

微网群控制技术研究现状与展望

支娜¹, 肖曦², 田培根^{2,3}, 张辉¹

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

3. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 微网群作为多个微电网、分布式电源、储能及负载的互联系统,其组成结构的复杂性增加了控制的复杂性,合理有效的控制策略是微网群稳定运行的基础。根据现有文献资料对微网群研究中的组网形式及协调控制策略的研究现状做了详尽的阐述,列举了交流总线架构、交直流总线架构及虚拟微网群总线架构的组网形式,比较了微网群分级控制、主从控制、多代理控制及对等控制策略的优缺点,最后根据已有的研究基础,对微网群未来的发展及研究中的关键技术提出了建议性方案。

关键词: 微网群; 协调控制; 分布式电源; 组网方式; 多代理系统

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.017

0 引言

为了减少环境污染,持续发展清洁能源,以再生能源为主的分布式发电技术成为现代电网的一个重要选择^[1-2],但是分布式电源固有的间歇性、随机性等特点使得其简单并网将对电力系统的电能质量及稳定运行产生影响^[3-5]。为了解决分布式电源的接入问题,充分挖掘分布式电源为电网和用户带来的价值与效益,微电网应运而生^[6-9]。微电网是由分布式电源、储能装置、能量转换装置、监控保护装置、本地负载构成的独立可控系统,安装在用户侧,具有自治运行、多能互补、优化管理和协调控制等优势,解决了偏远地区供电不足、电能质量较差的问题^[10-13]。

微电网的工作容量有限,抗扰动能力弱,工作过程中可能会出现分布式电源输出功率突变、大面积负荷的瞬时接入或脱落等瞬态事件,降低了微电网的可靠性^[14]。微网群作为分布式发电网络的一个全新概念,立足于微电网,将地理位置上毗邻的微电网、分布式发电系统互连,构成一个微电网群集系统(简称微网群),通过群内微电网(子微网)及分布式电源之间的能量调度和互济,来增强彼此间的供电可靠性,进一步提高分布式电源的渗透率。微网群概念的提出不但增强了孤岛运行情况下微电网运行的可靠性,而且能够实现微电网与分布式发电系统之间的能量互济。揭示微网群内子微网与子微网、子微网与分布式发电系统之间的相互作用机理,研

究各组成要素之间、各子系统之间的相互协调、合作或同步的联合作用,使其在宏观上表现为一个可控源,对含有微电网及分布式发电系统的智能配电网的可靠安全稳定运行具有一定的促进作用。

智能配电网基于先进的信息技术和通信技术实现电网运行和控制的信息化与智能化,其目的是改善电源结构和利用率,提高电力传输的经济性、安全性和可靠性^[15]。但是智能配电网直接管理的分布式发电系统和微电网可能由于需要处理的数据量过大而难以进行调度,同时,这些发电单元归属地的不同也可能导致调度指令不能够被快速、有效、准确地执行。微网群可以对一个区域内的分布式发电系统、微电网及负荷进行管理和控制,既保证了对配电网的安全运行产生尽可能小的影响,又能够最大限度地利用分布式能源,是智能配电网的重要组成部分。

目前国内外对微网群的研究都处于起步阶段。欧盟支持的 More Microgrids 项目^[16]中,提出了微网群概念的雏形,该项目将地理位置上临近的低压 LV (Low Voltage)微电网、分布式电源、储能及负荷连接到中压 MV (Medium Voltage)网络中,构成一个微网群,该微网群与上级电网有一个公共连接点,并作为一个独立的可调度单元,既可以并网运行也可以孤岛运行。葡萄牙学者在该项目的支撑下对微网群的组成架构、分级控制、状态预估进行了研究^[17-20],通过建立一个多微网的仿真模型,分别在孤岛和并网条件下对所提出的微网群电压频率优化算法、基于实时信息采集和模糊控制的状态预估算法及微网群的黑启动流程和负荷恢复顺序进行了验证,从理论上论述了微网群控制的可行性。美国、加拿大、印度等国的学者^[21-23]在该研究基础上,将微网群与智能电网的概念相联系,对有用户参与的微网群的稳定性、优化

收稿日期:2015-09-17;修回日期:2016-02-04

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012-AA050217);国家自然科学基金资助项目(51277150,51307140)
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA05-0217) and the National Natural Science Foundation of China (51277150,51307140)

算法及运行模式进行分析,提出了多微网控制系统(MMCS)的概念,并指出使用基于多代理技术的MMCS控制策略及通信方式,可以实现分布式电源的“即插即用”,并能增大用户的参与度,使得当前的电力系统控制更加灵活,进一步说明了发展微网群的可行性。ABB公司从发电市场与辅助服务市场协调优化的角度出发,提出了基于中央控制器的微网群的辅助服务优化协调控制策略,从发电市场的角度对微网群的可行性进行阐述^[24]。如今,希腊、丹麦等国家^[25-26]也开始了对微网群状态预估、电能质量、故障处理等方面的研究。我国对微网群的研究处于起步阶段,四川大学从微网群的可靠运行方面讨论了微网群中失效节点对负载可靠性的影响^[27]。重庆大学以云电科技园智能微网工程为依托,研究了包含有2个子微网的串联、并联的分层协调控制策略^[28]。清华大学在国家863项目“微网群高效可靠运行关键技术及示范”的支撑下从储能容量配置方面提出了微网群中群母线储能容量的设计方法^[29],为微网群中储能单元的规划设计提供了设计方案。文献^[30-32]从电力系统故障保护的角度对多微网的故障保护和能量管理策略进行了研究,但研究仅是从多微网的角度进行,没有扩展到微网群。

