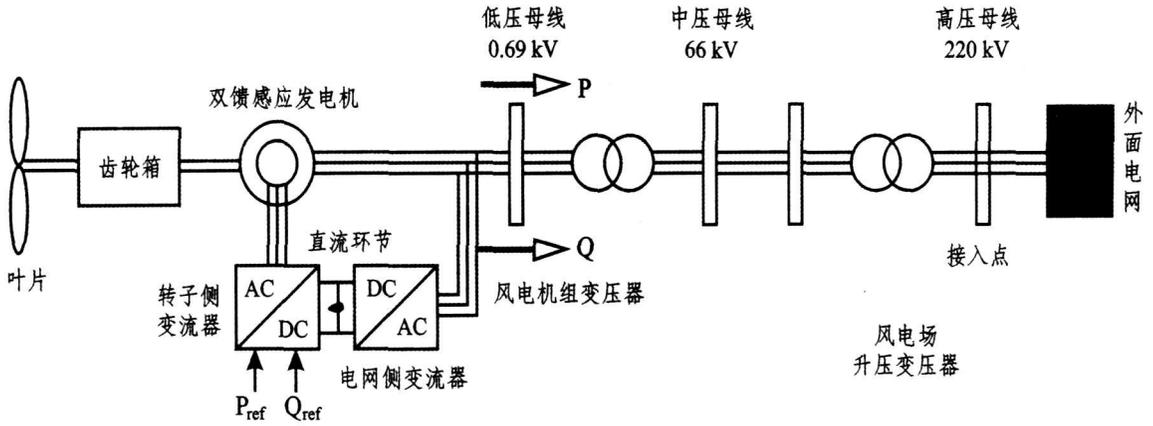


图 7 双馈变速恒频异步感应风力发电机单元接线示意图

热直燃机投产运行多年。2003年后北京燃气集团 1 台 480 kW + 1 台 725 kW 燃气内燃机 1 台 BZHR100 + BZHR200 型余热直燃机;北京次渠门站综合楼 1 台 80 kW 燃气微燃机和 1 台 20 万大卡余热直燃机投产。北京还开发有中关村软件园和国际生命医疗园、中国世贸中心三期、大钟寺现代商城和奥林匹克村能源中心等 BCHP 和 CCHP。

3 台燃气轮机 12.1 MW ($4 \text{ MW} \times 3$), 三台 3.75 MW ($1.25 \text{ MW} \times 3$)热交换器, 21.3 MW ($7.1 \text{ MW} \times 3$)三台冷蓄器, 一台 3 MW 除湿吸收器, 一台 20 MWh 冷藏器, 一台 10 MW 压缩冷却器。

两个方案都建设了相应的、完整的发电、供电系统, 形成高效率的热电联产系统。

5.4 中国某省与区域电力系统并网的大型风电场

中国某省电网末端地区, 风能资源丰富, 建设了多个相当规模的风电场, 主要机型为双馈变速恒频异步感应风力发电机, 图 7 为单元接线示意图。机组采用恒功率因数和恒电压方式控制。图 8 是风电场接入区域电网的地理接线示意图。风电场 A 规划容量为 400 MW 升压为 220 kV 后, 经送电线路接入 3 节点, 风电场 B、C、D 容量 $\leq 50 \text{ MW}$, 经过 3、4、5 节点接入 220 kV 地方电力环网, 火电厂 A 的容量为 600 MW。

在建模和仿真研究时, 将风机机端视为 PQ 或 PV 节点, 采用两质块轴系模型、变频器模型和双馈异步电机模型的变速风电机组动态模型, 其他电力系统元件采用常规模型和参数。风电场作为一台与规划容量相等的等值风机研究与区域电力系统的相互影响, 场内风电机组与风电场的相互影响, 设计和设备选型时确定。研究表明, 适量的风电并网, 有利于地区电网电压水平的提高。风电场当地负荷较小, 大量有功外送时, 无功缺额可能引起电压稳定水平降低。故障过程中, 风电机组持续提供短路电流的能力, 在风电场容量大时, 将使短路容量明显增大。双馈异步风电机组构成的风电场对电网暂态稳定性的影响要优于同一节点相同容量同步机组。

5.5 微型电网是美国 "Grid2030 规划" 向用户供电的底层电网

(下转第 49 页)

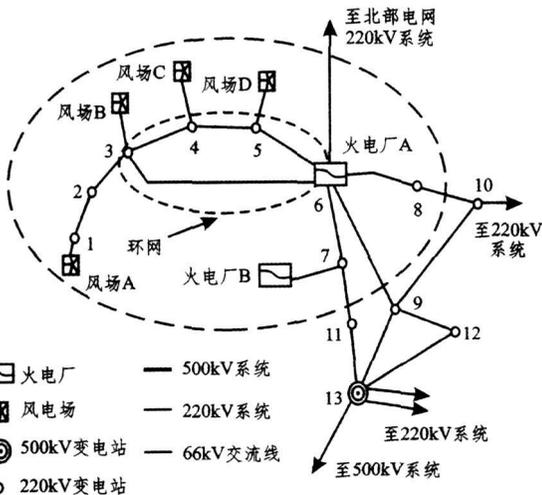


图 8 风电场接入 220 kV 区域电网地理接线示意图

5.3 奥林匹克村能源中心

方案 1 是天然气燃气轮机和余热锅炉热电联产方案 (CCHP with Gas turbine & exhaust heat boiler)。使用 3 台燃气轮机 12.0 MW, 中温余热炉 23 MW ($10 \text{ t} \times 3.6 \times 10^5 \text{ Pa}$) 一台, 3 台低温余热炉 3.75 MW (1.25×3), 冷蓄器 21.3 MW ($7.1 \text{ MW} \times 3$) 3 台, 3 MW 除湿吸收器一台, 冷热储藏器一台 20 MWh / 20 MWh 压缩冷却 10 MW 一台。

