

编者按语:

微电网能灵活控制分布式电源的特性,为开发利用我国种类丰富、储量可观的可再生能源资源提供了一种有效途径,有利于推动节能减排进程、提高电源结构低碳化程度、促进智能化绿色电力的发展。电力工作者为加快微电网的工程实践,在其分析建模、运行优化、控制策略、储能技术及装置、保护技术等方面做了较广泛的研究。微电网中元件、设备类型复杂,运行特性不同,给系统建模、协调控制、综合保护等带来困难。为实现微电网稳定可靠、经济高效运行,需要在优化规划可再生能源组合,快速发展电力技术,合理建立系统分析模型,确定适宜的运行模式及切换方式,合理制定运行调度策略,研究新型设备及多种设备的综合控制方法,发展与微电网特征相适应的保护技术等方面进一步深入研究。欢迎就微电网理论、技术的研究及应用成果投稿本刊,参加讨论。

微电网技术在主动配电网中的应用

李 鹏¹, 窦鹏冲¹, 李雨薇¹, 周逢权², 汪海蛟³

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 国家电网许继集团, 北京 100085; 3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 将诸多种类分布式电源、储能装置以微电网形式接入配电网中并网运行,形成其与配电网、负荷之间能量与信息双向互动的多元互补智能发配用电网络,实现配电网对分布式能源的主动控制与管理,是智能电网中主动配电网的发展趋势和最佳运营模式。以主动配电网和微电网群为研究对象,对微电网接入主动配电网后的网架结构、规划设计、控制方案、运行模式、综合效益等问题进行了阐述,分析了应用微电网技术为主动配电网带来的优势,并给出了微电网技术在主动配电网中应用所需开展的研究方向。

关键词: 智能电网; 主动配电网; 微电网; 微电网群; 新能源; 可再生能源; 分布式发电; 柔性就地消纳

中图分类号: TM 727 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.002

0 引言

近年来,在能源枯竭和环境保护的双重压力下,微电网因其因地制宜利用新能源发电,具有成本低、污染小、运行模式灵活等特点以及抵御自然灾害和保障电力安全的优势而成为世界电气领域关注的热点之一。随着我国雾霾问题加剧,智能电网列入中美应对气候变化 5 个合作领域实施计划,借势智能电网国家政策,微电网与主动配电网及其示范工程建设受到高度重视。到 2015 年,我国将建成 30 个以智能电网、物联网和储能技术为支撑的新能源微电网示范工程。依托国家“863 计划”重大项目“主动配电网关键技术研究及示范”和“主动配电网的间歇式能源消纳与优化技术研究与应用”,我国北京、广东、福建、贵州等地启动了主动配电网示范工程建设。微电网是由分布式电源、储能系统、能量转换装置、监控和保护装置、负荷等汇集而成的小型发、配、用电系统。微电网技术为新能源及可再生能源分布式并网发电及其规模化消纳利用提供了灵活有序的可行技术

途径^[1-3]。微电网有效整合各种分布式间歇性新能源发电后,可作为智能子系统接入主动配电网,增强主动配电网的互动性、可控性和可靠性,进而提升电力系统的综合能效。

在智能电网建设框架下,配电网智能化发展将实现由被动配电网向主动配电网的转变,即无源网络向有源网络的转变^[4]。微电网将分散性的多种分布式电源优化配置整合后,集中单点接入主动配电网将显著增强配电网与用户的能量互动性、信息互动性。另外,接入主动配电网的不同微电网之间互补协调运行,有效弥补分布式电源的分散性、随机性、间歇性、波动性,保障分散的用户安全、经济、优质用电,提高电网对分布式能源的消纳能力^[5]。主动配电网中微电网技术的应用为实现高渗透率间歇式分布式电源并网发电规模化应用、源-网-荷的互动协调、配用电智能化管理等配电网的升级换代提供了新的发展方向^[6]。研究主动配电网中多元互补微电网的规划运行与控制关键技术可充分提高配电网消纳可再生能源的能力和供电可靠性,提升定制电力服务质量和能源利用效率,合理利用资源,促进智能电网和新能源发电的健康发展,保障国家能源安全和社会可持续发电。本文重点分析微电网接入的主动配电网网架结构、规划设计、控制方案、运行模式、综合效益等问题,研究微电网技术的应用对主动配电

收稿日期:2014-08-09;修回日期:2015-03-16

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015-AA050104);国家自然科学基金资助项目(50977029)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015-AA050104) and the National Natural Science Foundation of China(50977029)

网的积极作用,并给出了微电网技术在主动配电网中应用所需开展的研究方向。

1 微电网接入主动配电网的结构

主动配电网的关键技术研究得到了国内外的广泛关注,国际大电网会议(CIGRE)配电与分布式发电专委会明确提出了主动配电网的概念,即:通过使用灵活的网络拓扑结构来管理潮流,以便对局部的分布式能源进行主动控制和主动管理的配电系统^[7]。目前美国、欧盟、日本等已经开展了具有创新性的主动配电网项目,建设了主动配电网示范工程。我国近年来也开展了主动配电网的研究和示范工程建设。将分布式发电供能系统以微电网的形式接入主动配电网并网运行,通过主动配电网与大电网并联运行,并与大电网互为支撑,最有效地发挥分布式发电供能系统效能。微电网可以通过单点接入主动配电网,多个微电网与主动配电网形成联合运行系统,减小分布式电源直接接入配电网而产生的不利影响,提升电能质量水平,并且可以提高分布式电源的利用效率。