总体而言,目前微网群的基本概念和特征仍然缺乏清晰的定义和描述,其研究仅限于个别案例的理论分析和仿真,缺乏相关的实验验证。同时,对微网群控制机理缺乏深刻认识,未能建立微网群本身的研究框架体系,亟待开展大量深入的研究工作。本文基于对已有微网群研究成果的调研和归纳,侧重于对微网群的组网方式、协调控制策略进行描述和分析,并对微网群未来的发展及研究中的关键技术提出了建议方案。

1 微网群的组网技术

微网群将地理位置上毗邻的低电压等级的分布式发电场、微电网等级联在中压母线上,通过微网群公共连接点MMG-PCC(Multi-MicroGrid Point of Common Coupling)连接到上级电网,微网群的不同组网方式具有不同的控制策略。已有文献中,微网群的组网方式主要分为以下3种:基于交流微电网的微网群结构、基于交直流微电网的微网群结构、虚拟微网群。

1.1 基于交流微电网的微网群结构

目前,基于交流总线架构的微电网技术在欧美和日韩等一些发达国家已经较为成熟,并建设了一批微电网示范工程^[33]。这些微电网孤岛运行时,将会采取切负荷(load shedding)策略以保证重要负荷的可靠供电^[34]。如果能够将这些地理位置上毗邻的、

容量不等的、组成结构不同的交流微电网通过中压馈线连接在一起,构成基于交流微电网架构的微网群结构^[21],孤岛运行时,则可以通过微电网间的能量互济来提高用户供电的可靠性,如图1所示。

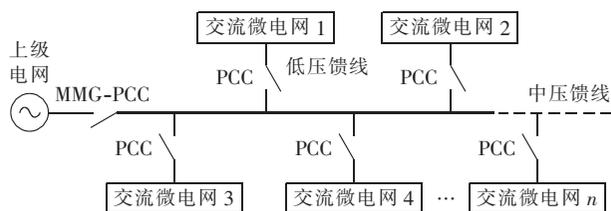


图1 基于交流微电网构成的微网群结构

Fig.1 Structure of multi-microgrid based on AC microgrids

图1所示的微网群通过一个MMG-PCC与上级电网相连接,所有的低压微电网均并联在交流母线上,通过PCC接口与中压馈线相连,该中压馈线上没有分布式电源、储能及可控负荷。群内的子微网都可以实现各自的自治管理。并网运行时,根据经济调度策略确定群中各子微网的运行方式;孤岛运行时,各子微网在给本微网内负荷提供可靠供电的同时,能够在群内子微网之间进行功率平衡,实现子微网间的功率补给。因此在微网群这种组网方式下,可以减少负荷的切除,提高负荷供电的可靠性。

交流微电网及分布式电源构成的微网群结构如图2所示。基于分布式电源的微电网位于电力系统的终端,低功率等级的住宅及楼宇供电系统是微电网的主要存在形式。图2中,分布式电源、储能、可控负荷及低压微电网通过中压馈线互联,在大电网故障或者发生电压跌落时,微电网附近的风电场或者光伏发电场加上必要的储能可以保证该区域内微电网用户的供电可靠性。这种微网群的组网形式,增加了微网群的结构复杂度及控制的复杂度,但是提高了分布式电源的渗透率。由于在中压馈线上并联了分布式发电系统,为了在微网群孤岛运行时平滑功率,需加入储能装置,储能装置的容量由分布式电源的输出功率曲线、可控负载的需求及微电网的发电量预估等因素决定。该组网方式下,群母线上的

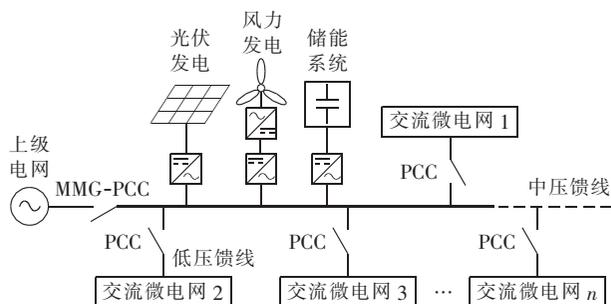


图2 基于交流微电网及分布式电源构成的微网群结构

Fig.2 Structure of multi-microgrid based on AC microgrids and distributed generations

分布式电源既可以工作在 MPPT 最大功率状态,也可以工作在限制功率状态,依据负载需求及储能剩余额而定。

1.2 基于交直流混合微电网的微网群结构

在交流电网的这种配电方式下,直流输出类的分布式发电单元(如光伏电池、燃料电池等)以及储能装置(如蓄电池、超级电容器等)都需要通过变换器接入交流微电网,大幅增加了微电网的损耗^[35]。另外,对用户侧而言,很多家庭用电设备(如电脑、手机、相机、LED 等)都是采用直流供电,因此有学者指出交直流混合微电网是未来电网的发展方向^[26,36-40]。基于交流微电网和直流微电网(DC Microgrid)构成的微网群架构如图 3 所示。

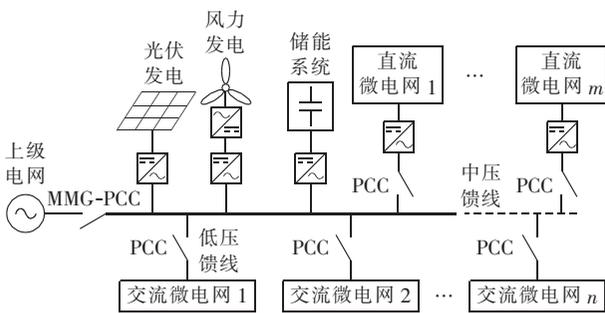


图 3 交直流微网群结构

Fig.3 Structure of multi-microgrid based on AC/DC microgrids and distributed generations

