

智能用电技术背景下的配电网运行规划研究综述

叶琳浩¹, 刘泽槐², 张勇军², 周来², 张尧²

(1. 中国南方电网有限责任公司 计划发展部, 广东 广州 510600; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:为适应大规模分布式电源、储能、电动汽车接入配电网后发电方式和用电行为的改变,智能用电技术成为当前及未来智能电网研究的趋势。基于智能用电技术的内涵及核心特征,从需求侧响应、电能质量调控、可再生能源消纳、最优潮流控制、设备利用率提升方面,综述了配电网灵活优化运行的应用需求;考虑配电网运行与规划的相互影响,从分布式电源规划、配电网规划以及储能和电动汽车规划3个方向对当前规划思路和研究现状进行总结分析。结合源网荷供需灵活互动对配电网运行规划提出的挑战和未来配电网发展趋势,提出智能用电技术背景下配电网运行规划中需要进一步深入研究的问题。

关键词:智能用电;需求侧响应;智能配电网;优化运行;协调规划

中图分类号:TM 72

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.023

0 引言

随着能源互联网的提出与发展以及电力市场改革的不断深化,灵活互动的智能电力系统成为电网发展变革的新方向^[1]。智能用电作为智能电网的重要环节,通过灵活的电力网络、高效设备和信息网络,实现了电网和用户的灵活双向互动以实现电力资源的优化配置^[2]。

随着电力系统向智能化发展以及电力市场的逐步开放,当前的配电网也在发生一些变化^[2-5]:以风电、光伏发电为代表的分布式电源 DG (Distributed Generation) 在用电侧或配电网中逐步渗透,传统电力系统中,规划或运行主要考虑来自负荷的不确定性,然而,随着 DG 所占的比例逐步提高,配电系统中供需两侧都呈现显著的随机性特征和一定的耦合关系,导致不确定性既可能被放大又可能被抵消;配电网架灵活多变、扩展频繁,随着传统配电网向主动配电网转变,其拓扑结构要求可灵活调整以适应用电智能化的需求,且应具有主动控制和运行能力;越来越多的电能消费者正变成发用电者,随着智能用电的引入,传统电力系统“发输配售用”的功能界限将逐渐趋于模糊,利用可控发电机组和需求侧技术可以形成多能源互补的协同机制,实现源网荷多元协调;局部智能化微网的形成,有利于最大限度地利用可再生能源及提高配电网运行的灵活性与可靠性,局部微网的运行赋予了配电网运行调度更加丰富的内容;储能设备和电动汽车及其充电设施的推广应用,有利于实现储能及电动汽车与配电网的灵

活互动,配电网的运行更加需要建立在先进的网络信息系统、智能控制与管理系统以及大数据处理、云计算等技术的基础上。

这一系列的变化,尤其是用户互动的要求,使传统的配电网运行与规划技术难以适应配电网发展需求。因此,深入挖掘智能用电的技术特征和内涵,充分调动智能用电技术资源,在配电网规划与运行中综合考虑智能用电技术的影响,促进可再生能源的高效利用与配电网的灵活互动,具有迫切的需要与重要的现实意义。

基于上述背景,本文将从智能用电技术的内涵出发,总结智能用电技术引入后对配电网运行的影响。进而就面向智能用电技术的配电网规划关键重点问题进行分析。最后,对智能用电技术背景下配电网运行规划有待深入研究的问题进行相关延伸和展望。

1 智能用电技术的内涵与特征

智能用电是以高级量测体系(AMI)系统及终端技术为支撑,采用智能双向互动为核心的新型智能用电模式,旨在为用户提供优质的供电服务,提高电能的利用效率^[2,6]。

AMI 的建立彻底改变了电力流和信息流单方向流动的现状,为智能用电体系下用户与电网双向全面互动提供平台和技术支撑^[6]。通信作为 AMI 区别于传统量测体系的重要方面,在实现智能用电信息交互方面起到重要支撑作用,AMI 的通信传输架构如图 1 所示。在本地通信方面,有线通信包含 RS-485 和电力线载波;无线通信主要为微功率无线。在远程通信方面,有线通信主要为光纤专网,无线通信主要为 230 MHz、Mbitex、TD-LTE 等无线专网和 GPRS、CDMA1X、ADSL 等公网网络信道。由图 1 可知,用户能够实时获取电价信息、电网运行状态信息以及用电设备的功率和电量信息,因此可以实时优