为提高主动配电网对分布式电源的消纳能力,增强与用户之间互动性,应用微电网技术的主动配电网需要具备新的特征^[8-9],主要包括:含不同种类分布式电源和储能的微电网广义负荷;结合微电网系统主动管理各类负荷,主动协调控制具有不同发电特性的分布式电源,保障优质冷热电联供;具备适应主动配电网与微电网特点的能量管理系统(EMS),结合发电预测、负荷预测、需求分析、综合效益分析、电能计量等信息优化资源配置和运行状态,进行发电、配电、用电协同管理,实现优化运行。

图 1 为微电网接入的主动配电网结构图。这一结构形成了独立电源模式、微电网模式、微电网之间

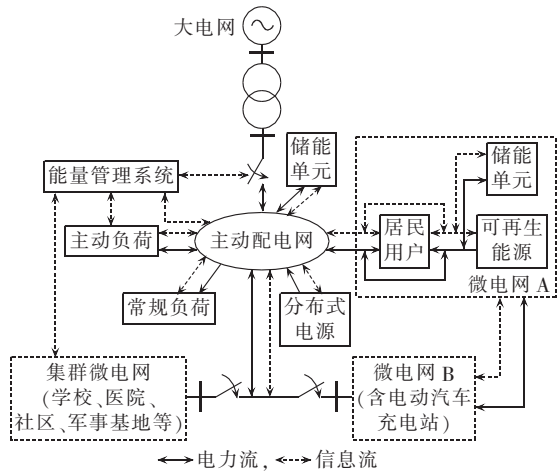


图 1 微电网接入的主动配电网结构图
Fig.1 Structure of active distribution network with microgrid cluster

互联互通模式等多种运行模式共存的主动配电网,能量管理系统统一调度控制,分布式电源与主动配电网之间、微电网与主动配电网之间、微电网与微电网之间互为支撑,能量双向流动,信息互动交流,能够保障高质稳定供电,显著提高电网的经济性和可靠性。

2 微电网接入主动配电网的规划设计

目前,关于微电网接入的主动配电网规划以及其中的微电网群规划还鲜有研究。传统配电网的规划设计方法已不再适用于分布式电源和微电网接入的主动配电网^[10-11]。如何在传统微电网规划的基础上,合理科学地进行主动配电网与微电网规划基础理论和关键技术研究是一个新的研究方向。主动配电网作为有源网络会出现潮流分布、电压调整、无功优化、继电保护、可靠性、效益评估等综合性复杂问题,为有效解决这一问题,并充分发挥主动配电网侧重分布式电源接入和微电网侧重就地消纳新能源的双重优势,需进行主动配电网及微电网网架和微电网中分布式电源的双层综合规划^[12-14],并结合工程设计具体要求和指标进行方案的优化选择。

图 2 为微电网接入的主动配电网网源双层规划应考虑的因素和指标。由于分布式电源、储能和负荷以微电网的形式接入,主动配电网规划设计应计及配电网与微电网双层因素指标。微电网接入位置选择及其接入点功率交互约束等应纳入主动配电网规划设计考虑因素范围。另外,接入主动配电网的微电网中分布式电源种类较多,电动汽车充电站数量大,且具有较强的随机性,功率波动性较大、可控性较低,同时不同种类负荷特性各异,其预测难度加大,发电预测、负荷预测、分布式电源和储能的选型及其容量配置、电力市场机制调节等也应纳入主动配电网

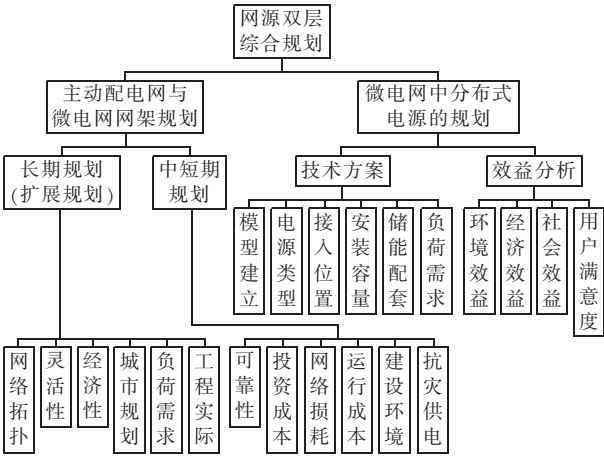


图 2 网源双层综合规划计及指标
Fig.2 Relevant indicators of dual-layer comprehensive planning for network and sources

网规划设计考虑因素范围。通过合理地规划设计和制定主动配电网与微电网之间、微电网与微电网之间、分布式电源与储能装置之间功率的灵活调控策略,充分发挥微电网接入主动配电网的优势。另外,变电站定容和电力电子设备、固态变压器、固态断路器等设备选型需要制定新标准。接入主动配电网的微电网布局也是规划设计的重要内容,图 3 为 6 个微电网系统分别单点接入主动配电网的布局示意图,也可以根据实际工程情况选择其他布局划分方式,如微电网系统 2 和 3、3 和 4 分别合并后单点接入主动配电网,需符合网架结构灵活、可靠优质供电、节能降损、经济优化运行等规划设计要求。