其中直流微电网通过一个 DC/AC 变换器并入交流母线,与交流微电网、分布式电源、储能一起构成一个微网群。该结构的特点是:微网群中既含有交流母线又含有直流母线,既可以给交流类的负荷供电又可以给直流类的负荷供电,减少了中间变换装置,提高了供电效率和供电可靠性。实际上,该微网群中的直流微电网可以看成是一个独特的直流电源通过变换器接入交流母线。因此,在控制上与交流微网群既有相同点也有不同点。这种组网方式的优点是更符合用户的使用特点,提高了变换器的效率,但是在控制策略上比基于交流微电网构成的微网群相对复杂一些。

1.3 虚拟微网群结构

1997 年 Shimon Awerbuch 博士首先提出了虚拟电厂 VPP(Virtual Power Plant)的概念。VPP 是指通过通信网络连接并由高级电力管理系统监控的小型 and 超小型分布式电源以及柔性负荷的集合。VPP 无需改变每个分布式电源并网的方式,通过先进的控制、计量技术及更高层面的软件构架实现多个分布式电源的协调优化运行。与微电网相比,VPP 具有以下特点^[41-42]:

a. 微电网强调“自治”,而 VPP 强调“参与”,即

吸引并聚合各种分布式电源参与电网调度和电力市场交易;

b. 微电网整合的是地理位置上接近的分布式电源,而 VPP 可以将相对偏远和孤立的分布式发电设施进行虚拟整合;

c. 微电网既可以运行在孤岛模式也可以运行在并网模式,而 VPP 始终与公网相连,即只运行于并网模式。

VPP 是智能电网的一个重要组成部分,对虚拟电厂的概念进行延伸和扩展,近年有学者提出了虚拟微网群 VMGs(Virtual MicroGrids)^[43]、临时微网群 PMGs(Provisional MicroGrids)^[44]的概念。具体是指将若干个微电网及分散的分布式电源集合到虚拟电厂中,作为一个特殊的电厂参与电力市场和电网的运行。虚拟微网群在 VPP 的基础上,增加了可以自治管理的微电网,但是这些微电网与分布式电源是通过软件的形式连接在一起,在物理形态上并没有连接在一起,因此虚拟微网群在组成结构、容量配置等方面更加灵活、可靠和经济。虚拟微网群中的微电网与分布式电源都有一个主控模块与虚拟微网群控制中心相连,该控制中心可以同时接收来自用户的指令,通过合理的计算和优化设定每一个连接到虚拟微网群的发电单元的工作模式,如图 4 所示。

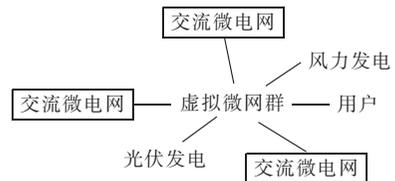


图 4 虚拟微网群结构

Fig.4 Structure of VMGs

虚拟微网群无需改变分布式发电系统、微电网及用户的物理连接方式,所形成的虚拟网络主要是用于实现通信连接、信息处理、协调控制和能量管理,很可能会成为未来智能电网的重要组成部分。虚拟微网群的能量管理单元需要完成下述功能:

a. 电力管理功能,用于监视、计划和优化虚拟微网群中各个发电单元的运行,实现分布式能源利用率的最大化及系统损耗的最小化;

b. 负荷预测功能,对接入微网群的负荷实现短时负荷预测功能;

c. 虚拟微网群内微电网及分布式发电单元的发电预测功能;

d. 电力数据管理功能,用于收集、保存、优化和预测所需要的数据,如发电量和负荷的情况;

e. 强大的管理平台和通信网络,确保系统的安全稳定运行。

虽然虚拟微网群能够解决微电网的地域限制问题,但是目前还没有文献对虚拟微网群的配置方式、协调控制及能量管理策略进行深入的分析,能否动态配置虚拟微网群、虚拟微网群能否进行离网控制、虚拟微网群与智能电网之间的联系等问题还有待进一步的研究。

2 微网群协调控制策略

对微电网控制策略进行延伸,微网群在更高层次上实现了群内分布式电源及子微网、负荷等的协调控制。微网群既可以并网运行也可以脱离大电网孤岛运行,并网运行时,微网群作为上级电网的一个可调度单元,从上级电网吸收功率或向上级电网提供功率,保证群内负荷的正常运行;孤岛运行时,微网群与上级电网的公共连接点断开,微网群内各子微网之间进行能量的协调和互济,为微网群内用户提供可靠的电能或热能供应。如何协调微网群内发电单元之间的能量互济,既保证中压母线负荷的正常工作又保证微电网内负荷的供电可靠性是微网群研究的重点。

目前对微网群协调控制策略的研究主要包括 2 个层面,一个是群级分散自治协调控制策略,另一个是发电单元级协调控制策略。群级分散自治协调控制策略主要有 4 种,分别是基于通信的微网群分级控制策略^[17,26]、微网群主从控制策略^[23]、微网群多代理控制策略^[44-45]及交直流微网群对等控制策略^[37]。对于发电单元级的电压/频率控制及功率优化控制,目前在技术层面已有了突破性进展。本文主要从微网群的系统级出发,对已有微网群的群级自治协调控制策略进行分析和总结。

