

微电网能量管理系统研究综述

吴 雄¹, 王秀丽¹, 刘世民², 祝振鹏², 刘春阳¹, 段 杰¹, 侯 菲¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 北京北变微电网技术有限公司, 北京 100093)

摘要: 随着微电网技术的不断发展, 微电网能量管理系统也逐渐成为研究热点。总结了国内外微电网能量管理系统的研究现状, 分析了微电网能量管理系统的管理对象、基本功能、设计框架; 阐述了微电网能量管理系统集中式控制和分散式控制 2 种控制结构, 并分析了各自的优缺点; 介绍了微电网能量管理的基本模型和算法。最后总结出微电网能量管理中需要解决 3 个问题: 可再生能源和可控负荷的不确定性问题、多储能技术的优化配合和联合调度问题、微电网能量管理系统的通信设计和网络安全问题。

关键词: 微电网; 能量管理; 分布式发电; 可控负荷; 可再生能源; 不确定性; 控制; 储能

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.002

0 引言

随着全球能源、环境问题的凸显, 风能、太阳能等可再生能源得到较大的发展。与此同时, 微电网作为一种包含可再生能源等分布式电源的综合集成技术得到了广泛的关注^[1-2]。微电网具有灵活的运行特性, 可以并网或脱网运行, 能同时满足本地用户的电能和热能需求。微电网提高了分布式发电系统的供电可靠性, 实现了分布式电源与负荷的一体化运行^[3], 减少了系统的污染排放, 已经成为智能电网建设中的一个重要的组成部分。

为了保证微电网高效稳定地运行, 微电网通常由能量管理系统进行智能控制和自动调度决策。微电网能量管理系统是一套具有发电优化调度、负荷管理、实时监测并自动实现微电网同步等功能的能量管理软件^[4-5]。微电网的能量管理包含短期和长期的能量管理^[2,6]。短期的能量管理包括: 为分布式电源提供功率设定值, 使系统满足电能平衡、电压稳定; 为微电网电压和频率的恢复和稳定提供快速的动态响应; 满足用户的电能质量要求; 为微电网的并网提供同步服务。长期的能量管理包括: 以最小化系统网损、运行费用, 最大化可再生能源利用等为目标安排分布式电源的出力; 为系统提供需求侧管理, 包括切负荷和负荷恢复策略; 配置适当的备用容量, 满足系统的供电可靠性要求。

随着微电网工程的不断建立和发展, 与之配套的能量管理系统也逐渐成为一个研究热点。本文从国内外微电网能量管理系统的研究现状出发, 分析

微电网能量管理系统的管理对象、功能结构、组成模块以及核心算法, 并针对当前研究存在的一些技术难点, 给出进一步的研究方向。

1 国内外微电网能量管理系统的研究现状及典型案例分析

国内外已经兴建了不少微电网示范工程和实验基地, 其中大部分微电网示范工程和实验基地配置了相应的能量管理系统^[7]。下面简要介绍国内外微电网的能量管理系统研究现状, 并结合一个典型应用案例对微电网能量管理系统进行剖析。

1.1 北美研究现状

美国电力公司和美国电力可靠性技术协会 CERTS(Consortium for Electric Reliability Technology Solution)在俄亥俄州首府哥伦布建造了 CERTS 微电网示范平台^[8]。该示范平台主要由蓄电池、燃气轮机、可控负荷和敏感负荷组成, 其能量管理采用自治管理方式, 不需要中央控制器统一安排分布式电源的发电; 分布式电源根据下垂特性共享频率或电压, 实现自治管理, 即插即用; 能量管理系统的一些必要控制信息通过以太网传输给分布式电源控制器。

1.2 欧洲研究现状

荷兰的 Bronsbergen 假日公园微电网是欧盟资助的一个微电网示范工程^[9]。该微电网能量管理系统采用集中控制的方式, 微电网中每条馈线的功率由监测系统传送至中央控制器, 中央控制器通过全球移动通信系统(GSM)与调度中心交流; 此外, 中央控制器还负责微电网并网和孤网的无缝切换。德国的 Am Steinweg 微电网由潮流和电能质量管理系统 PoMS(Power flow and power quality Management System)控制^[10]。PoMS 具有配电网管理、分布式电源管理和需求侧管理等功能, 它由一个中央处理器和几个界面控制盒组成; 数据监测系统和控制器通过

收稿日期: 2014-03-04; 修回日期: 2014-08-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA-05A103)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA-05A103)

界面控制盒与中央处理器交流,采用传输控制协议和因特网协议(TCP/IP)进行通信。意大利的 CESI RICERCA DER 微电网示范工程的能量管理采用集中式控制方式;分布式电源和可控负荷与监测控制系统 SCS(Supervision and Control System)相联,采用分层式结构进行信息的交流与传输;SCS 记录和分析运行过程中的数据,监测系统电能质量和暂态过程,优化分布式电源的发电调度,并且向调度控制中心传输实时信息,其指令信息采用 2.4 GHz 的无线频率传输^[11]。希腊雅典国立大学建立的 NTUA 微电网由光伏阵列、风机、蓄电池和可控负荷组成,该微电网的能量管理系统采用多代理系统 MAS(Multi-Agent System)结构,基于 Java 代理发展框架 3.0 平台开发,采用 XML 和 SL 编写^[12]。

