

## 微电网相关问题及技术研究

苏玲<sup>1</sup>, 张建华<sup>1</sup>, 王利<sup>2</sup>, 苗唯时<sup>1</sup>, 吴子平<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 介绍了分布式电源微电网的技术特点。详细分析了分布式电源接入形成的微电网对电压、频率和谐波的影响, 并提出了相应的技术措施。根据微电网可以并网和孤岛运行的特性, 对已有控制方法进行分类并详细介绍其控制策略及优缺点。针对分布式电源对微电网保护的影响, 介绍了适用于微电网保护的新方法。最后对微电网其他研究方向进行了探讨。

**关键词:** 微电网; 分布式电源; 电能质量; 控制; 保护

### Study on some key problems and technique related to microgrid

SU Ling<sup>1</sup>, ZHANG Jian-hua<sup>1</sup>, WANG Li<sup>2</sup>, MIAO Wei-shi<sup>1</sup>, WU Zi-ping<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Characteristics of distributed generation microgrid technology are introduced. The influence of distributed generation microgrid on the voltage, frequency and harmonics is analyzed in detail and the corresponding solutions are provided. Control methods are classified according to the grid-connected and island operation modes of microgrid and the control strategies as well as the advantages and disadvantages of each method are presented. Since distributed generations exert influence on microgrid, novel protection strategies suitable for microgrid are introduced. In the end the trend is put forward for future research in microgrid.

**Key words:** microgrid; distributed generation; power quality; control; protection

中图分类号: TM61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0235-05

## 0 引言

大电网过去几十年的快速发展, 成为主要的电力供应渠道。但随着社会对电力依赖的增强, 电网规模的不断扩大, 超大规模电力系统的弊端也日益显现: 成本高, 运行难度大, 难以适应用户越来越高的安全、可靠性以及多样化的供电需求。暨世界范围内接连发生的几次大面积停电事故后, 传统大规模电网暴露出了其脆弱性<sup>[1]</sup>。

2008年我国南方雪灾给南方电网造成巨大影响, 使人们认识到: 除了单一扩大电网规模, 建设超高压输电网外, 利用新能源以及可再生能源在负荷处就近供电, 降低负荷对大电网的依赖对提高供电安全性和可靠性可起到至关重要的作用。

近年来以风力发电、光伏电池和微型燃气轮机为代表的分布式发电 (Distributed Generation,

DG) 技术的发展已成为人们关注的热点<sup>[2]</sup>。在此基础上建立微电网能够充分发挥 DG 的作用, 同时也是提高供电可靠性、改善电能质量, 保证电网安全运行的一种十分有效的途径。

## 1 微电网技术特点

各国关于微电网的定义各不相同<sup>[3-6]</sup>, 总结各国研究机构经验和已投入运行微电网的实际问题。结合目前我国电网的实际状况, 我国开展微电网研究应用需考虑的特点如下:

1) 微电网中的一些 DG, 如风力发电和太阳能发电, 受外界气候条件影响很大, 应与储能装置相配合, 满足用户对电能质量和供电安全要求。

2) 微电网是通过本地 DG 或中、小型传统发电方式的优化配置, 向附近负荷提供热能或电能的特殊电网, 该特点减小了输配电线路的投资, 降低了网损。而且相比传统大型电厂, 投资成本低、风险小、占地少、建设周期短, 有利于较短时间内解决电力短缺问题<sup>[7]</sup>。

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 (863 计划)  
(2008AA05Z216&2007AA05Z249)

3) 微电网通过一个公共联接点与主网相连, 对外表现为一个整体可调度单元。此种联接方式仅需公共连接点处满足 IEEE-P1547 标准, 而无需微电网内所有 DG 均满足此标准<sup>[8]</sup>。

4) 可以在微电网与大电网之间的电力电子接口处控制—静态开关实现平滑与主网断开或并入主网运行; 实现灵活可控地接受或输送电能。

5) 微电网包括若干条馈线, 按负荷重要程度及负荷对电能质量的不同要求, 分别接入不同馈线, 从而实现对负荷分级分层控制, 整个网络呈放射状。

## 2 微电网相关问题及技术措施

在已建中央电站及电网的基础上, 接入 DG 形成微电网后, 随着 DG 数量和渗透率的逐渐增加可能改变潮流的方向, 从而给整个电网带来了深刻的影响。必须针对 DG 接入形成的微电网在电能质量、控制、保护等方面的一系列问题进行深入的研究。