2.1 微网群分级控制策略

微网群的分级控制策略是一种基于通信的控制策略,主要完成下述功能:提供微网群与上级电网及用户的接口,完成上级电网的调度及用户需求的调度;提供所有发电单元之间的潮流分配,以保证微网群电压与频率的稳定,并具有离并网切换功能;为底层的发电单元提供控制接口,以接收和执行控制命令。根据以上原则,针对图 1 所示的微网群架构,文献[40]对交流微电网分级控制策略的概念进行了延伸,将其提升到了微网群的群级控制,如图 5 所示。

每一个子微网通过一个 PCC 与群总线相连,多个子微网组成一个微网群。第一级控制作为微网群的主控,实现上级电网对微网群的功率调度及微网群与微网群之间的功率平衡,群与群之间不进行通信,每个微网群接收来自上级电网的指令,采用微网群恒功率控制;第二级控制主要完成微网群内的控制,通过接收第一级控制下达的群控制指令,合理调度群

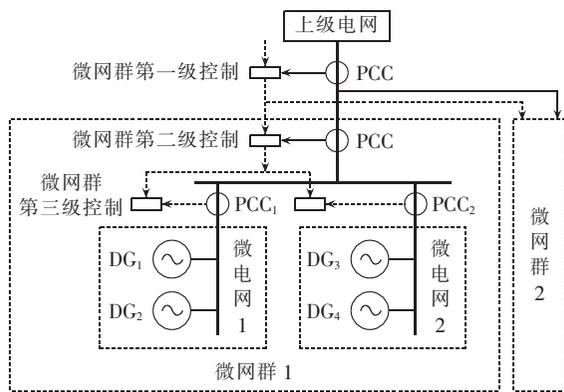


图 5 文献[40]提出的微网群分级控制

Fig.5 Hierarchical multi-microgrid control proposed by reference[40]

内的子微网,维持群内电压及频率的平衡,同时第二级控制还需完成微网群离并网时群母线电压与上级电网母线电压的平衡,即二次调压调频功能;第三级控制为微网级控制,实现对群内子微网的控制,根据文献[40],对子微网的控制仍沿用微电网的分级控制策略,即子微网内微源之间采用对等的控制策略,子微网之间不需要通信。这种分级控制策略的优点是在不改变子微网控制策略的前提下,增加微网群的控制功能,同时,子微网内的微电源采用对等控制,增强了系统的可靠性,即一个微电源失效,不影响系统的运行。但是该文献仅从子微网的运行可靠性方面进行了仿真和实验验证,对于微网群层面的控制仅是一个设想,还有待于进一步研究。该微网群的控制策略仅适用于图 1 所示的微网群结构。

针对图 2 所示的微网群架构,文献[17]将微网群的控制分为三级,分别是第一级配电管理系统 DMS (Distribution Management System)、第二级中央自治能量管理 CAMC (Central Autonomous Management Controller)和第三级微网控制中心 MGCC (Microgrid Central Controller),层次及结构关系如图 6 所示。其中,CAMC 与 MGCC 之间的控制关系如图 7 所示。

(1)DMS 作为微网群对外的唯一接口,主要完成下述任务。

a. 实现用户接口。微网群群母线上的用户及微

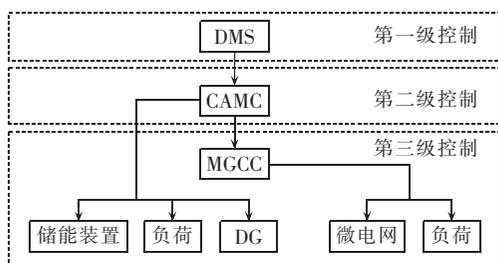


图 6 欧盟多微网项目分级控制

Fig.6 Hierarchical multi-microgrid control proposed based on project of “more microgrids”

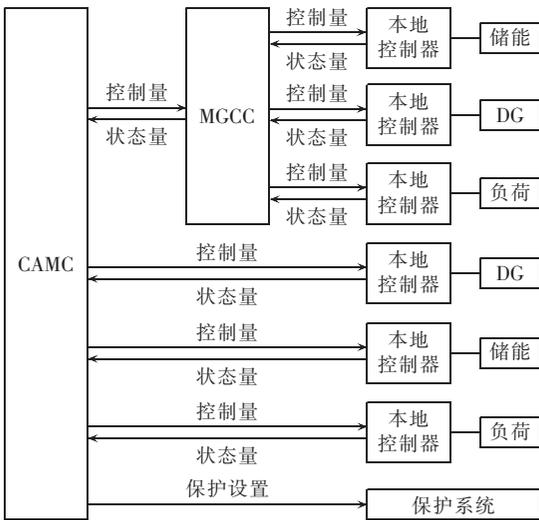


图 7 CAMC 与 MGCC 之间的控制信息交换
Fig.7 Control information exchange between CAMC and MGCC

网群中微电网的用户均可以根据自己的需求通过该接口实现对微网群的设定,即微网群的控制提供友好的用户接口。

b. 上级电网调度,主要是指令下达。微网群接收上级电网调度指令,对微网群的输入及输出功率进行控制。

c. 微网群运行状态监控。微网群中各个分布式电源以及微电网、负荷运行状况通过该接口上报给上级电网,实现上级电网对微网群的监控。

(2)CAMC 模块向上与 DMS 模块接口,接收用户及上级电网指令,在对本地负荷需求及本地发电单元发电预估的基础上,设计微网群协调调度策略,将控制指令下达给 MGCC、分布式电源和储能装置。CAMC 主要完成下述任务:

a. 群内微电网的功率平衡调度(发电、储能、微网、用户优化调度);

b. 群内微电网的状态预估(分布式电源、负载需求预估);

c. 群总线频率、电压的二次整定;

d. 微网群的离网、并网切换;

e. 电能质量监测与管理(谐波、电压跌落、不平衡);