收稿日期:2018-01-09;修回日期:2018-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777077);南方电网公司资助项目(ZBKJXM00000020)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777077) and China Southern Power Grid Company Limited(ZBKJXM00000020)

化调整用户侧的发电方式和用电行为,组织精准实时的需求侧响应,与电网灵活互动。

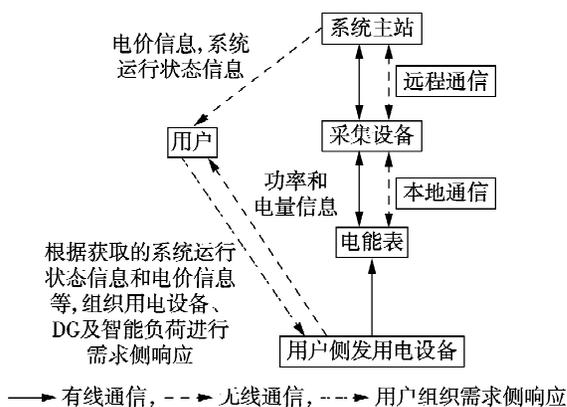


图 1 智能用电 AMI 通信传输架构图

Fig.1 Structure of AMI telecommunication transmission in smart power utilization

智能用电通过利用互联网、云计算和大数据等新兴技术的优势,构建开放智能的电网-用户灵活交互系统,其核心特征是电网与用户能量流、信息流、业务流的灵活互动^[1,7-8]。图 2 显示了智能电网体系下源-网-荷交互关系。

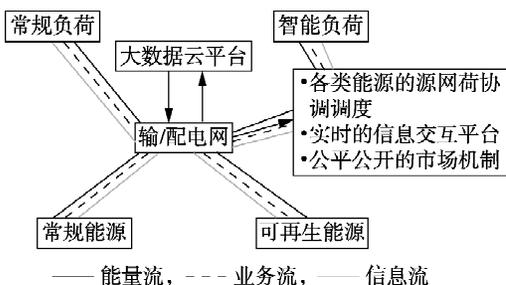


图 2 智能电网体系下源-网-荷交互关系

Fig.2 Interaction of generation-grid-load in smart grid system

智能用电的信息互动主要通过网上、手机等智能终端的在线服务,实现电网公司与用户信息共享,打破孤岛状态。电网公司可以实时掌握用户的基本用电信息,便于更好地组织生产以及为用户制定个性化的售电服务与节能服务。用户可以及时了解电网公司的最新公告、实时电价、电网频率、节点电压等信息,也同样可以及时调整用电行为,降低用电成本,实现与电网的实时互动。

智能用电能量互动的实现可以分为电网视角和用户视角。从电网公司视角上,对于 DG,电网公司可以根据电网潮流变化及区域源荷平衡情况,自动控制接入和退出 DG,同时也可以配合储能装置,优化控制各个 DG 客户的出力,实现最优潮流控制;对于电动汽车的充放电,电网公司通过优化制定充放电电价及策略,合理控制充放电时间,结合有序充电及即插即用等方式,引导电动汽车主动参与电网运行。从用户视角上,DG 用户可以根据电网公司发布

的 DG 状态信息及电价信息,合理组织生产,主动促进电网对可再生能源的消纳,实现售电盈利;电动汽车用户基于智能平台和终端上电网发布的实时信息,优化充放电策略,降低充电成本,甚至获得售电盈利。

智能用电的业务互动包括电网公司向用户提供的用电报装服务、故障抢修服务、咨询查询服务等,以及用户向电网公司提供的售电服务、用电信息共享服务等。通过一系列的便捷优化服务,电网公司能够便捷地提高对用户需求侧响应的主动消纳,提供个性化人性化服务,提高服务水平和质量;用户能够实现方便、灵活、透明、经济和可靠的用电。

2 促进配电网灵活优化运行的应用需求

智能配电网区别于传统配电网的重要特征之一在于源网荷能够实时交换信息,使大量分布式发电和分布式储能在电网中得以即插即用,进而还可参与运行优化;此外,用户可与电网友好合作,帮助电网实现需求侧管理,优化系统潮流,并在紧急情况下支援电网运行^[9]。智能配电网的发展是一个长时间的过程,也是能量流和信息流不断融合的过程。主动配电网作为智能配电网发展的高级阶段技术^[10],二者在融合的同时也有一定的区别侧重,智能配电网侧重于高度融合的物理信息系统,强调信息的价值和配电网的智能化发展。主动配电网则更强调配电网对可再生能源的消纳及主动管理能力,核心在于提升配电网的安全可靠经济运行水平^[10-12]。