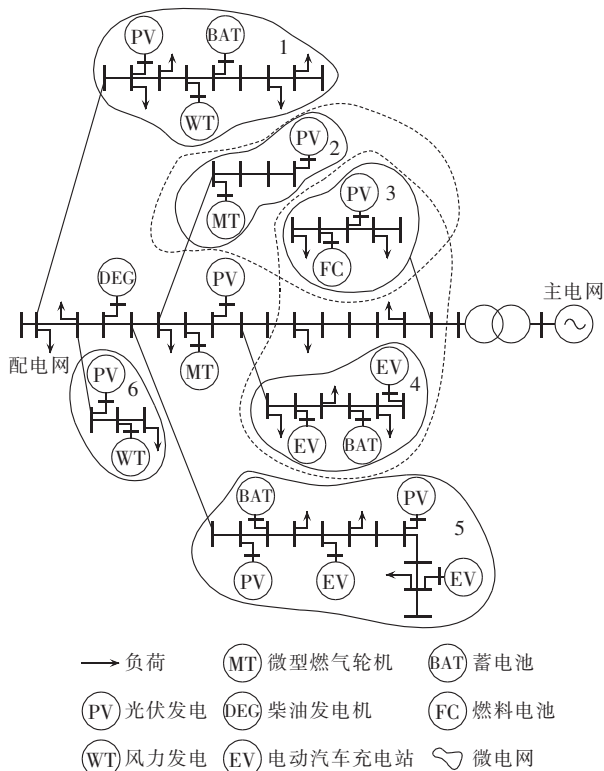


图 3 微电网布局划分规划示意图
Fig.3 Schematic diagram of microgrid partition planning

微电网接入后,主动配电网成为了互动性很强的智能网络,其中潮流分布多向性、电压分布多样性等因素使规划问题成为了多层次、多约束、多模式、多指标的非线性复杂优化设计问题。为此需从以下几方面开展微电网接入后主动配电网规划设计研究:①计及分布式电源不确定性及不同种类分布式电源的互补性;②考虑含微电网的主动配电网的多层次网架结构和潮流的特点;③计及电气运行指标、经济效益指标和环保指标等多目标的微电网选址定容和优化配置;④为提高抗灾能力的微电网应急供电方案规划设计;⑤大量电动汽车充电站以微电网形式接入主动配电网的规划问题;⑥充分考虑城市

建设规划的主动配电网及微电网规划问题等。总之,需要研究多目标、多约束、非线性的含微电网的主动配电网动态规划新方法。

3 微电网接入主动配电网的控制方案

越来越多的微电网接入主动配电网将改变配电网的结构,另外,微电网的分布式特性越来越明显,渗透率越来越高,在较大的地理区域内,如何有效协调控制微电网群稳定、可靠运行,保证整个系统的能量动态平衡和提高电能质量水平亟待研究,主动配电网中微电网群的控制框架和控制方案作为研究难点之一。

鉴于此,本文给出了如图 4 所示的 3 种主动配

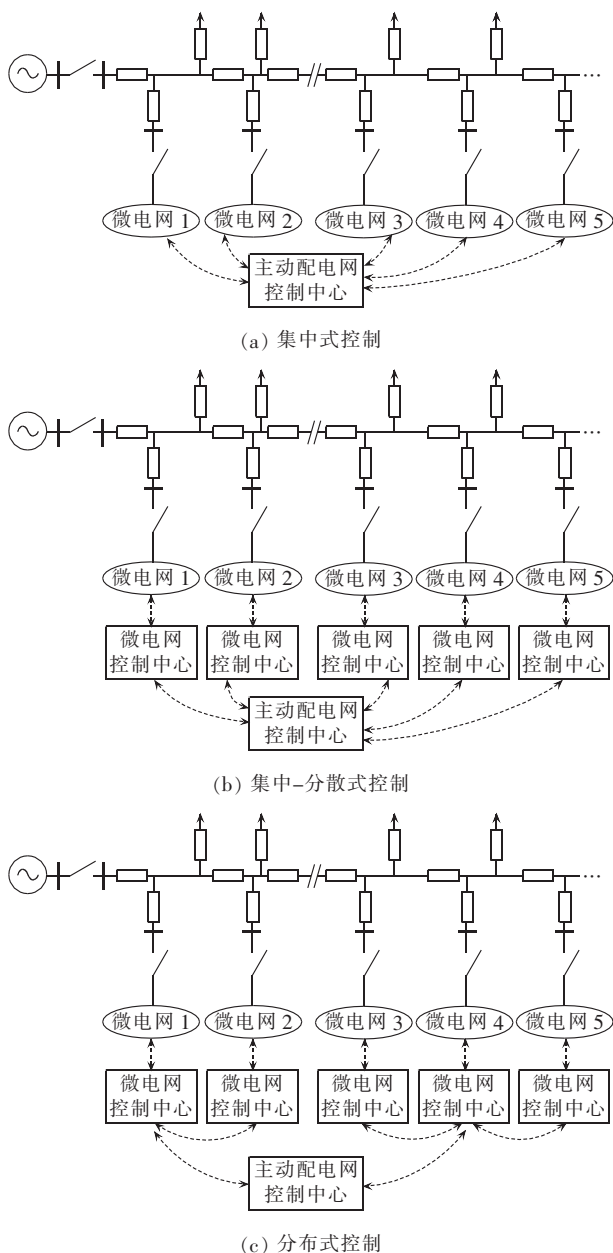


图 4 3 种不同的控制结构
Fig.4 Three control structures

电网中微电网群的控制方案,包括集中式控制、集中-分散式控制、分布式控制,为微电网群的协调控制研究提供了技术路线。

集中式控制中,主动配电网控制中心直接掌握各微电网的完整信息,并制定微电网群的发电计划,控制微电网群的能量输出,主动配电网控制中心享有全部控制权,并采取灵活多变的控制手段,实现群集的优化调度和协调控制。但是巨大的数据信息量、运算量、通信流量对控制中心提出了更高的要求,其兼容性和扩展性不易实现。