f. 经济性运行调度(微网群经济运行模型是以群内设备安装成本、运行维护成本及与大电网互购电能所得收益为基础的最小化成本模型)。

(3)MGCC 接收来自 CAMC 的指令,运行在特定的运行模式下,实现对微电网、分布式发电系统、负荷接口变换器的控制。主要完成下述任务:

a. 并群母线能量交换控制;

b. 并群母线电压偏差计算;

c. 电压、电流控制,下垂控制。

2.2 微网群的主从控制策略

微网群中的微电网、分布式发电系统及负荷的功率波动都很大,储能系统能够提高微网群应对突发事件的能力,增强其运行稳定性。微网群的主从控制是指微网群中有一个主控模块,该主控模块可以是一个容量较大的微电网^[47]也可以是微网群的主储能^[29],用于维持群母线电压和频率的平衡,控制框图如图 8 所示。

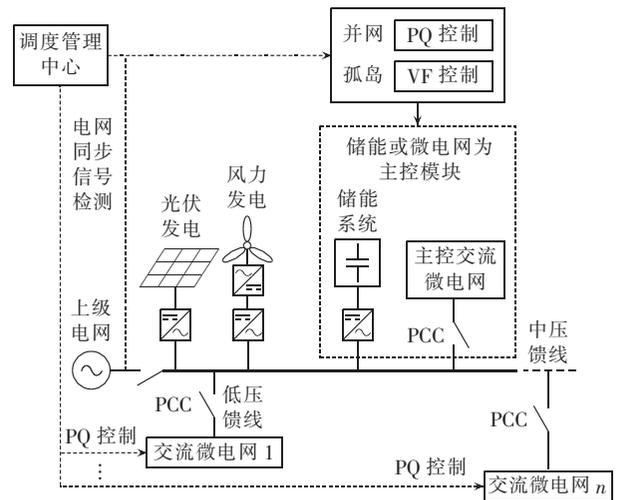


图 8 微网群主从控制框图

Fig.8 Block diagram of master-slave control of multi-microgrid

采用主从控制的微网群,在并网模式下,主控模块以 PQ 控制方式运行,成为一个可以调度的电流源;在孤岛运行方式下,主控模块需要维持群母线电压和频率的平衡,因此工作在 VF 模式下,群内其他的子发电单元均工作在 PQ 模式,即电流源模式。微网群的主从控制模式需要有一个调度管理中心,根据上级电网的调度指令或孤岛时发电单元及用户用电量的估算来设定群内每一个发电单元的功率。该控制策略的优点是所有的子发电单元(子微网、分布式发电系统、储能单元等)在微网群并网和孤岛运行模式下,不需要进行控制方式的切换,但是该控制对主控模块提出了更高的要求,不仅要求其容量能够支撑微网群离网情况下的运行,而且对其可靠性也要求很高,主控模块失效将导致微网群无法正常运行。如果群总线上的主储能模块为主控模块,则要求该模块有足够大的容量以维持微网群离网情况下群内负荷的供电需求,因此主储能模块的容量配置问题是该控制策略的难点;如果微电网为主控模块,则该主控微电网在微网群离网时需要提供足够的功率输出以维持群母线电压的平衡,其端口输出特性为一个电压源,该主控微电网内部必要时需采取切负荷的方式保证微电网输出电压的稳定,因此主控微电网内负荷的供电可靠性降低。

2.3 微网群多代理控制策略

微网群的多类型发电单元特性、海量的控制数据以及灵活的控制方式使得采用集中管理中心统一计算及控制的方式难以实现灵活、高效的调度。在微网群中使用多代理系统(multi-Agent),将控制权分散到每一个发电单元,由各发电单元根据微电网的调度自行判断运行方式并实时上报运行状态,可以提高微网群控制的有效性^[45-46]。微网群多代理控制的控制框图如图 9 所示。

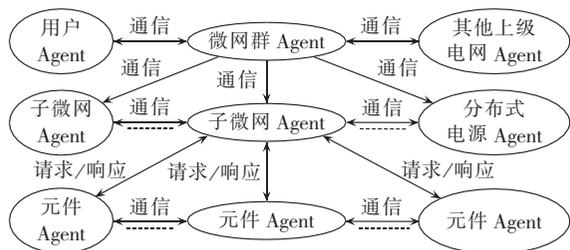


图 9 微网群多代理控制

Fig.9 Multi-agent control of multi-microgrid

图 9 中,微网群代理记录并监控各个微电网的运行状态,实现与其他上级代理的接口,根据微网间经济运行策略下达子微网及分布式电源的运行指令。子微网代理记录本微网内各个微源和负荷代理的状态,具体包括:综合电力市场的价格、天气状况、用户侧需求、发电容量等,在稳定系统运行的同时,进行经济优化,然后把优化后的结果下达给下级元件控制代理,进而控制整个多代理系统。元件代理包括子微网内的分布式电源代理和负荷代理,其中分布式电源代理主要完成对分布式能源的信息(种类、额定功率、可用燃料、费用支出及检修时间表等)的存储并监测其功率和运行状态;负荷代理能告知用户电网的实时情况,同时使用户能够根据自己的需求控制负荷状态。基于多代理技术的微网群控制策略需要制定标准的接口协议,从而实现对微网群全方位的管理和监测,但是该控制策略完全依赖于软件通信,而且仅针对既定的微网群,当微网群结构发生变化时,该控制软件需要进行修改。