### 2.1 电能质量相关问题

#### 2.1.1 电压

传统配电系统的电压调节几乎全部基于变电站到各种负载的辐射性潮流。DG 的接入带来了“网格”化的功率潮流, 可能会影响常规电压调节, 使系统电压出现以下问题:

1) 高电压——馈线上有分布负荷而无分布式电源时, 馈线分布电压通常下降。当馈线接入 DG 之后, 注入系统的功率会抵消负载电流, 从而引起系统电压降落减小, 特别是当负荷减小时, DG 接入处的电压会出现波峰<sup>[9]</sup>。可以采取以下方法解决电压升高的问题: 负荷需求低谷时期限制 DG 注入的功率; 增大导体截面减小线路阻抗; 通过 DG 的电力电子接口装置调整其出口电压<sup>[10]</sup>。

2) 低电压——许多馈线电压调节器, 使用线路电压降落补偿手段来提高调节器的输出电压, 并使远离调节器的地方也能维持稳定的电压水平。当有 DG 处于电压调节器的下游时, 而且 DG 的输出电压是调节器负载中的重要部分, 就可能引起电压调节器的输出电压降低。因此, 如果 DG 无法向系统注入足够的无功功率, 调节器下游区域将会处于低电压水平。这种情况可通过协调线路电压降落补偿装置或其他调节器控制装置, 也可以通过迁移或增建其他电压调节装置来解决<sup>[10]</sup>。

低电压水平也可能是由于基于异步发电机 DG 从系统中吸收滞后的无功功率(感性无功)而产生的, 这种情况的低电压可通过在适当地点安装适当规模的电容器来解决<sup>[11]</sup>。

#### 2.1.2 频率

在传统电力系统中, 由于系统中存在惯量, 可通过频率的轻微变化满足负荷变动时的初始功率平衡, 然后功率调节器使系统的频率恢复到额定值<sup>[12]</sup>。电力电子接口的 DG, 由于原动机(例如微型燃气轮机和燃料电池)响应速度慢和电力电子器件本身没有储存的能量<sup>[13]</sup>, 使得这类小惯量电源系统不能对负荷的阶越变化做出快速响应。当微电网与主网联接时, 负荷的变化可由主网来平衡, 但微电网孤岛运行时, 为了保证响应的快速性和减小频率和电压波动, 可在 DG 直流部分装设储能装置<sup>[8,14]</sup>。

#### 2.1.3 谐波

DG 并网时, 由于大量电力电子器件的应用, 不可避免地给系统带来大量谐波, 谐波的幅度和阶次受发电方式以及转换器工作模式的影响, 同时对电压的稳定性和电压的波形都产生不同程度的影响。抑制和消除微电网中的谐波, 基本上有两种途径: 一是从改变非线性负荷本身性能考虑, 减少它们注入系统中的谐波电流, 这主要适用于微电网主要谐波源是电力电子装置; 二是装设谐波补偿装置来补偿谐波, 这对各种谐波源都适用<sup>[15]</sup>。

#### 2.1.4 电压闪变

对于大型 DG 的启动、输出的短时剧变以及与系统中电压反馈控制设备相互作用都可能对配电网和微电网造成冲击和电压闪变。可考虑以下方法补偿闪变: 1) 对分布式电源采用独立回路供电; 2) 降低共同配电线路阻抗; 3) 提高供电电压; 4) 采用静止型无功功率补偿装置; 5) 采用分布式储能装置<sup>[16]</sup>。

### 2.2 微电网控制

微电网控制是实现其众多优越性能的重要保证。与传统控制有显著的不同, 微电网控制必须保证: 在并网和孤岛运行方式下, 都能控制局部电压和频率, 使系统安全稳定运行; 提供或者吸收电源和负荷之间的暂时功率差额; 根据故障情况或是系统需要, 平滑自主地实现与主网分离、并列或是两者的过渡转化运行。由于微电网并网和孤岛运行情况的差异, 所以控制方法和策略也不同。

#### 2.2.1 并网运行方式下的控制

并网时微电网通过 PCC(公共联接点)点与大电网相连, 根据负荷情况与大电网交换功率。频率的调整由大电网完成, 但必须有局部电压控制, 使各电源之间没有大的无功电流流动, 否则 DG 高渗透率的系统可能会产生电压和无功偏移或振荡<sup>[17-19]</sup>。在并网运行方式下, DG 单元以局部电压支撑的形式提供辅助服务。对于电力电子接口 DG, 与有功频率下垂控制器相类似, 其采用电压无功下垂