1.3 亚洲研究现状

日本的 Kyotango 微电网工程由新能源综合开发机构 NEDO(New Energy and industrial technology Development Organization)建造,该微电网能量管理由基于因特网的中央控制器控制,采用标准的 ISDN 或 ADSL ISP 接入因特网^[13]。中国合肥工业大学所建的微电网实验平台^[14]的能量管理采用 2 层控制的方式,分为中央控制器和局部控制器;中央控制器为分布式电源制定提前 1 h、30 min、15 min 的发电计划;局部控制器负责控制馈线潮流、电压频率、无缝切换、电能质量和控制保护;该能量管理系统遵照 IEC61970 标准执行,由数据采集与监测系统、自动发电控制系统和其他能量应用软件构成。中国浙江电力试验研究院搭建的微电网能量管理采用分层式控制,其主站层负责监测系统运行、管理历史数据、绘制图形、控制运行方式等;其协调层主要负责微电网并网和孤网的状态切换^[15]。

从国内外的微电网能量管理研究情况可以看出,目前微电网的能量管理主要包括发电侧和需求侧的管理。发电侧管理包括分布式电源、储能系统、配网侧的管理,需求侧管理主要为分级负荷的管理。从管理的结构来看,北美微电网采用自治控制,为分散式控制,而亚洲的微电网倾向使用集中控制。在欧洲主要有集中控制和基于代理的控制这 2 种方式。目前集中控制在微电网工程中仍属于主流的能量管理方式,其在顶层决策中采用各种优化算法安排机组出力,而底层控制器则按上层指令控制机组出力。能量管理系统中各种控制器均借助于无线或有线通信进行信息的传输与交流。

下面重点介绍一个典型微电网能量管理系统,对其控制对象、管理结构、主要功能设计进行剖析。

1.4 典型微电网能量管理系统

日本 NEDO 的 Hachinohe 微电网^[16-17]自 2005 年

10 月开始运行。该微电网为 6.6 kV 辐射型配电网结构,连接 3 台 170 kW 的燃气机、1 台 130 kW 的光伏系统、1 台 20 kW 的风电机、1 组 100 kW 的蓄电池。Hachinohe 微电网能量管理采用集中控制方式,通过光纤通信,其中央控制器对各分布式电源和储能系统进行发电调度。为了获得最优的调度方案,该能量管理系统采用长期计划与短期计划相结合的策略,计划制定包括每 30 min 的周运行计划、每 3 min 的日内调度计划、1 s 级的联络线潮流控制和 10 ms 级的频率控制计划。其中,周运行计划基于负荷预测信息,构造出以最小化外网购电和燃料费用为目标的优化问题,采用问题空间搜索和二次规划相结合的算法求解,获得各机组的启停机计划、出力计划以及从外网的购电计划;日内调度计划提前 2 h 计算一次。为了保持长期计划中的全局优化特征,其储能系统的充放电计划延用周运行计划结果,根据最新预测信息采用类似的优化模型和算法修正周计划的计算结果。其联络线潮流控制实时监测联络线的传输功率,并与计划值比较,通过反馈控制吸收功率偏差,将联络线功率波动控制在一定的指标范围内。其频率控制主要针对孤网情况,当微电网处于孤网运行时,需要实时满足功率平衡以维持系统的频率稳定。由于燃气机功率调节速度较慢,采用响应速度快的储能系统实时平抑即时功率波动,以实现频率的控制。

2 微电网能量管理系统的主要管理对象

2.1 分布式电源

微电网中的分布式电源包括燃料电池、微型燃气轮机、柴油发电机、热电联产系统、风电、光伏等。其中,热电联产系统^[18-19]通过燃料电池、微型燃气轮机或其他燃机在发电的同时提供热能,能量利用率超过 80%^[20],在微电网中具有较好的应用前景。不同类型的电源通过整流器和逆变器等电力电子设备将不同频率的电能平滑地转换为相同频率的交流或直流电能。通过控制逆变器可以控制分布式电源的输出,让分布式电源按指定的电压和频率(U/f 控制)或有功和无功(PQ 控制)输出^[21]。这些基于逆变器的控制方式支撑着微电网系统的总体控制策略。分布式电源按可控性分为不可调度机组和可调度机组^[22]。风电、光伏的发电主要取决于自然环境,具有随机性和波动性,属于不可调度机组,其具有一定的可预测性,但目前仍具有较大的预测误差。而燃料机组如微型燃气轮机、燃料电池、柴油机属于可调度机组,微电网能量管理系统需要预测风电、光伏的出力,并根据预测出力、燃料机组油耗、热电需求等制定可调度机组的调度计划。