集中-分散式控制中,控制结构分为2层控制中心控制,即微电网控制中心和主动配电网控制中心。各微电网控制中心分散控制微电网子系统,并分别将微电网运行状态信息反馈给主动配电网控制中心,主动配电网控制中心整合信息后,将任务分解并分配给各微电网控制中心,各微电网控制中心负责制定风光发电预测、负荷预测,对可控电源和主动负荷进行调控。这样一部分控制功能下移到分散的微电网控制中心,有利于改善集中式控制的数据拥堵,具有较好的实时性和扩展性。

分布式控制中,各区域微电网群之间通过主动配电网控制中心进行调控,各区域微电网群中分散的微电网控制中心只需其本地和相邻微电网控制中心的信息,不依赖于采集微电网群全局信息的主动配电网控制中心,控制更加灵活,效率更高,同时对微电网控制中心提出了更高的要求。由于在该结构下,微电网控制中心之间协同运行,各微电网控制中心制定发电方案经过若干次迭代的通信和决策过程可以最终确定。各微电网控制中心的故障不会对整个分布式控制系统产生较大影响,控制系统可靠性较高。

4 微电网技术在主动配电网中应用的优势及综合效益分析

大量的分布式电源逐步接入配电网,配电网运营管理与控制模式将发生质的变化。分布式电源的随机性、波动性带来诸多新问题,例如:潮流的随机变化、电压无功控制复杂化、谐波污染、保护误动等,给配电网电能质量和供电可靠性带来不利影响^[15-17]。如何更好地提高主动配电网对分布式电源的接纳能力和主动管理控制水平^[18],并兼顾用户的优质可靠、分时经济用电要求,成为研究的重点和方向。微电网技术整合各种分布式电源、储能装置、负荷等,使其作为灵活的智能可控单元单点接入主动配电网^[19],增强主动配电网的鲁棒性,有效解决主动配电网中的新问题,具有诸多优势。

a. 提高主动配电网对分布式能源的利用效率。

微电网技术通过整合不同种类的分布式电源的不同特点可解决其扩展和兼容问题,使得微电网相对于主动配电网而言,成为功率双向流动的可控区或节点,实现分布式能源的柔性就地消纳。微电网中功率可调节的分布式电源,如应急供电柴油发电机组、热电联产微型燃气轮机等可随时启停,光伏发电和风力发电一般为最大功率点跟踪(MPPT)发电状态,微电网系统内部的可控电源、不可控电源与储能装置互补协调,在保障用户可靠用电的基础上,通过微电网能量管理系统^[20-21],多余电能可通过主动配电网输送给大电网,或输送至其他负荷、储能装置或其他微电网系统,以期实现充分利用。可见,微电网技术大幅提高了主动配电网对常规能源和新能源的利用效率。

b. 改善主动配电网电压质量和稳定性。

主动配电网中大量分布式电源、各类储能装置和主动负荷的集群接入,将引起电压分布的复杂变化。由于配电网的电抗与电阻值较为接近,分布式电源的有功功率与无功功率均对电压产生影响。分布式电源的分散性、随机波动性影响电压的稳定性,其接入和退出过程也将使电压质量受到影响,因此,主动配电网需要快速电压支撑^[22-23]。微电网技术为分布式电源等并网运行提供良好的特性支持,分布式电源以微电网形式并入主动配电网是解决配电网电压问题的有效途径。微电网中的电压协调控制方法实现了分布式电源、储能装置与无功补偿装置的协调控制,从而使微电网与主动配电网接口处的电压可控性强,可作为主动配电网中的关键电压调整节点,微电网的平滑切换技术也有效削弱了分布式电源直接接入配电网带来的不利影响,改善了主动配电网的电压质量和稳定性^[24]。

c. 为主动配电网中谐波治理和无功补偿提供技术支撑。

分布式电源通过并网逆变器及电力电子装置并网发电,其中包括AC/DC、DC/DC、DC/AC双向变流器,并采用PWM控制,其产生的谐波电流将造成配电网严重的谐波污染。另外,电动汽车等非线性负荷的大量增加和功率变流器的广泛应用也带来了谐波问题和广义无功问题。为有效减小谐波污染,为用户负荷提供定制电力服务,微电网就地多样化服务于负荷的优势将得到充分发挥。利用微电网中定制电力技术的关键设备(如有源滤波器APF、动态无功发生器STATCOM等)和微电网的柔性并网运行控制技术,进行谐波和无功的综合治理,从而为主动配电网中谐波治理和无功补偿提供技术支撑。