控制器<sup>[20-22]</sup>, 利用 DG 本地信息计算局部无功需求。

### 2.2.2 孤岛运行方式下的控制

孤岛运行是指主网故障或电能质量不满足要求时, 微电网与主网断开形成孤岛运行, 由 DG 向微电网内的负荷供电, 可分为计划孤岛和无计划孤岛。微电网的孤岛运行为系统提供了更高的可靠性和不间断供电<sup>[23]</sup>。关于微电网孤岛运行控制已有很多文献研究涉及, 主要有以下几类。

#### 1) 微电网系统单主或多主控制方法

仅一个或多个 DG 的 (Voltage Source Inverter, VSI) 提供参考电压和参考频率<sup>[24]</sup>。孤岛情况下, 微电网控制参考单元的功率实现电力供需平衡, 同时保证较高的电压和频率质量。另外, 微电网再次并网时, 微电网系统的频率和电压可保持在孤岛前的标准, 通过锁相环节的控制, 确保微电网与主网频率和电压一致, 减轻暂态过程波动, 基本实现平滑、柔性地并网。不过, 单主控制方法使孤岛运行时微电网的稳定性完全取决于参考 DG 能否正常运行, 对其依赖度较高, 而多主则不存在这个问题。另外单主或多主控制方法对提供参考电压和频率的 DG 旋转备用容量要求较高, 孤岛情况下应能承担并网运行时由主网提供的全部功率。

#### 2) 微电网系统对等控制方法

所谓下垂控制就是选择与传统发电机相似的频率一次下垂特性曲线 (Droop Character) 作为 DG 的控制方式, 利用频率有功下垂曲线将微电网系统不平衡的功率动态分配给各机组来承担<sup>[25-26]</sup>, 无须机组间的通信协调, 实现了 DG 即插即用和对等控制的目标, 保证孤岛下微电网内电力供需平衡和频率的统一, 具有简单可靠的特点。但该方法没有考虑到系统电压与频率的恢复问题。因此, 当微电网遭受到严重的破坏或干扰时, 系统很难保证频率质量, 而且并网时由于微电网没有与主网进行同步, 会对主网的电压和频率产生一定的冲击。另外, 该控制方法是针对电力电子接口的微电源系统, 没有考虑传统发电机与逆变微电源的协调控制。

Charles K.sao 利用孤岛运行时的动态模型——微电网的电压依赖于 DG 与负荷间的有功平衡, 无功平衡决定了微电网的频率。提出了 VPD/FQB (Voltage-Power Droop/Frequency-Reactive Boost) 控制策略, 应用 dq 坐标系下的电流控制来实现联网与孤岛运行情况下的功率控制, 设置逆变器型 DG 的有功和无功参考值来分别调节微电网的电压和频率, 可以实现并联运行的逆变 DG 联合调整微电网的电压和频率<sup>[27]</sup>。

VPD/FQB 控制器输出的有功使电压参考值

下垂来联合调节微电网电压, 并使有功在各逆变型电源之间均分。类似地, 应用频率无功推进来联合调节频率, 并实现无功在各微型电源之间的均分。此外, Charles K.sao 提出的改进 VP/FQ 交叉下垂可实现通过同步机接入 DG 与逆变器 DG 均分负荷, 此种方法弥补了以往控制方法局限于逆变器 DG 的不足。

#### 3) 基于多代理技术的微电网控制<sup>[28-29]</sup>

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、响应能力、自发行行为等特点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且无需管理者经常参与的系统。文献[30]建立了以上级电网 Agent、微电网 Agent、元件 Agent 组成的三层多代理控制系统, 通过对各 Agent 之间的协调控制达到能量的灵活调度, 并保持微电网的高效、稳定运行。但是, 目前多代理技术在微电网中的应用多集中于对频率、电压等进行控制。要使多代理技术在微电网的控制中发挥更大的作用, 还需大量的研究。

### 2.3 微电网保护

含多个分布式电源及储能装置的微电网的接入, 彻底改变了配电系统故障的特征<sup>[31-32]</sup>。而且微电网在并网和孤岛两种运行情况, 短路电流大小不同而且差异很大。因此, 如何在孤岛和并网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。

文献[33]提出的保护方案: 监测微电源的输出电压, 通过派克变换为 d-q 坐标轴上的直流量。由于网络故障微电网输出的任何偏差反应在 d-q 值的偏差上, 偏差值用于检测故障并启动故障段隔离。此方案避开了并网和孤岛两种工况下故障电流的不同, 适用于并网与孤岛故障。

此外还有一些文献针对特定保护区域的内、外部故障<sup>[34]</sup>和特定单相接地故障与线间故障的故障<sup>[35]</sup>提出了相应的保护策略。