2.2 储能系统

储能系统在微电网中得到了广泛的应用,适合微电网的储能技术主要有蓄电池、飞轮、超级电容^[23]。蓄电池具有电能容量大、能量密度大、循环寿命短等特点^[24-25],在并网时起削峰填谷和能量调度的作用,在孤网时常作为中心存储单元,维护微电网的频率与电压稳定。飞轮具有较大的能量密度、较高的功率输出和无限的充放电次数^[26],常用来平抑微电网中的瞬时功率波动。超级电容具有功率密度大、循环寿命长、能量密度低等特点^[27],但相对于其他 2 种储能技术具有较高的成本。由于具有较低的惯性,储能系统在微电网中可以平抑可再生能源和负荷的功率波动,维护系统的实时功率平衡,同时能在微电网并网与孤网状态切换时提供瞬时的功率支撑,维持系统稳定。储能系统一般通过逆变器接入微电网,采用 U/f 控制和 PQ 控制,接受微电网能量管理系统的指令来决定工作方式和发电功率。储能系统的管理目标取决于微电网的工作方式。在并网模式下,其主要是确保分布式电源的稳定出力,容量充足时可以起削峰填谷和能量调度的辅助作用;在孤网模式下,储能系统主要是维护系统稳定,减少终端用户的电能波动。

2.3 负荷系统

为了使微电网在紧急情况下仍能运行,微电网的负荷一般分级管理,主要分为关键负荷和可控负荷。关键负荷为需要重点保护电力供应的负荷;而可控负荷在紧急情况下可以适当切除,在正常情况下也可以通过需求侧管理或者需求侧响应达到优化负荷使用、节能省电的目的^[28-29]。比如一栋楼在不影响用户满意度的情况下可以通过调节供热通风与空气调节 HVAC(Heating Ventilation and Air Conditioning)系统或者照明系统来达到节能的目的^[30]。微电网负荷侧的管理是微电网能量管理中的重要部分。随着电动汽车的普及,充电电动汽车 PEV(Plug-in Electric Vehicle)和混合充电电动汽车 PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)在微电网中得到了广泛的应用^[31]。PHEV 和 PEV 既可以随时随地从电网中充电,又可以通过汽车到电网 V2G(Vehicle to Grid)技术向电网输电^[32],具有可控负荷和电源的双重身份,这类负荷的大规模接入将给微电网能量管理系统增加难度。

3 微电网能量管理系统的基本功能和设计框架

3.1 基本功能

微电网能量管理系统具有预测可再生能源机组出力、优化燃料机组发电、安排储能充放电、管理可控负荷、维持系统稳定等功能。图 1 显示了微电网能

量管理系统的几个主要功能。微电网能量管理系统主要有 4 个功能模块^[33-35]:人机交流模块、数据分析模块、预测模块、决策优化模块。一些外部信息如设备信息、天气预报等通过数据接口传递给微电网能量管理系统,同时微电网能量管理系统也通过接口与分布式电源互相交换信息。

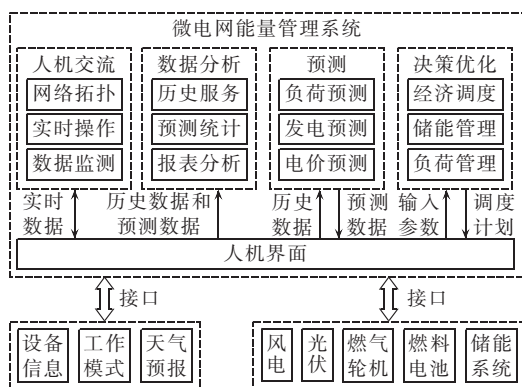


图 1 微电网能量管理系统的功能示意图

Fig.1 Functions of microgrid EMS

人机交流模块主要负责人与能量管理系统的交流,其采用可视化人机接口,并提供一个统一的图形平台^[35-36]。通过人机界面可以查看微电网的拓扑结构和所有电气元件的接入情况,并能实时操作开关与刀闸的状态,控制微电网的工作方式。监测系统采集的电压、电流、有功、无功、温度等实时数据将在图形系统中显示。通过对人机界面的监视,工作人员可以实时了解微电网系统、后台系统和通信系统的运行工况。系统的运行信息将通过文字、图形、声光、颜色等多种方式在人机界面中显示。

数据分析模块将系统采集的实时数据、各种操作日志以及预测数据存储到系统的数据库当中^[36-37]。其历史服务功能按照不同的存储周期和预先设定的存储策略将实时数据写入数据库中,并负责日、月、年统计量的统计工作。报表分析功能将历史数据和预测数据灵活地组织到表格中,形成实时、日、月、年等历史统计报表和预测误差统计报表,可统计最大值、最小值、平均值等,同时具有打印和表格编辑功能。

预测模块是微电网能量管理系统的一个重要模块。为了优化分布式电源的发电调度,需要对未来某段时间内的负荷、可再生能源、市场电价进行预测^[2,6]。根据调度计划的时间尺度不同,通常有短期(1 d 至 1 周)预测和超短期(分钟级或几小时内)预测。短期预测可以采用离线的方式,而超短期预测通常需要在线预测并实时滚动。预测所需要的基础数据主要为系统采集的历史数据,预测结果每隔一定的时间段传送回微电网能量管理系统。