d. 有效降低主动配电网的网损。

分布式发电与微电网就地为负荷供电,避免了

长距离输电产生的较大网损。随着分布式电源、各类储能装置以及主动负荷的大量接入,配电网由无源网络转变为交直流混合有源网络,将改变配电网的潮流分布^[25],其位置与容量均对配电网网损产生影响,如果不对分布式电源、各类储能装置加以合理布局,就不利于对配电网潮流进行优化调控,无法达到降低网损的目的。微电网技术将分布式电源、储能装置、负荷合理规划布局整合后单点接入主动配电网,主动配电网直接调控并网点功率,实现功率的灵活调控。通过微电网优化运行技术,以降低网损为目标,可得到微电网的优化运行策略,进而协调控制分布式电源和储能装置等,达到潮流优化调控的目的,实现分布式能源的柔性就地消纳,避免功率在网络中的不合理流动,有效降低网损。总之,通过微电网技术改善主动配电网集群式接纳分布式电源的方式,提高分布式电源利用率的同时,显著降低主动配电网的网损,提高主动配电网的经济效益水平。

e. 提高主动配电网可靠性和故障恢复能力。

大量不可控的分布式电源并网对配电网的可靠性产生深刻影响^[26],用户的可靠优质用电受到挑战,由于功率的双向流动增强了潮流分布的不确定性,也给常规继电保护带来了较大影响^[27],引起常规继电保护装置的误动。为提高主动配电网的可靠性,分布式电源以微电网形式整合后并网成为发展趋势。正常情况下,微电网并网运行与主动配电网共同满足用户需求,故障发生时,微电网迅速切换为孤岛运行,保证分布式电源不间断为用户供电。另外,通过灵活控制电力电子固态开关等可实现配电网网络重构和负荷转移,使得微电网群之间保持功率和信息的联系,可避免电网检修和电网故障导致的大量电源离网或大面积断电。通过微电网技术的应用和电力电子设备的灵活控制,显著提高配电网的供电可靠性。随着分布式电源渗透率和并网容量的不断提高,具备“黑启动”功能将是微电网的一项特色功能。当电网遭遇自然灾害、恐怖袭击等突发事件时^[28],微电网可保证重要负荷不间断供电,同时为主动配电网快速恢复供电提供技术支撑。

f. 降低主动配电网运营管理与控制的难度。

由于一些类型的分布式电源可控程度较低且位置分散,如何协调分布式能源供电,并保证微电网群间的协调运行及相互支撑,成为了尚未合理解决的难题。如何保证对用户的不间断供电,以及为用户提供实时电价信息,使用户有选择地经济用电,成为运营研发重点。以上诸多因素导致了主动配电网运营管理困难,使整个配电网能量信息控制的难度加大。微电网整合分布式电源与用户,作为能控能观的智能单元以单点接入配电网,降低了主动配电网对大

量分散的分布式电源和用户直接控制的难度,另外,微电网控制中心为主动配电网提供多种实时信息,保证微电网安全稳定运行,并改善微电网运行的经济性。微电网控制中心根据配电网需求和微电网的运行目标,调节微电网与主动配电网之间的能量交换。微电网控制中心根据负荷需求、天气情况、电价以及气价等信息,协调微电网中的分布式电源、储能和主动负荷等设备,对微电网进行有序的调度决策管理与控制。微电网控制中心通过对微电网系统的有效管控,并反馈大量整合处理后的信息给主动配电网控制中心,大幅降低了主动配电网的运营管理与控制难度。

g. 提高用户分布式光伏自发自用的满意度。

随着国家电网公司分布式光伏发电入网无偿服务等相关政策的推出,对用户服务质量提出了更高的要求,用户满意度成为了衡量电力企业的重要标准。随着越来越多的社区、单位、家庭等场所屋顶发电和光电建筑一体化项目免费入网,与之配套的以用户为中心的分布式发电运营管理模式亟需研究制定。将屋顶发电与光电建筑一体化项目以微电网形式并网为提高供电可靠性和智能发用电提供了技术支撑。微电网能量管理系统有效管理光伏发电、用户用电、电能储存和售电入网等多个环节,在电力市场的调节手段下,制定出合理经济的用电、售电和电能存储模式,使用户获得最大经济效益。当天气恶劣导致分布式光伏电源不能发电时,微电网将协调主动配电网配电和储能装置发电,保障为用户不间断供电,当遇到恐怖袭击或配电网故障无法供电时,微电网可切换为孤岛运行,协调分布式电源和储能装置,保障重要用户正常用电^[29]。微电网技术的应用显著增强了用户的可靠性和经济性,提高了用户用电满意度。

表 1 总结了微电网整合分布式电源和用户负荷接入主动配电网后带来的综合效益分析^[30-33],主要包括:管理效益、经济效益、环境效益和社会效益。微电网充分发挥其柔性就地消纳分布式电源和可靠供电的优势,与主动配电网互动,有效利用新能源与可再生能源发电,保障对用户可靠、经济、优质供电,带

表 1 微电网接入的综合效益

Table 1 Comprehensive benefits of microgrid integration

管理效益	经济效益	环境效益	社会效益
协调发电	降低网损	减少火电污染 气体排放	倡导绿色
可靠供电	节约能源	新能源充电汽车 雾霾治理	引导科学 用电
灵活用电	延缓投资	打造低碳生活	可持续发展
自主售电	冷热电 联供效益	推动电能替代	助力智能 家居建设
实现需求侧管理		城市环境美化	