在大量 DG 参与电网供电, 并出于经济性考虑频繁投切 DG 的情况下, 将会出现更多保护新问题, 这将是一个非常重要的研究课题。

### 3 微电网其他问题及研究方向

上面的部分针对微电网电能质量、控制和保护几方面的问题和技术措施进行了详细描述。但 DG 接入后形成微电网而引发的问题还有很多, 还需要在以下几方面进行系统深入的研究。

#### 1) 微电网中 DG 数量和渗透率的增加, 对配电

系统的电压、网损和短路容量等都有很大的影响,而且 DG 分布的不确定性和一些 DG (风电、光伏发电等)发电的不连续性,使得原有的电力系统规划方法不再适用微电网的规划。所以迫切需要新的规划方法合理规划、设计 DG 的类型、安装地点和容量,才能充分发挥微电网的积极作用。

2) 微电网的发展使电力公司和用户之间形成了一种新型关系,而其中的 DG 可以以不同的模式参与电力市场:平衡市场、电能市场、配电网管理及辅助服务市场。研究 DG 不同参与模式下对现有电力市场机制的影响,建立新型的用电和供电管理体系,完善相应的电力法规,提高质量,降低费用。

3) 以能源利用效率最大化为目标,考虑各种约束条件,把 DG 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作为可控变量,建立微电网优化运行的数学模型,最大限度地利用可再生能源,保证整个微电网运行的经济性。

4) 高频交流微电网使设备小型化,便于交流储能设备接入。研究使用标准的电能质量调节器和通用有源线路调节器来补偿无功和控制潮流,减轻谐波电流电压的影响,改善电能质量。

5) 开展直流微电网研究。直流微电网需要专用的直流输电线路,相对于交流微电网有以下优点:

(1) 各个直流微电源易于协调控制;(2) 直流微电网中负荷和电源输出的变化可作为一个整体进行补偿;(3) 只需一个逆变器与交流电网联接,降低损耗<sup>[36]</sup>。

6) 开展智能电网研究,通过采用先进的传感测量技术、先进的电气设备、先进的控制方法以及先进的决策支持系统,实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好的使用,其主要特征包括自愈、激励和包括用户、抵御攻击、容许各种不同发电形式接入、启动电力市场以及资产的优化高效运行。

## 4 结论

近年来微电网技术作为一个较为前沿的研究领域,以其高可靠性、环保、灵活等特点被欧美发达国家所大力发展。我国 863、973 等国家重点研究发展规划也开始立项,未来几年微电网理论及相关技术将会通过示范工程得到验证,进而得到广泛的实践应用,因此开展微电网相关问题和技术研究非常必要。

## 参考文献

- [1] 李鹏, 张玲, 盛银波. 新能源及可再生能源并网发电规模化应用的有效途径-微网技术[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36 (1): 10-14.  
LI Peng, ZHANG Ling, SHENG Yin-bo. An effective way for large scale renewable energy power generation connected to grid-microgrid[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36 (1): 10-14.
- [2] 余涛, 童家鹏. 微型燃气轮机发电系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (3): 27-31.  
YU Tao, TONG Jia-peng. Modeling and simulation of the microturbine generation system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (3): 27-31.
- [3] Lasseter B. Microgrids[C]. //IEEE power engineering society winter meeting. New York: 2001: 146-149.
- [4] Caire R, Retiere N, Martino S, et al. Impact assessment of LV distributed generation on MV distribution network[C]. //IEEE power engineering society summer meeting. 2002: 1423-1428.
- [5] Niknam T, Ranjbar A M, Shirani A R. Impact of distributed generation on Volt/Var control in distribution networks[C]. //IEEE power tech conference proceedings. Bologna: 2003: 23-26.
- [6] Hatziargyriou N D, Dimeas A, Tsikalakis A G, et al. Management of microgrids in market environment[C]. // International Conference on Future Power Systems. 2005: 18.
- [7] 韦钢, 吴伟力, 胡丹云, 等. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33 (1): 36-40.  
WEI Gang, WU Wei-li, HU Dan-yun, et al. Distributed generation and effects of its parallel operation on power system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (1): 36-40.
- [8] Paolo Piagi. Microgrid control, doctoral dissertation[D]. University of Wisconsin-Madison, 2005.
- [9] Masters C L. Voltage rise the big issue when connecting embedded generation to long 11kV overhead lines[J]. Power Engineering Journal, 2002.
- [10] Repo S, Laaksonen H, Maki K. Ring operation of distribution system in case of distributed generation-voltage control[C]. //Nordic Wind Power Conference. 2004.
- [11] IEEE1547 IEEE standard for interconnecting distributed resource with electric power system[S]. 2003.
- [12] Bergen A R. Power systems analysis[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986.
- [13] Robert Lassetr, Piagi P. Providing premium power through distributed resource[C]. //Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. 2000: 1-9.