决策优化是微电网能量管理的核心模块。

该优化系统根据负荷和可再生能源的预测值、用户的用电需求、调度规则、市场电价等信息决策分布式电源的发电调度、从电网的购电计划、储能的出力分配、负荷的安排^[5,34]。该决策需要满足一系列约束条件以及控制目标,如满足系统中的热电负荷需求,确保微电网与主网系统间的运行协议,尽可能使能源消耗与系统损耗最小,使分布式电源的运行效率最高。优化决策模块还能提供微电网系统故障情况下孤岛运行和重合闸的逻辑与控制方法等,保障微电网的高效稳定运行。

3.2 设计框架

常用的微电网能量管理系统的基本设计框架如图 2 所示,其主要由硬件层和软件层两方面^[36,38]构成。硬件层包含相关的硬件设备和支撑平台;硬件设备包括服务器、控制设备等;支撑平台层包括公共服务层、数据库层、网络通信层,它支撑着系统的公共服务、数据管理、通信交流。软件层包括操作系统、功能应用软件等。

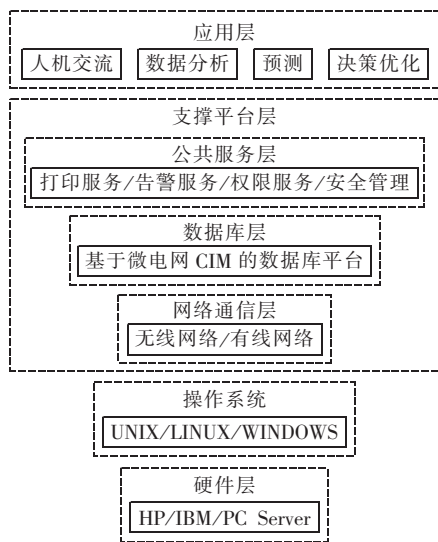


图 2 微电网能量管理系统的设计框架

Fig.2 Design framework of microgrid EMS

4 微电网能量管理系统的控制结构

从微电网能量管理系统的控制结构来看,微电网可以分为集中式控制和分散式控制^[39]。

4.1 集中式控制结构

集中式控制一般由中央控制器和局部控制器构成,其中,中央控制器通过优化计算后向局部控制器发出调度指令,局部控制器执行该指令控制分布式电源的输出。文献[40]给出了一种 3 层结构的典型集中式能量管理系统,其 3 层结构分别为:市场和配电网中心、中央控制器、局部控制器。市场中心负责电力市场和微电网之间的信息交流。配电网中心负责微电网与主网之间的信息交流。中央控制器是

微电网能量管理系统的核心单元,其负责上层系统与底层单元的信息交流。一方面,中央控制器要满足配电网的负荷需求,参与电力市场,监测系统运行,维护系统稳定,处理微电网工作模式的转换;另一方面,中央控制器要根据局部控制器传来的机组信息、市场和配电网中心的信息,在各种机组约束和物理约束条件下,以系统网损最小、利润最大等为控制目标安排分布式电源的功率分配,并将指令传递给局部控制器。

集中式控制的优点^[4,41]是:有明确的分工,较容易执行和维护;具有较低的设备成本,能控制整个系统;目前使用得比较广泛,技术上更加成熟。其缺点是:随着分布式电源的增加,要求中央控制器有较高的计算处理能力,同时对其通信能力也有较高的要求;一旦中心单元故障,整个系统面临瘫痪的风险;分布式电源不能即插即用,不容易拓展应用。这些缺点成为这种模式的发展瓶颈。

4.2 分散式控制结构

分散式控制是微电网能量管理系统的另一种控制方式。分散式控制方式下,微电网中的每个元件都由局部控制器控制,每一个局部控制器监测微源的运行状况,并通过通信网络与其他的局部控制器交流。局部控制器不需要接收中央控制器的控制指令,有自主决定所控微源运行状况的权力。由于局部控制器仅需要与邻近的设备通信交流,其信息传输量比集中式控制要少;其计算量也分担到各个局部控制器当中,降低了中央控制器的工作负担。中央控制器在分散式控制结构中主要负责传递上层系统的负荷和电价信息,以及在紧急事件或故障情况下从系统层面上操控局部控制器。

分散式控制的优点^[41]是:中央控制器的计算量得到了大幅的削减;如果中央控制器故障,系统仍然能够运行;其分散式的控制模式保证了分布式电源即插即用的功能;适用于大规模、复杂的分布式系统。其缺点有:由于局部控制器有较大的自主权,其存在安全方面的隐患,较难及时检测和维修;分布式电源的平滑控制依赖于局部控制器之间的交流,需要设计一种有效的通信拓扑结构;其局部控制器之间的交流可能需要更长的时间达成协议;由于此种控制方式相比传统的主从式控制有较大的通信变革,在实际当中还面临较大的设备投资和复杂的通信要求。这使得这种较有潜力的控制方式仍然需要深入研究。