来了显著的综合效益。

5 微电网接入主动配电网的研究现状与发展趋势

目前,主动配电网和微电网的研究状况与微电网接入主动配电网的研究发展趋势如下。

a. 微电网对提高主动配电网接纳分布式电源能力的研究。

现有配电网接纳分布式电源能力的研究,考虑因素单一,缺乏考虑主动配电网特点及光伏、风电的间歇性、波动性等因素的影响,对主动配电网接纳分布式电源的能力评估不准确。微电网技术将有效整合不同种类分布式电源的各自特点^[34],发挥其互补优势,缓解分布式电源间歇性、波动性的影响,实现单点柔性接入和退出主动配电网,有利于分布式电源的高效消纳。因此,计及主动配电网与微电网交互影响,研究微电网中分布式电源和储能装置的多目标优化配置方法^[35-37],实现削峰填谷,以及如何高效率柔性就地消纳分布式电源是未来的发展趋势。

b. 微电网接入主动配电网的综合规划研究。

当前的主动配电网规划方法缺乏统筹兼顾新能源发电技术标准、经济效益和环境效益等多方面综合因素的微电网选址与定容,需加强主动配电网对微电网群的兼容性,需针对间歇式可再生能源发电的波动性选择主动配电网合理的热备用容量,另外,需考虑主动负荷及电力市场等综合因素^[38-39]。适合微电网群接入的主动配电网综合规划方法成为了重点研究内容之一。

c. 微电网接入主动配电网的优化运行调度方法研究。

现有的配电网优化调度运行方法中,未能准确反映出间歇式分布式电源和各类负荷的随机性因素影响,而计及风光功率预测和微电网群的互补特性,统筹考虑主动配电网的电气运行参数、经济运行成本和碳排放效益等多目标的优化问题也未能得到有效解决^[40-43]。针对主动配电网的双向潮流特性、联络开关状态灵活可变、优化变量和优化目标种类较多、约束条件较多等特点,建立合理有效的多目标、多约束的强非线性优化概率模型,并提出相应的主动配电网综合优化运行调度新方法是当前的研究重点和难点。

d. 微电网接入主动配电网的协调控制方法研究。

目前主要的微电网协调控制方法大都是针对配电网中各发、储、用电单元之间设备层面的常规协调,仍缺乏计及不同种类分布式电源的出力特性、惯性时间常数和主动负荷特性等因素的实时协调控制方法研究。高渗透率微电网接入的主动配电网中

微电网群的系统层面协调控制新问题也亟待开展深入研究。需要具体考虑主动配电网中微电网群的互补特性、分布特性、交直流混合供用电网络特点等多重复杂因素^[44-48]。

e. 微电网接入主动配电网的电能质量分析与控制。

在微电网和主动配电网中,一方面,分布式电源和非线性波动性负荷的种类复杂多样,特别是风力发电和光伏发电输出功率的波动性、随机性、间歇性特点常常导致微电网内电源与负荷之间功率难以平衡;另一方面,电力电子设备大量使用,如并网逆变器、固态开关、电动汽车充电装置等。总之,以上诸多原因导致微电网和主动配电网中电能质量问题更为复杂且突出,主要包括:电压与电流谐波、电压暂降、电压突升、电压短时中断、电压波动与闪变、电压与电流不平衡分量等。对此多种电压质量、电流质量并存的复杂电能质量问题,亟待对集串联型与并联型装置于一体的综合型统一电能质量控制器 UPQC (Unified Power Quality Controller) 展开进一步研发和应用。

f. 微电网接入主动配电网的需求侧管理与控制模式研究。

随着配电网从被动模式向主动模式发展,位于需求侧的用户用电方式和电能计量方式发生了很大变化,传统需求侧管理中用户参与度不高,相关数据实时性较低,管理方式不够灵活。如何建立适应主动配电网的需求侧响应互动模型,通过实时电价机制^[49],使得用户结合储能技术在不改变用电习惯的前提下,在峰谷时段选择性用电,并结合分布式电源、储能装置和电动汽车有序充放电,最终使用电过程呈现主动状态的需求侧主动管理与控制模式及其相关技术亟待研究^[50-51]。

g. 微电网接入主动配电网的能量管理系统研发。

主动配电网中含有多种多样的分布式电源、主动负荷和大量的电动汽车充电站^[52-53],具有分散性强、供需快速变化、能量双向流动、配电网与用户的互动性增强等特点,传统的能量管理系统难以满足海量信息处理和快速控制决策的需要,不再适用于主动配电网,需要研发适用于微电网接入主动配电网的能量管理系统,涵盖源、网、荷三大环节,兼顾“集中协调”和“分布自治”的要求^[54-57],实现主动配电网全局全周期优化控制与主动管理。

6 结论

高渗透率分布式电源集群并网促使传统配电网向主动配电网升级换代。电力市场的改革,尤其是售

电侧的改革,以及光伏屋顶计划、智能家居建设的不断推进,客户用电方式将发生巨大变化,客户兼具电能生产者和消费者的角色。主动配电网规划设计方法、运行管理模式和源网荷协调控制技术的多维创新将极大促进可再生能源的柔性就地消纳,并使主动配电网更好地为用户提供可靠、优质、高效的多元化电力服务。含有多微电网接入的主动配电网将成为智能电网中配电网发展的必然趋势,主动配电网发配用电的主动管理与控制技术的进步将推动智能电网建设的快速健康发展。

致 谢

感谢“国家电网公司总部科技项目:分布式光伏发电集群运行调控关键技术研究”的资助。

参考文献:

- [1] LASSETER R. Smart distribution:coupled microgrids[R]. Proceedings of the IEEE,2011,99(6):1074-1082.
- [2] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.
YU Yixin,LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(34):1-8.
- [3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):1-7.
ZHOU Xiaoxin,CHEN Shuyong,LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):1-7.
- [4] FAN Mingtian,ZHANG Zuping,SU Aoxue. A planning approach for active distribution networks[C]//CIRED2011 21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt,Germany:IET Services Ltd,2011:1-4.
- [5] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报,2014,29(2):1-12.
WANG Chengshan,WU Zhen,LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(2):1-12.
- [6] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
YOU Yi,LIU Dong,YU Wenpeng,et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(18):10-16.
- [7] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):12-17.
FAN Mingtian,ZHANG Zuping,SU Aoxue,et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):12-17.
- [8] 程利军. 智能配电网[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013:85-88.
- [9] 李勋,龚庆武,胡元潮,等. 智能配电网体系探讨[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):108-111.
LI Xun,GONG Qingwu,HU Yuanchao,et al. Discussion of smart distribution grid system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):108-111.
- [10] AREFIFAR S A,MOHAMED Y A. Supply-adequacy-based optimal construction of microgrids in smart distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1491-1502.
- [11] al KAABI S S,ZEINELDIN H H,KHADKIKAR V. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,99:1-9.
- [12] MARTINS V F,BORGES C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(4):2164-2172.
- [13] 张建华,曾博,张玉莹,等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报,2014,29(2):13-23.
ZHANG Jianhua,ZENG Bo,ZHANG Yuying,et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(2):13-23.
- [14] 王成山,杨占刚,武震. 一个实际小型光伏微网系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):6-10.
WANG Chengshan,YANG Zhangang,WU Zhen. Design and realization of practical photovoltaic microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):6-10.
- [15] KHODAYAR M E,BARATI M,SHAHIDEHPOUR M. Integration of high reliability distribution system in microgrid operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(4):1997-2006.
- [16] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
DING Ming,WANG Weisheng,WANG Xiuli,et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):1-14.
- [17] 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 micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10-14.
- [18] PILO F,PISANO G,SOMA G G. Optimal coordination of energy resources with a two-stage online active management[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,10(58):4526-4537.
- [19] KAHROBAEIAN A,MOHAMED Y A. Interactive distributed generation interface for flexible micro-grid operation in smart distribution systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2012,3(2):295-305.
- [20] HU Z,LI F. Cost-benefit analyses of active distribution network management,part I:annual benefit analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1067-1074.
- [21] HU Z,LI F. Cost-benefit analyses of active distribution network management,part II:investment reduction analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1075-1081.
- [22] CHRISTAKOU K,TOMOZEI D,LE BOUDEC J,et al. GECN: primary voltage control for active distribution networks via real-time demand-response [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(2):622-631.
- [23] VALVERDE G,van CUTSEM T. Model predictive control of voltages in active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(4):2152-2161.
- [24] MOHAMED Y A,RADWAN A A. Hierarchical control system