方案 2 是 DFA 天然气燃气轮机和余热锅炉热电联产 (CCHP with Gas turbine & exhaust heat DFA)。

一定改善。原因是四川电网已形成 500 kV 环网结构,改变了电力汇集过于集中和潮流重载状况;南部还通过洪沟—陈家桥和北部南充—万县两个通道、三回 500 kV 线路与重庆电网相连,并经三峡—万县双回 500 kV 线路与华中电网联网,建立了“川电外送”通道。

(3)励磁系统的负阻尼作用仍然是互联电网发生低频振荡的主要原因。从二滩等机组励磁系统、PSS新、旧数据的计算对比来看,新数据要优于旧数据,很好的抑制了四川电网低频振荡,应该加强 AVR 及 PSS 试验管理工作,确保 PSS 试验整定参数准确。检修方式下主网线路潮流明显加重,应特别注意乐山、攀枝花、川北地区,必须保证二滩、龚嘴等重要机组 PSS 正常投入运行。临邛接入的水电机组和川西北水电机组 PSS 的配备是不强的,新建石雅崇水电送出通道存在弱阻尼低频振荡隐患。

(4)二普串补在一定程度上较大的补偿了快速励磁调节器对系统产生的负阻尼作用,特别是对与四川强相关的大区域间主导低频振荡模式和四川本地模式的抑制效果最有效。

(5)运用由多机电力系统二阶解析解推得的二阶相关因子,包含了系统参数与模式间二阶非线性信息,对理解和认识“为什么小干扰稳定计算中一阶相关因子较小的机组上加装 PSS 反而对主振模式影响

最大”以及“PSS 逆调现象”有指导意义。

参考文献

- [1] 吴敬儒,徐永禧. 中国互联电网的发展 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1—3.
- [2] 朱方,赵红光. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响 [D]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1—7.
- [3] 朱方,汤涌,张东霞,等. 我国交流互联电网动态稳定性的研究及解决策略 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 1—5.
- [4] 余贻鑫,李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响 [D]. 中国电机工程学报. 2005, 25(11): 6—11.
- [5] 邓集祥,贺建明,姚天亮. 大区联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, * * * * * 已录用 * * * * *.
- [6] 四川“十一五”电网规划及远景展望 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(1): 5—7.
- [7] 邓集祥,赵丽丽. 主导低频振荡模式二阶非线性相关作用的研究 [D]. 中国电机工程学报. 2005, 25(7): 75—80.
- [8] 邓集祥,叶静,郎斌斌,王俊胜. 计及二阶非线性特性的 PSS 配置的研究 [J]. 电力系统自动化. 2008, * * * * * 已录用 * * * * *.
- [9] 邓集祥,涂进,陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36—41.
- [10] 张晓明,庞晓艳,陈苑文,等. 四川电网低频振荡及控制措施 [J]. 中国电力, 2000, 33(6): 36—39.

(收稿日期: 2008—06—15)

(上接第 9 页)

2003 年,美国能源部提出了构建安全可靠电网的“Grid2030 规划”。该计划旨在采用先进的材料技术、超导技术、电力电子技术和控制技术、广域测量技术、实时仿真技术、储能技术、可再生能源发电技术、微型燃气轮机发电技术等构建全美骨干电网、区域性电网、地方电网和微型电网(分布式电力系统)等多层次的电力网络,以保障大电网的安全性、稳定性,供电的可靠性及电能质量。

6 结束语

加快水电、太阳能、风能、生物质发电、沼气的开发利用,提高可再生能源在能源结构中的比重,解决偏远地区无电人口供电问题,改善农村生产、生活条件,推行有机废弃物的资源化利用,推进可再生能源技术的产业化发展,分布式能源系统微型电网技术将

发挥重要作用。微型电网的潜在用户和市场前景有:城市发展过程中的小区新能源、环保改造项目;大学校园的环保象征、试验研究项目;为工业区提供高品质稳定电力;医院、宾馆等高耗能单位的供电、供热;孤岛等边远地区的供电、供热;医院、银行、数据中心等对供电可靠性要求很高的公共设施;新农村建设中的生态能源项目等。

四川是中国西部最重要的大省,也是中国最大的能源资源大省,在高度重视特高压、超高压电力系统的同时,也要在能源规划、电力系统规划、建设、运行时高度注意新兴发展的微型电网技术和相应的系统。

当前特高压大电网的发展和分布能源微型电网的研究开发已形成两个不同的亮点。中国的“西电东送”和“南北互供”的大电网资源优化配置的优势,毋庸置疑。但是具有联动效应的大电网,却存在产生大面积停电的巨大风险。防止级联跳闸,缩小停电范围,主动解列,灵活分区,分布式供能,微型电网及协调控制,已成为当前研发的热点。

(收稿日期: 2008—06—15)