集中式和分散式控制方式都有中央控制器和局部控制器,只是分散式控制弱化了中央控制器的主导功能,通过强化周边通信,将控制权力分散到局部控制器。中央控制器和局部控制器甚至配电网中心在管理系统中均扮演着一定的角色,多代理系统

这一概念^[42]可以较好地模拟这一特定功能的角色。多代理系统具有较好的灵活性与可扩展性,既可以设计成集中式控制,又可以设计成分散式控制,在微电网的能量管理和控制领域受到了关注。多代理系统的能量管理策略主要有基于市场交易的竞争协调^[43-44]和基于各种智能算法^[45-46]的优化调度。基于市场交易的多代理系统模拟电力市场环境,由各分布式电源代理和负荷代理根据成本和需求进行投标,中央控制代理经过决策确定最后的出力状况。基于智能算法的优化调度类似于传统的集中式控制,其根据各代理申报的情况以特定的目标进行优化计算来确定各微源的发电安排。

5 微电网能量管理的模型与求解算法

5.1 微电网能量管理的模型

微电网能量管理的目标是在满足系统负荷需求和各种物理约束条件的情况下,以最小化分布式电源运行成本、系统网损、停电概率、污染排放等为目标,为分布式电源和储能系统提供功率运行点。由于有多个运行目标,微电网能量管理的控制目标可以描述成多目标函数^[47-48]或者某一方面的单目标函数^[49-51]。

可再生能源的发电基本上没有成本,微电网的调度策略一般是优先利用可再生能源的发电,通过预测系统预测可再生能源和负荷的出力值,在此基础上安排可调度机组和储能系统的出力。可调度机组的约束条件包括发电上下限约束、机组爬坡约束、最小启停时间约束。对于储能系统的建模,常用的模型有电力库模型^[52]、KiBaM 模型^[53],其约束条件一般包括电力容量约束、充放电上下限约束。对于系统约束则包括功率平衡约束、热能平衡约束、系统备用约束、线路潮流限值约束、母线电压限值约束。对于有特殊控制要求的设备可以加入一些额外约束如蓄电池充放电次数约束^[54]。另外,对于有逆变器接口的分布式电源,其有功/频率的下垂特性也常作为约束条件^[55-57]。

5.2 模型的求解算法

多目标优化问题常通过将目标函数加权转化为单目标优化问题^[58],采用单目标优化方法求解。另外也可以采用多目标优化方法求解,如非支配多目标遗传算法等。下面介绍的算法主要是针对单目标优化问题。

不考虑可再生能源的预测误差情况下,微电网能量管理模型属于机组组合问题。目前大部分微电网能量管理模型不考虑系统潮流的约束,采用的求解方法主要有混合整数线性规划方法^[50,59-61]、动态规划方法^[62]、遗传算法^[51,63]、粒子群优化算法^[64-65]、蚁群算

法^[66]等智能算法以及基于规则判断的专家系统^[67-68]等算法。其中混合整数线性规划方法通过将优化模型中的非线性函数转化为线性函数,从而将优化问题转化为混合整数规划问题,采用成熟的专业软件求解,通常具有较高的求解精度和较快的求解速度^[69]。对于考虑潮流约束的模型,一般是在计算过程中加入最优潮流^[70-71]或前推回代法等配电网潮流计算的子程序。由于非线性约束剧增,通常采用遗传算法、粒子群算法等智能算法进行优化求解。

微电网中光伏、风电等可再生分布式电源出力的随机性、间歇性给微电网的短期调度带来挑战。光伏、风电的随机分布特性常用其概率密度分布函数来描述^[72]。一般情况下,光伏出力可认为服从 Beta 分布,风电出力可以通过由服从 Weibull 分布的风速经风机的出力-风速转换函数获得^[73]。负荷一般服从高斯分布。目前考虑可再生能源出力预测误差分布的短期调度方法主要有基于机会约束的随机规划方法^[65,74]、基于抽样技术的场景削减法^[75]、点估计法^[63,76]。其中,场景削减方法利用场景削减技术将众多的情景转化为可数的典型静态场景进行调度分析;点估计法则通过计算多随机变量构成的随机函数值的概率统计量进行分析。

6 微电网能量管理系统的机遇与挑战

目前微电网能量管理主要采用集中式控制,随着技术的成熟,分散式控制将逐渐成为微电网能量管理控制结构的发展方向。分散式控制使得分布式电源能够即插即用,任何分布式电源或储能设备在任何时间都可以连接到微电网中,大幅提高了用电的灵活性。

微电网能量管理系统对微电网的使用便利性和高效性起着重要的作用。由于微电网的特殊性,微电网的能量管理依然面临一系列挑战,主要有以下 3 个方面。

a. 微电网中可再生能源如风电、光伏出力受自然环境的影响,具有间歇性、波动性和可预测性差等特点。微电网能量管理系统的设计当中需要考虑这些随机因素的影响。

另一方面,随着可控负荷形式的增多,可控负荷如 PEV 可以随时随地连接到微电网中,这增加了微电网负荷侧时间和空间上的不确定性。微电网能量管理系统在需求侧的管理中需充分考虑到这些不确定性因素。

b. 各种储能技术各具优缺点,单一的储能技术很难在技术性和经济性上满足要求,常常需要多种储能技术的配合才能达到效果。多种储能技术的优化配合以及多储能系统的联合调度将成为微电网能量