2.4 微网群对等控制策略

对于微网群的控制,前面几种控制策略均是基于通信的管理策略,即控制依赖于通信。文献[21]指出由于微网群中各个微电网都是分散存在的,如果各个分散单元之间不采用通信总线联系,则需要采用对等控制来实现各个微网之间的功率平衡,文献[37]给出了由交流微网和直流微网构成的微网群之间的协调控制策略。该策略的优点是:2 个地理位置上接近的交流微电网和直流微电网可以构成一个微网群,其交流微电网的功率-频率下垂控制可与直流微电网的功率-电压下垂控制进行等效,从而实

现两者之间的无通信总线协调控制,如图 10 所示。

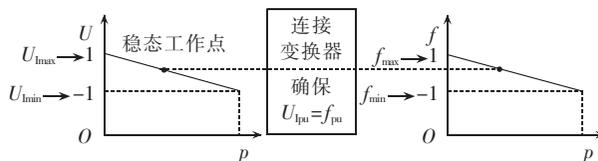


图 10 交直流微电网比例功率分配过程说明

Fig.10 Proportional power sharing of AC/DC microgrids

标准化算法如下:

$$f_{pu} = [f - 0.5(f_{max} + f_{min})] / [0.5(f_{max} - f_{min})]$$

$$U_{1pu} = [U_1 - 0.5(U_{1max} + U_{1min})] / [0.5(U_{1max} - U_{1min})]$$

其中, f 为交流微电网频率; U_1 为直流微电网电压; f_{pu} 和 U_{1pu} 分别为标准化后的交流微电网频率和直流微电网电压。

交、直流微网群额定运行时,保持 $f_{pu} = U_{1pu}$,相当于图 10 中的水平虚线,实现二者的标准化。标准化后,2 种下垂特性可以使用同一个标准,通过检测交流微电网的频率和直流微电网的电压,实现微网间功率的自动均衡。该控制策略不依赖于通信,而且控制结构简单,易于实现,但是该文献仅验证了一个直流微电网和一个交流微电网之间的协调控制,如果微电网数目增多,或者微电网间距离较远,则通信带宽对该控制策略的影响及多个微网之间如何进行等效需要进一步研究,因此该控制策略对于结构复杂、容量较大且对供电可靠性要求较高的微网群不适用。

3 微网群的研究展望

目前分布式发电技术、微电网技术及智能配电网技术分别处于不同的发展阶段。低压微电网中微电源的典型容量通常是 10~100 kW,微电网的总容量一般不超过 1 MW,微电网从局部解决了分布式电源的并网运行问题^[24]。微网群作为微电网概念的一个提升和发展,从区域的角度,将这些地理位置上毗邻的低压微电网、分布式发电系统等连接在中压母线上,为可再生能源多点分散接入配电网提供了技术支撑,促进了可再生能源的高效利用,增大了微电网的容量,成为智能配电网的一个重要组成部分。

目前,在世界范围内,微网群的各项研究和建设还主要侧重于理念的发展,关于微网群的技术运行、规划设计、接入标准、控制及保护等问题还没有进行深入的研究。为了实现配电系统和微网群的可控连接,保证微网群灵活独立的离并网运行,尚有较多的理论和技术问题需要解决,主要有以下几个方面。

a. 微网群运行过程中的暂态运行状态评估。

已有文献仅对固定连接方式下微网群的稳态运行特性进行了分析,未对微网群运行状态的切换、

子发电单元暂态特性对微网群运行状态的影响进行分析。因此分析微网群的暂稳态运行机理、建立微网群暂稳态运行状态评估方法、研究各个子集之间的安全切换策略、建立微网群自治安全切换区间是微网群研究中的关键技术。

b. 微网群综合规划及仿真模型的建立。

针对微网群的不对称及多时间尺度特性,对微网群的架构进行综合规划,并研究微网群的建模方法,对微网群元件随机投切的静态及稳态分析方法进行仿真研究,是构建微网群的基础。

c. 微网群能量管理系统技术研究。

已有文献对微网群的能量管理仅停留在功能和通信框架的描述上,未建立具体仿真模型和控制策略。对微网群中运行性能不同的子单元短时功率供求进行预测,研究多时间尺度、多特性电源互补消纳特性,建立微网群的优化调度模型是微网群研究中的关键问题。

d. 微网群的电能质量监测与治理技术。

微网群组成结构的多样化,使得其谐波特性和干扰源都比微电网复杂,目前还没有文献专门讨论微网群的电能质量检测和治理技术。研究微网群的干扰源特性、定位及电能质量的协调控制方法是保证微网群可靠运行的关键。

近年来,国家电网在草原、海岛等偏远地区的微电网建设上取得了显著的成效,这为微网群提供了一定的发展基础。随着能源互联网概念的提出,分布式电源及小型微电网的渗透率会逐渐提高,发展微网群、提升微网之间的协调控制水平必将成为趋势。

参考文献:

- [1] 丁明,王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备,2004,24(7): 31-36.
DING Ming,WANG Min. Distributed generation technology [J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(7):31-36.
- [2] TEODORESCU R,LISERRE M,RODRIGUEZ P,et al. Grid converters for photovoltaic and wind power systems[J]. Energy Procedia,2011,28(11):797-807.
- [3] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
WANG Chengshan,WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation system[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(20):1-4.
- [4] BALAGUER I J,LEI Q,YANG S,et al. Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(1):147-157.
- [5] GUERRERO J M,BLAABJERG F,ZHELEV T,et al. Distributed generation:toward a new energy paradigm[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2010,4(1):52-64.
- [6] LASSETER R,AKHIL A,MARNAY C,et al. Integration of distributed energy resources. The CERTS microgrid concept [R]. Berkely,CA,United States:Office of Scientific & Technical Information Technical Reports,2002.
- [7] LASSETER R H,PAIGI P. Microgrid;a conceptual solution[C]// Power Electronics Specialists Conference. Aachen,Germany:IEEE,2004:4285-4290.
- [8] 别朝红,李更丰,王锡凡. 含微网的新型配电系统可靠性评估综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):1-6.
BIE Zhaohong,LI Gengfeng,WANG Xifan. Review on reliability valuation of new distdbution system with microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):1-6.
- [9] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):25-34.
LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong,et al. Overview on micro-grid research [J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(19):25-34.
- [10] 时珊珊,鲁宗相,闵勇,等. 微电网孤岛运行时的频率特性分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):36-41.
SHI Shanshan,LU Zongxiang,MIN Yong,et al. Analysis on frequency characteristics of islanded micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(9):36-41.
- [11] 郑竞宏,王燕廷,李兴旺,等. 微电网平滑切换控制方法及策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(18):17-24.
ZHENG Jinghong,WANG Yanting,LI Xingwang,et al. Control methods and strategies of microgrid smooth switchover [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(18):17-24.
- [12] MAJUMDER R,LEDWICH G,GHOSH A,et al. Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4): 2768-2778.
- [13] ASSIS T M L,TARANTO G N. Automatic reconnection from intentional islanding based on remote sensing of voltage and frequency signals[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(4):1877-1884.
- [14] 时珊珊,鲁宗相,周双喜,等. 中国微电网的特点和发展方向[J]. 中国电力,2009,42(7):21-25.
SHI Shanshan,LU Zongxiang,ZHOU Shuangxi,et al. Features and developments of microgrids in China[J]. Electric Power,2009,42(7):21-25.
- [15] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14.
WANG Chengshan,LI Peng. Development and challenges of distributed generation,the microgrid and smart distributed system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2): 10-14.
- [16] LOPES J A P,MOREIRA C L,MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(2):916-924.
- [17] GIL N J,PEAS LOPES J A. Hierarchical frequency control scheme for islanded multi-microgrids operation[C]//2007 IEEE Lausanne POWERTECH. Lausanne,Switzerland:IEEE,2007: 473-478.
- [18] RUA D,PEREIRA L F M,GIL N,et al. Impact of multi-microgrid communication systems in islanded operation[C]// 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies(ISGT Europe). Manchester,

- United Kingdom;IEEE,2011:1-6.
- [19] MADUREIRA A G,PEREIRA J C,GIL N J,et al. Advanced control and management functionalities for multi-microgrids[J]. *European Transactions on Electrical Power*,2011,21(2):1159-1177.
- [20] RESENDE F O,GIL N J,LOPES J A P. Service restoration on distribution systems using multi-microgrids[J]. *European Transactions on Electrical Power*,2011,21(2):1327-1342.
- [21] SOFLA M A,KING R. Control method for multi-microgrid systems in smart grid environment—stability,optimization and smart demand participation[C]//*Proceedings of the 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*. Washington DC, United States:IEEE Computer Society,2012:1-5.
- [22] NG E J,EL-SHATSHAT R A. Multi-Microgrid Control Systems (MMCS)[C]//2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis,MN,United States:IEEE,2010:1-6.
- [23] NUNNA H S V S K,DOOLLA S. Demand response in smart distribution system with multiple microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*,2012,3(4):1641-1649.
- [24] YUEN C,OU DALOV A,TIMBUS A. Corp. Res. Center,ABB Switzerland Ltd.,Baden-Daetwil,Switzerland[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2011,58(1):173-183.
- [25] KORRES G N,HATZIARGYRIOU N D,KATSIKAS P J. State estimation in multi-microgrids[J]. *European Transactions on Electrical Power*,2011,21(2):1178-1199.
- [26] GUERRERO J M,LOH P C,LEE T L,et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—part II:power quality, energy storage,and AC/DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2013,60(4):1263-1270.
- [27] CHEN X,LIU B,LI C. A reliability evaluation method for distribution system with microgrids[C]//2012 Asia-Pacific IEEE Power and Energy Engineering Conference(APPEEC). Shanghai, China:IEEE Computer Society,2012:1-4.
- [28] 周念成,金明,王强钢,等. 串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略[J]. *电力系统自动化*,2013,37(12):13-18.
ZHOU Niancheng,JIN Ming,WANG Qianggang,et al. Hierarchical coordination control strategy for multi-microgrid system with series and parallel structure[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2013,37(12):13-18.
- [29] 田培根,肖曦,丁若星,等. 自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法[J]. *电力系统自动化*,2013,37(1):168-173.
TIAN Peigen,XIAO Xi,DING Ruoxing,et al. A capacity configuring method of composite energy storage system in autonomous multi-microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2013,37(1):168-173.
- [30] 周恒俊,曹晋彰,郭创新,等. 基于ASOA集群智能微网的信息化管理平台设计[J]. *电力系统自动化*,2010,34(13):66-71.
ZHOU Hengjun,CAO Jinzhang,GUO Chuangxin,et al. An information management platform for smart microgrid cluster based on ASOA[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2010,34(13):66-71.
- [31] 丛伟,苟堂生,肖静,等. 包含多微网的配电系统故障检测算法[J]. *电力自动化设备*,2010,30(7):50-53.
CONG Wei,XUN Tangsheng,XIAO Jing,et al. Faulty section detection algorithm for distribution system with multi-microgrids [J]. *Electric Power Automation Equipment*,2010,30(7):50-53.
- [32] 丁磊. 多微网配电系统的分层孤岛运行及保护控制[D]. 济南:山东大学,2007.
DING Lei. Hierarchical islanding,protection and control of distribution network with multi-microgrids[D]. Ji'nan;Shandong University,2007.
- [33] 肖朝霞,方红伟,张献. 智能微电网研究综述[C]//天津市电机工程学会2009年学术年会论文集. 天津,中国;天津市电机工程学会,2009:103-109.
XIAO Zhaoxia,FANG Hongwei,ZHANG Xian. A research overview of micro-grid[C]//*Proceedings of the 2009 Annual Conference of Tianjin Society of Electrical Engineering*. Tianjin, China:Tianjin Society of Electrical Engineering,2009:103-109.
- [34] TANG J,LIU J,PONCI F,et al. Adaptive load shedding based on combined frequency and voltage stability assessment using synchrophasor measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2013,28(2):2035-2047.
- [35] DONG D,LUO F,ZHANG W,et al. Passive filter topology study of single-phase AC-DC converters for DC nanogrid applications [C]//*Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Fort Worth,TX,United States:IEEE,2011:287-294.
- [36] LU D D,AGELIDIS V G. Photovoltaic battery powered DC bus system for common portable electronic devices[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2009,24(3):849-855.
- [37] LOH P C,LI D,CHAI Y K,et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2013,28(5):2214-2223.
- [38] RADWAN A A A,MOHAMED Y A I. Linear active stabilization of converter-dominated DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*,2012,3(1):203-216.
- [39] ANAND S,FERNANDES B G,GUERRERO J M. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low voltage DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2013,28(4):1900-1913.
- [40] GUERRERO J M,VASQUEZ J C,TEODORESCU R. Hierarchical control of droop-controlled DC and AC microgrids—a general approach towards standardization[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2011,58(1):158-172.
- [41] 卫志农,余爽,孙国强,等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. *电力系统自动化*,2013,37(13):1-9.
WEI Zhinong,YU Shuang,SUN Guoqiang,et al. Concept and development of virtual power plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2013,37(13):1-9.
- [42] VANDOORN T L,ZWAENEPOEL B,DE KOONING J D M,et al. Smart microgrids and virtual power plants in a hierarchical control structure[C]//2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). Manchester,United Kingdom:IEEE,2011:1-7.
- [43] LIN F,POLIS M P,WANG C,et al. Hierarchical control and management of virtual microgrids for vehicle electrification[C]//2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Dearborn,MI,United States:IEEE,2012:1-6.
- [44] KHODAEI A. Provisional microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*,2015,6(3):1107-1115.