智能用电技术作为智能配电网和主动配电网的延伸,其促进配电网灵活优化运行的应用需求主要体现在:需求侧响应互动的需求、电能质量调控的需求、可再生能源消纳的需求、最优潮流控制的需求、设备利用率提升的需求。

2.1 需求侧响应互动需求

如前所述,越来越多的电能消费者正变成发电者并参与到电网的运行中,需求侧资源若能够作为与供应侧资源同等价值的调节手段参与系统整体的调控,将对削峰填谷、减小源荷供需失配和降低可再生能源出力不确定性对系统的影响具有重要作用^[13]。配电网如何充分合理调度需求侧资源,使电网的运行形成源荷双侧协调响应,将是实现配电网灵活优化运行的关键所在。

需求侧响应作为智能用电的重要手段之一,通过智能能量管理系统合理调控用户侧的需求侧响应资源,是实现供需双侧互动以及电力系统协同互联的关键^[13-14]。国内外学者开展了大量有关需求侧响应参与配电网调控运行的研究。文献[15]建立了用户用电效用值最大为目标的居民需求侧响应调控模型,通过 Benders 分解法对求解模型进行简化,提

出了考虑需求侧响应不同类型电器用电模式的控制策略。文献[16-18]针对负荷和 DG 出力的不确定性,提出采用需求侧响应以提高系统运行的安全稳定性。文献[19]将需求侧处理成一种可以参与微网运行的电源,利用需求侧响应主动参与微网削峰填谷。文献[20]研究需求侧响应负荷的不确定性并建立鲁棒优化规划模型,所提模型能够提高系统运行的鲁棒性以及节约系统运行成本。

以上文献表明,需求侧响应作为智能用电的重要方面,在削峰填谷、提升系统安全稳定运行、减少运行费用等方面具有显著作用,是实现柔性负荷与电网灵活互动的重要途径之一。然而,目前系统运行人员已经习惯了从发电侧对系统运行进行管理和控制,需求侧响应后的负荷调整会增加调度维度,可能导致“供电-用电”两侧难以协调。对用户而言,他们也习惯了传统的电价结算方式,对于实时电价和阶梯电价的认知上仍需进一步引导。因此,智能用电促进需求侧主动响应还需解决源荷控制调度上的协调以及引导用户对需求侧响应和电价政策的观念认知转变。

2.2 电能质量调控需求

大规模间歇性 DG 接入配电网,其并网逆变器的控制引起的直流注入问题、输出功率的不确定性引起的潮流的波动性势必会对配电网运行的电能质量产生很大的影响^[21]。总结 DG 产生的电能质量问题主要包括:谐波、电压波动与闪变、频率波动、电压偏差等^[22]。当前,DG 接入配电网引起的电能质量问题已经成为其大规模接入的主要瓶颈^[23]。未来配电网对大规模 DG 兼容包并的主要体现形式之一在于对广泛接入 DG 后配电网电能质量的调控能力。

智能用电技术实现电能质量调控的技术手段主要集中在需求侧响应、负荷聚合技术和近几年发展起来的电力弹簧应用方面。负荷聚合技术主要是将数量庞大的电动汽车、空调等用户侧可控负荷整合为一个或多个聚合体,参与电网调度以最大化负荷资源价值,满足系统调峰、调频等不同运行需求^[24]。电力弹簧是将机械弹簧的概念引入电力系统中,其核心思想是将关键负载上的电压波动转移到非关键负载上,并自动调节非关键负载的耗电量,实现发电量与用电量的自动平衡^[25]。需求侧响应、负荷聚合技术和电力弹簧在用电侧的应用,为智能用电的源荷平衡和电能质量控制提供了更为丰富的技术手段。

智能用电技术以需求侧响应、电力弹簧和负荷聚合技术作为主要电能质量控制手段,在解决大规模 DG 接入以及源荷供需失配引起的电能质量问题方面具有良好的技术优势,国内外学者对此也开展

了大量研究。文献[26]以负荷聚合商协调控制为手段,建立基于调度优先权的独立微网双层实时调度模型以缓解新能源实时功率波动引起的频率失稳及电能质量问题。文献[27-28]通过将电力弹簧运用于新型微网中,能够将 DG 出力波动转移到非关键负载,具有降低储能容量需求、减小三相不平衡和改善系统电能质量的效果。文献[29-31]研究了负载控制优化和需求侧响应解决系统调峰调频的问题,仿真结果表明灵活互动的需求侧响应有助于提高系统电压质量和频率控制。