管理的一个难点。

c. 可靠且兼容的通信网络是微电网能量管理系统的基础。通信可能会存在的延时、超时失败等问题,将影响微电网能量管理系统的执行。另一方面,微电网的通信主要是通过无线网络传输,而无线网络的共享和易接近等特点,使得其存在安全隐患。因此微电网能量管理系统的通信网络建设和通信安全也是一个值得研究的问题。

7 结语

微电网的能量管理是微电网技术中一个重要的研究内容。随着微电网的不断发展和规模的扩大,微电网的能量管理将面临控制结构、优化算法、通信设计等一系列需要解决的问题。本文总结了国内外微电网能量管理的研究现状,从微电网能量管理系统的管理对象、基本功能、设计框架、控制结构等方面全面介绍了微电网能量管理系统的软硬件的构成和主要功能。此外,针对当前微电网能量管理的理论研究给出了微电网能量管理的基本模型和优化算法,对现在研究工作存在的问题和难点进行了概括,指出了进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [2] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIARGYRIOU N, et al. Microgrids management[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.
- [3] 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 evaluation of new distribution system with microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 1-6.
- [4] SU W, WANG J. Energy management systems in microgrid operations[J]. The Electricity Journal, 2012, 25(8): 45-60.
- [5] JIMENO J, ANDUAGA J, OYARZABAL J, et al. Architecture of a microgrid energy management system[J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21(2): 1142-1158.
- [6] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [7] LIDULA N W A, RAJAPAKSE A D. Microgrids research: a review of experimental microgrids and test systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 186-202.
- [8] LASSETER R H, ETO J H, SCHENKMAN B, et al. CERTS microgrid laboratory test bed[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 325-332.
- [9] BRONSBERGEN C S. The first microgrid in The Netherlands [EB/OL]. [2013-10-11]. <http://www.leonardo-energy.org/first-micro-grid-netherlands-bronsbergen>.
- [10] The residential micro grid of Am Steinweg in Stutensee, Germany [EB/OL]. [2013-11-08]. <http://www.leonardo-energy.org>.
- [11] MONETA D, MARCIANDI M, TORNELLI C, et al. Voltage optimization of a LV microgrid with DERs; field test[C]//CIRED 2009. Prague, Czech Republic: Institution of Engineering and Technology, 2009: 1-4.
- [12] BARNES M, DIMEAS A, ENGLER A, et al. MicroGrid laboratory facilities[C]//2005 International Conference on Future Power Systems. Amsterdam, The Netherlands: IEEE Computer Society, 2005: 1-6.
- [13] MOROZUMI S, NAKAMA H, INOUE N. Demonstration projects for grid-connection issues in Japan[J]. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 2008, 125(12): 426-431.
- [14] MAO M, DING M, SUN J, et al. Testbed for microgrid with multi-energy generators[C]//CCECE 2008. Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, 2008: 637-640.
- [15] ZHAO B, ZHANG X, CHEN J. Integrated microgrid laboratory system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2175-2185.
- [16] HARA R, KITA H, TANABE T, et al. Testing the technologies[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2009, 7(3): 77-85.
- [17] KOJIMA Y, KOSHIO M, NAKAMURA S, et al. A demonstration project in Hachinohe: microgrid with private distribution line[C]//IEEE International Conference on System of Systems Engineering 2007. San Antonio, TX, USA: IEEE, 2007: 1-6.
- [18] HEEJIN C, LUCK R, CHAMRA L M. Dynamic simulation of a micro-CHP facility: a case study[C]//Proceedings of ES 2008. Long Beach, CA, United States: American Society of Mechanical Engineers, 2007: 247-254.
- [19] HOUWING M, AJAH A N, HEIJNEN P W, et al. Uncertainties in the design and operation of distributed energy resources: the case of micro-CHP systems[J]. Energy, 2008, 33(10): 1518-1536.
- [20] AL-MANSOUR F, KOZUH M. Risk analysis for CHP decision making within the conditions of an open electricity market[J]. Energy, 2007, 32(10): 1905-1916.
- [21] 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.
- [22] COSTER E J, MYRZIK J M A, KRUIER B, et al. Integration issues of distributed generation in distribution grids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 28-39.
- [23] TAN X, LI Q, WANG H. Advances and trends of energy storage technology in microgrid[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 44(1): 179-191.
- [24] MCDOWALL J. Conventional battery technologies—present and future[C]//Proceedings of IEEE PESS 2000. Seattle, WA, USA: IEEE, 2000: 1538-1540.
- [25] RIBEIRO P F, JOHNSON B K, CROW M L, et al. Energy storage systems for advanced power applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(12): 1744-1756.
- [26] VAZQUEZ S, LUKIC S M, GALVAN E, et al. Energy storage systems for transport and grid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 3881-3895.
- [27] ABBEY C, JOOS G. Supercapacitor energy storage for wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 769-776.
- [28] KIRSCHEN D S. Demand-side view of electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 520-527.
- [29] HOUWING M, NEGENBORN R R, de SCHUTTER B. Demand response with micro-CHP systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 200-213.