- [45] 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):80-82.
ZHANG Jian, AI Qian, WANG Xingang. Applcation of multi-agent system in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 80-82.
- [46] ZHENG G, LI N. Multi-agent based control system for multi-microgrids[C]//2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering (CISE). Wuhan, China: IEEE, 2010: 1-4.
- [47] ZHAO B, ZHANG X, CHEN J. Integrated microgrid laboratory system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2175-2185.

作者简介:



支娜

支娜(1976—),女,陕西西安人,讲师,博士研究生,主要研究方向为微电网控制(E-mail:zhina@xaut.edu.cn);

肖曦(1973—),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为微电网及其储能、电机系统及其控制(E-mail: Xiao_xi@tsinghua.edu.cn);

田培根(1979—),男,湖南临澧人,讲师,博士研究生,主要研究方向为微电网能量管理、储能系统规划和控制(E-mail: Tpg10@mails.tsinghua.edu.cn)。

Research and prospect of multi-microgrid control strategies

ZHI Na¹, XIAO Xi², TIAN Peigen^{2,3}, ZHANG Hui¹

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Institute of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Multi-microgrid system is an interconnected system of microgrids, distributed generations, energy storages and loads, its control is more complicated due to its complex structure, and the reasonable and effective control strategy is the basis of its stable operation. The existing documents of multi-microgrid research on networking modes and coordinative control strategies are overviewed in detail, the networking modes of AC bus structure, AC-DC bus structure and virtual multi-microgrid bus structure are listed, and the strategies of hierarchical control, master-slave control, multi Agent control and peer-to-peer control are compared. Suggestive schemes about the key technologies in the future development and research of multi-microgrid are proposed based on the recent researches.

Key words: multi-microgrid; coordination control; distributed power generation; networking mode; multi Agent systems

(上接第106页 continued from page 106)

scenarios[C]//2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames, IA, USA: IEEE, 2004: 26-31.

- [49] HEITSCH H, RÖMISCH W. Scenario reduction algorithms in stochastic programming[J]. Computational Optimization and Applications, 2003, 24(2-3): 187-206.
- [50] DUPAČOVA J, GRÖWE-KUSKA N, RÖMISCH W. Scenario reduction in stochastic programming[J]. Mathematical programming, 2003, 95(3): 493-511.

作者简介:



夏榆杭

夏榆杭(1986—),男,四川简阳人,博士研究生,研究方向为电力系统调度自动化与电力市场(E-mail: 406602096@qq.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为灵活交流输电与电力市场等。

Review of virtual power plant based on distributed generation

XIA Yuhang, LIU Junyong

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: It is suggested to construct a virtual power plant based on distributed generation for solving the problems brought in by the large-scale integration of distributed energy sources into the distribution network, such as difficult system dispatch, end-user frequency/voltage fluctuation, low energy efficiency, etc. The definition of virtual power plant is compared among different literatures, its key features are summarized, its different distributed generation units are introduced, its multi-source coordination control and optimal dispatch proposed in different literatures, as well as its trading strategy in power market, are sorted, the progress of its current projects is discussed, and its future development is prospected. The difference between virtual power plant and microgrid is introduced.

Key words: distributed power generation; virtual power plant; coordination control; optimal dispatch; power market