- for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2011,2(2):352-362.
- [25] JU Yuntao,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. An extension of FBS three-phase power flow for handling PV nodes in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(4):1547-1554.
- [26] ALMUHAINI M,HEYDT G T. Evaluating future power distribution system reliability including distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(4):2264-2272.
- [27] 刘凯,李幼仪. 主动配电网保护方案的研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2584-2590.
- LIU Kai,LI Youyi. Study on solutions for active distribution grid protection[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2584-2590.
- [28] 薛禹胜,吴勇军,谢云云,等. 停电防御框架向自然灾害预警的拓展[J]. 电力系统自动化,2013,37(16):18-24.
- XUE Yusheng,WU Yongjun,XIE Yunyun,et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early-warning[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(16):18-24.
- [29] 李鹏,张玲,王伟,等. 微网技术应用与分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(20):109-115.
- LI Peng,ZHANG Ling,WANG Wei,et al. Application and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(20):109-115.
- [30] WANG Shouxiang,LI Zhixin,WU Lei,et al. New metrics for assessing the reliability and economics of microgrids in distribution system[J]. IEEE Transactions on Power System,2013,28(3):2852-2861.
- [31] CELLI G,GHIANI E,MOCCI S,et al. Reliability assessment of active distribution networks[C]//CIGRE 2010. Paris,France: Cigré Technical Committee,2010:1-9.
- [32] FAN Mingtian,ZHANG Zuping,SU Aoxue. Cost-benefit analysis of integration der into distribution network[C]//CIRED Workshop 2012(Integration of Renewables into the Distribution Grid). Lisbon,Portugal:IET Services Ltd,2012:1-4.
- [33] 王伟. 实施电能替代,促进环境改善[N]. 人民日报,2014-4-16(7).
- [34] 李鹏,廉超,李波涛. 分布式电源并网优化配置的图解方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):91-96.
- LI Peng,LIAN Chao,LI Botao. A graph-based optimal solution for siting and sizing of grid-connected distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):91-96.
- [35] NICK M,CHERKAOUI R,PAOLONE M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(5):2300-2310.
- [36] 王松岑,来小康,程时杰. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):3-8.
- WANG Songcen,LAI Xiaokang,CHENG Shijie. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):3-8.
- [37] 王成山,武震,李鹏. 分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J]. 电力系统自动化,2014,38(16):1-8.
- WANG Chengshan,WU Zhen,LI Peng. Prospects and challenges of distributed electricity storage technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(16):1-8.
- [38] 钟清,孙闻,余南华,等. 主动配电网规划中的负荷预测与发电预测[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3050-3056.
- ZHONG Qing,SUN Wen,YU Nanhua,et al. Load and power forecasting in active distribution network planning[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(19):3050-3056.
- [39] GILL S,KOCKAR I,AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(1):121-131.
- [40] PILO F,CELLI G,MOCCI S,et al. Multi-objective programming for optimal DG integration in active distribution systems[C]//Power and Energy Society General Meeting,2010 IEEE. Minneapolis,USA:IEEE,2010:1-7.
- [41] 尤毅,刘东,钟清,等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):177-183.
- YOU Yi,LIU Dong,ZHONG Qing,et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9):177-183.
- [42] 李鹏,徐伟娜,周泽远,等. 基于改进万有引力搜索算法的微网优化运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3073-3079.
- LI Peng,XU Weina,ZHOU Zeyuan,et al. Optimal operation of microgrid based on improved gravitational search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(19):3073-3079.
- [43] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2575-2583.
- LIU Yibing,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2575-2583.
- [44] 于文鹏,刘东,余南华. 馈线控制误差及其在主动配电网协调控制中的应用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):108-115.
- YU Wenpeng,LIU Dong,YU Nanhua. Feeder control error and its application in coordinate control of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(13):108-115.
- [45] LAGO J,HELDWEIN M L. Operation and control-oriented modeling of a power converter for current balancing and stability improvement of DC active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(3):877-885.
- [46] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于有功-无功协调优化的主动配电网过电压预防控制方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):184-191.
- LIU Yibing,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. Overvoltage preventive control method based on active and reactive power coordinated optimization in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9):184-191.
- [47] 崔福博,郭剑波,荆平,等. 直流配电技术综述[J]. 电网技术,2014,38(3):556-564.
- CUI Fubo,GUO Jianbo,JING Ping,et al. A review of DC power distribution technology[J]. Power System Technology,2014,38(3):556-564.
- [48] 李鹏,王旭斌,马剑. 基于非线性多智能体系统的微网分布式功率控制方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4277-4285.
- LI Peng,WANG Xubin,MA Jian. Distributed power control

- method of microgrid based on nonlinear multi-agent system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25):4277-4285.
- [49] 艾欣,陈炜. 考虑容量管理的主动配电网市场化实时竞价运营模式[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22):3743-3749.
- AI Xin, CHEN Wei. Marketization real-time bidding operation mode of the active distribution network with consideration of capacity management [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3743-3749.
- [50] 韩勇. 智能需求侧管理关键技术研究及发展路线图规划[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2):52-57.
- HAN Yong. Key technologies and development road-map planning of smart demand-side management [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2):52-57.
- [51] 赵慧颖,刘广一,贾宏杰,等. 基于精细化模型的需求侧响应策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1):62-69.
- ZHAO Huiying, LIU Guangyi, JIA Hongjie, et al. Analysis of demand response program based on refined models [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1):62-69.
- [52] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4):1-7.
- HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4):1-7.
- [53] 苗轶群,江全元,曹一家. 考虑电动汽车随机接入的微网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12):1-6.
- MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12):1-6.
- [54] 孙宏斌,张伯明,吴文传,等. 自律协同的智能电网能量管理系统家族:概念、体系架构和示例[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9):1-5.
- SUN Hongbin, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. Autonomous-synergetic energy management system family for smart grids: concept, architecture and cases [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9):1-5.
- [55] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10):7-12.
- WU Xiong, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):7-12.
- [56] YANG Q, LAURENSEN D I, BARRIA J A. On the use of LEO satellite constellation for active network management in power distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1371-1381.
- [57] KAMH M Z, IRAVANI R. A sequence frame-based distributed slack bus model for energy management of active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2):828-836.

作者简介:



李 鹏

李 鹏(1965—),男,河北保定人,教授,博士,IEEE Senior member,主要从事新能源并网发电与微电网技术、电能质量分析与控制、柔性输配电技术、电力电子技术在智能电网中的应用等方面的工作;

窦鹏冲(1988—),男,河北石家庄人,硕士,通讯作者,主要研究方向为电力系统分析与控制、新能源并网发电与微电网技术

(E-mail: doupengchong@163.com)。

Application of microgrid technology in active distribution network

LI Peng¹, DOU Pengchong¹, LI Yuwei¹, ZHOU Fengquan², WANG Haijiao³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Xuji Group Corporation, Beijing 100085, China;

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

Abstract: Various types of distributed energy sources and energy storage devices, as the microgrid cluster, are connected to the distribution grid to form a smart power generation-distribution-consumption network, which realizes the interaction of energy and information among microgrids, distribution network and loads for the multivariate complement. As the best business mode, the development trend of active distribution network in smart grid is to achieve the active control and management of distributed resources. Different issues of the active distribution network with microgrid cluster are studied as the research objects, such as grid structure, planning, control scheme, operating mode, comprehensive benefits, etc., the superiorities of applying the microgrid technology in active distribution network are analyzed, and its research direction is proposed.

Key words: smart grid; active distribution network; microgrid; microgrid cluster; new energy; renewable energy resources; distributed generation; flexible in-situ consumption