- [30] DOUNIS A I, CARAISCOS C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6-7): 1246-1261.
- [31] DARABI Z, FERDOWSI M. Aggregated impact of plug-in hybrid electric vehicles on electricity demand profile[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2011, 2(4): 501-508.
- [32] GALUS M D, ZIMA M, ANDERSSON G. On integration of plug-in hybrid electric vehicles into existing power system structures[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(11): 6736-6745.
- [33] RYAN F, CHRIS M. Energy manager design for microgrids[EB/OL]. [2013-11-12]. <http://www.ostigov/bridge/purlcover.jsp?purl=/838178-Q7TmnO/native/838178.pdf>.
- [34] KUECK J D, STAUNTON R H, LABINOV S D, et al. Microgrid energy management system[EB/OL]. [2013-12-27]. <http://www.ornl.gov/sci/ees/etsd/pes/pubs/ORNLTm2002242rev.pdf>.
- [35] 茆美琴, 丁明, 张榴晨, 等. 多能源发电微网实验平台及其能量管理信息集成[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(1): 106-111. MAO Meiqin, DING Ming, ZHANG Liuchen, et al. Testbed and information integration of EMS for a microgrid with multi-energy generation systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(1): 106-111.
- [36] 丁明, 杨为, 张颖媛, 等. 基于 IEC61970 标准的微网 EMS 平台设计[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(10): 16-20. DING Ming, YANG Wei, ZHANG Yingyuan, et al. IEC61970 based microgrid energy management system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(10): 16-20.
- [37] 丁明, 解添, 毕锐. 微网实时数据库系统研究[J]. *电网技术*, 2010, 34(11): 31-37. DING Ming, XIE Tian, BI Rui. Research on real-time database system for microgrid[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(11): 31-37.
- [38] 李洋, 刘海涛, 吴鸣, 等. 微电网能量管理系统开发与应用[J]. *华东电力*, 2013, 41(5): 1071-1074. LI Yang, LIU Haitao, WU Ming, et al. Development and application of microgrid energy management system[J]. *East China Electric Power*, 2013, 41(5): 1071-1074.
- [39] GUERRERO J M, CHANDORKAR M, LEE T-L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids part I: decentralized and hierarchical control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1254-1262.
- [40] BARNES M, VENTAKARAMANAN G, KONDOH J, et al. Real-world microgrids—an overview[C]//IEEE International Conference on System of Systems Engineering 2007. San Antonio, TX, United States: IEEE Computer Society, 2007: 1-8.
- [41] OLIVARES D E, CANIZARES C A, KAZERANI M. A centralized optimal energy management system for microgrids[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [42] LOGENTHIRAN T, SRINIVASAN D, KHAMBADKONE A M, et al. Multi-Agent System(MAS) for short-term generation scheduling of a microgrid[C]//IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies 2010. Kandy, Sri Lanka: IEEE Computer Society, 2010: 1-6.
- [43] DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. Operation of a multi-agent system for microgrid control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(3): 1447-1455.
- [44] KUMAR NUNNA H S V S, DOOLLA S. Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1678-1687.
- [45] LOGENTHIRAN T, SRINIVASAN D, KHAMBADKONE A M, et al. Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(2): 925-933.
- [46] COLSON C M, NEHRIR M H. Algorithms for distributed decision-making for multi-agent microgrid power management[C]//2007 IEEE PES General Meeting. Detroit, MI, United States: IEEE Computer Society, 2011: 1-6.
- [47] CHAOUACHI A, KAMEL R M, ANDOULSI R, et al. Multi-objective intelligent energy management for a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1688-1699.
- [48] MOHAMED F A, KOIVO H N. System modelling and online optimal management of MicroGrid using multiobjective optimization[C]//International Conference on Clean Electrical Power. Capri, Italy: IEEE, 2007: 148-153.
- [49] HAWKES A D, LEACH M A. Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7-8): 1253-1265.
- [50] MORAIS H, KADAR P, FARIA P, et al. Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(1): 151-156.
- [51] MOHAMED F A, KOIVO H N. Online management genetic algorithms of microgrid for residential application[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 6(1): 562-568.
- [52] ROSS M, HIDALGO R, ABBEY C, et al. Energy storage system scheduling for an isolated microgrid[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2011, 5(2): 117-123.
- [53] MANWELL J F, MCGOWAN J G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems[J]. *Solar Energy*, 1993, 50(5): 399-405.
- [54] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(4): 7-14. DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(4): 7-14.
- [55] AHN S-J, NAM S-R, CHOI J-H, et al. Power scheduling of distributed generators for economic and stable operation of a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(1): 398-405.
- [56] DIVSHALI P H, HOSSEINIAN S H, ABEDI M. A novel multi-stage fuel cost minimization in a VSC-based microgrid considering stability, frequency, and voltage constraints[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 931-939.
- [57] HERNANDEZ-ARAMBURO C A, GREEN T C, MUGNIOT N. Fuel consumption minimization of a microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(3): 673-681.
- [58] BASU A K, BHATTACHARYA A, CHOWDHURY S, et al. Planned scheduling for economic power sharing in a CHP-based microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(1): 30-38.
- [59] HANDSCHIN E, NEISE F, NEUMANN H, et al. Optimal operation of dispersed generation under uncertainty using mathematical programming[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2006, 28(9 SPEC. ISS.): 618-626.
- [60] HAWKES A D, LEACH M A. Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7-8): 1253-1265.
- [61] REN H, GAO W. A MILP model for integrated plan and evaluation