- [14] Katiraei F, Iravani M R, Lehn P W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2005, 1 (1) : 248-257.
- [15] 王军. 带分布式发电的配电网谐波研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2006.
- [16] 梅天华. 分布式发电闪变研究与管理(硕士学位论文)[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [17] 盛鹏, 孔力, 等. 新型电网—微电网 (Microgrid) 研究综述[J]. 继电器, 2007, 35 (12) : 75-81.  
SHENG Kun, KONG Li, et al. A survey on research of microgrid - a new power system[J]. Relay, 2007, 35 (12) : 75-81.
- [18] Hua Chih-Chiang, Liao Kuo-An, Lin Jong-Rong. Parallel operation of inverters for distributed photovoltaic power supply system[J]. IEEE Indus Appl, 2002: 1979-1983.
- [19] Guerreo J M, Jose matas, Luis Garcfa de Vicuna, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2006, 53: 1461-1470.
- [20] Guerreo Josep M, Hang Liiun, Uceda Javier. Control of distributed uninterruptible power supply systems[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2008, 55 (8) : 1380-1391.
- [21] Guerreo J M, Vasquez J C, Matas Jose, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2009, 56 (3) : 726-736.
- [22] Alanne K, Saari A. Distributed energy generation and sustainable development renew[J]. Sustain Energy Rev, 2006, 10 (6) : 539-558.
- [23] Pecas Lopes J A, Moreis C L, Madureira A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2006, 21 (2) : 916-924.
- [24] PIAGI P, LASSETER R H. Autonomous control of microgrids[C]. //Power Engineering Society General Meeting. 2006: 8-15.
- [25] YU Xun-wei, JIANG Zhen-hua, ZHANG Yu. Control of parallel inverter-interfaced distributed energy resources[C]. //IEEE energy2030. Atlanta: 2008: 17-18.
- [26] Majumder R, Ghosh A, Ledwich G, et al. Control of parallel converters for load sharing with seamless transfer between grid connected and islanded modes[C]. // Power and Energy Society General Meeting-conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008: 1-7.
- [27] Sao C K, Lehn P W. Control and power management of converter fed microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23 (3) : 1088-1098.
- [28] Dimeas A L, Hatziaargyriou N D. A MAS architecture for microgrids control[C]. //Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power System. 2005: 402-406.
- [29] Dimeas Aris L, Hatziaargyriou Nikos D. Operation of a multiagent system for microgrid control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20 (3) : 1447-1455.
- [30] 章健, 艾芊, 王新刚. 多代理系统在微电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (24) : 80-87.  
ZHANG Jian, AI Qian, WANG Xin-gang. Application of multi-agent system in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (24) : 80-87.
- [31] 袁超, 吴刚, 等. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (2) : 99-105.  
YUAN Chao, WU Gang, et al. Protection technology for distributed generation systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (2) : 99-105.
- [32] 庞建业, 夏晓宾, 房牧. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器, 2007.  
PANG Jian-ye, XIA Xiao-bin, FANG Mu. Impact of distributed generation on relay protection of distribution system[J]. Relay, 2007.
- [33] Al-Nasseri H, Redfern M A, Li F. A voltage based protection for micro-grids containing power electronic converters[C]. //Power Engineering Society General Meeting. 2006: 1-7.
- [34] Al-Nasseri H, Redfern M A. Harmonics content based protection scheme for micro-grids dominated by solid state converters[C]. //Power System Conference. Middle-East: 2008: 50-56.
- [35] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Microgrid fault protection based on symmetrical and differential current components [EO/OL]. <http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/publicatio/2007public/microgridprotection-1.pdf/2006-12-01>.
- [36] Youichi Ito, Yang Zhongqing, Hirofumi Akagi. DC microgrid based distribution power generation system[C]. //Proc International Power Electronics and Motion Control Conference. Xi'an(China): 2004: 1740-1745.

收稿日期: 2009-10-29; 修回日期: 2010-01-06

作者简介:

苏玲 (1977-), 女, 博士研究生, 研究方向为分布式电源和微电网控制; E-mail: Ling0su@163.com

张建华 (1952-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、智能电网技术;

王利 (1975-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统配电网规划和农网智能化。