- luation of distributed energy systems[J]. Applied Energy,2010, 87(3):1001-1014.
- [62] NGUYEN M Y,YOON Y T,CHOI N H. Dynamic programming formulation of micro-grid operation with heat and electricity constraints[C]//IEEE T & D Asia 2009. Seoul,Korea:IEEE Computer Society,2009:1-4.
- [63] ARABALI A,CHOFRANI M,ETEZADI-AMOLI M,et al. Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(1): 162-170.
- [64] WANG L,SINGH C. Stochastic combined heat and power dispatch based on multi-objective particle swarm optimization[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2008,30(3):226-234.
- [65] WU Z,GU W,WANG R,et al. Economic optimal schedule of CHP microgrid system using chance constrained programming and particle swarm optimization[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit,MI,United States: IEEE Computer Society,2011:1-11.
- [66] 艾欣,崔明勇,雷之力. 基于混沌蚁群算法的微网环保经济调度[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2009,36(5):1-6.
- AI Xin,CUI Mingyong,LEI Zhili. Environmental and economic dispatch of Microgrid using chaotic ant swarm algorithms[J]. Journal of North China Electric Power University:Natural Science Edition,2009,36(5):1-6.
- [67] VRETTOS E I,PAPATHANASSIOU S A. Operating policy and optimal sizing of a high penetration RES-BESS system for small isolated grids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2011,26(3):744-756.
- [68] BELVEDERE B,BIANCHI M,BORGHETTI A,et al. A micro-controller-based power management system for standalone microgrids with hybrid power supply[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2012,3(3):422-431.
- [69] 吴雄,王秀丽,王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):1-7.
- WU Xiong,WANG Xiuli,WANG Jianxue,et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer programming[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(28):1-7.
- [70] CHEN S X,GOOI H B. Jump and shift method for multi-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(10):4538-4548.
- [71] CONTI S,NICOLOSI R,RIZZO S A,et al. Optimal dispatching of distributed generators and storage systems for MV islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(3):1243-1251.
- [72] KAI Zou,AGALGAONKAR A P,MUTTAQI K M,et al. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2012,3(1):112-123.
- [73] KARKI R,HU P,BILLINTON R. A simplified wind power generation model for reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2006,21(2):533-540.
- [74] 王锐,顾伟,吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化,2011,35(8):22-27.
- WANG Rui,GU Wei,WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(8):22-27.
- [75] 徐立中,杨光亚,许昭,等. 考虑风电随机性的微网热电联合调度[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):53-60.
- XU Lizhong,YANG Guangya,XU Zhao,et al. Combined scheduling of electricity and heat in a microgrid with volatile wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(9): 53-60.
- [76] NIKNAM T,GOLESTANEH F,MALEKPOUR A. Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm[J]. Energy,2012,43(1):427-437.

作者简介:



吴雄

吴雄(1986—),男,湖南娄底人,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行和规划(E-mail: wuxiong432@126.com);

王秀丽(1961—),女,山西河曲人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划和电力市场(E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn);

刘世民(1973—),男,河北枣强人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统及其自动化、微电网控制系统(E-mail: shiminliua@163.com)。

Summary of research on microgrid energy management system

WU Xiong¹,WANG Xiuli¹,LIU Shimin²,ZHU Zhenpeng²,LIU Chunyang¹,DUAN Jie¹,HOU Fei¹

(1. School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China;

2. BBHT-Beijing Beibian Micro grid Technology Company,Beijing 100093,China)

Abstract: The microgrid EMS(Energy Management System) is gradually becoming a research focus along with the continuous development of microgrid technology. Its domestic and foreign research status is summarized,its management objects,basic functions and design framework are analyzed. Two control structures of EMS,centralized and distributed,are elaborated and their advantages and disadvantages are analyzed. The basic model and algorithm of microgrid energy management are introduced. It is concluded that,three problems of microgrid energy management should be solved;the uncertainty of renewable energy resources and controllable loads,the optimal corporation of multiple energy storage technologies and joint dispatch,and the communication design and network security of microgrid EMS.

Key words: microgrid; energy management; distributed power generation; controllable load; renewable energy resources; uncertainty; control; energy storage