以上研究表明,通过智能用电技术的源荷双侧互动,能够缓解源荷供需失配引起的一系列电能质量问题,有利于提高系统运行的安全性和稳定性。然而,电能质量调控是一个实时动态过程,源荷的互动依赖于实时可靠的通信支撑,当前要实现全网的源荷实时通信还需要一段历程,因此,如何在稀疏通信的情况下实现区域局部电能质量自律调控将是智能用电背景下配电网运行需要重点研究的课题。

2.3 可再生能源消纳需求

近年来,我国电网中新能源发电的占比快速增长,逐步进入规模化发展的阶段。大规模新能源并网,对系统的频率、电压调节能力提出了更高的要求,一旦不满足要求就很容易脱网,给系统安全稳定运行带来不利影响^[32]。

智能用电在相关技术的支撑下,可增进电力系统资源优化配置,提高电力系统消纳可再生能源的能力^[33]。以灵活互动的负荷柔性并网,通过智能微网、智能家居等技术实现 DG 的即插即用,通过储能、电动汽车等技术直接吸收可再生能源富余出力,可以有效地促进对可再生能源的消纳。

文献[34]依据国外成熟的电力市场,通过需求侧响应促进可再生能源的消纳。文献[35-36]通过在并网点配置储能技术,促进配电网对风电、光伏发电的消纳。文献[37]利用智能微网的“即插即用”促进对风电的消纳。文献[38]提出利用电动汽车入网(V2G)技术对大规模可再生能源进行消纳。

国家电网曾对东北电网和西北电网这 2 个弃风弃光现象非常突出的地区进行生产模拟^[39],结果表明,通过储能、电动汽车、需求侧响应等智能用电手段,能够缓解当前严重的弃风、弃光问题,提高我国新能源消纳水平,推动我国新能源持续健康发展。智能用电促进可再生能源消纳是一个较前沿的课题,通过用户侧资源取代依靠火电机组备用调峰来消纳可再生能源,具有显著的经济效益和环境价值。然而,我国当前电价机制还难以充分调动用户侧需求侧资源促进可再生能源消纳,未来需重点解决的就是丰富灵活电价机制,激励用户灵活性负荷参与到消纳可再生能源的角色中来。

2.4 最优潮流控制需求

最优潮流在电力系统运行和控制等领域有着极为重要的意义。它是一种在满足电力系统安全约束的前提下寻求电力网控制变量的最优设定值,以达到一个或多个目标函数的最优化。传统配电网的最优潮流控制多为单侧控制,即通过控制电源的出力 and 分布来被动匹配负荷需求以达到最优潮流,这往往存在调控的资源有限以及灵活性不足的问题。随着智能用电的发展,配电网中的可控负荷、储能和电动汽车均可通过需求侧响应与系统灵活互动,最优潮流控制将从单侧控制发展到源荷协同的双侧控制。

文献[40]通过控制储能系统的出力,提出一种综合考虑源荷峰谷特性多时段光储并网电压控制的最优潮流控制方法。文献[41]引入智能家居、空调、热泵等温控负荷参与需求侧响应,实现微网优化运行控制。文献[42]建立了兼容需求侧可调控资源的分布式能源系统经济优化运行模型,充分考虑了分布式能源系统中的电负荷、热负荷和冷负荷与光伏、储能等元素协调优化,达到系统最优潮流控制。

以上研究表明,通过源荷双侧最优潮流控制能够实现源荷互动,有利于提高系统运行的可靠性和经济性,达到更好的运行效果。然而,由于双侧最优潮流控制使得系统的模型与变量变得更为复杂,高效的寻优算法将成为双侧最优潮流控制研究的重点之一。

2.5 设备利用率的提升需求

DG 大量接入配电网后将影响配电网设备利用率。一方面,由于 DG 出力的波动性,且受到所利用资源的限制而不能根据负荷需求调节所产生的不可控性,造成电网企业供应“净负荷”(全部负荷减去 DG 出力)的峰谷差加大,负荷利用率更低,由此影响配电网设备利用率;另一方面,由于 DG 的引入,配电网净负荷的不确定性增加,系统在规划、建设时,需预留的备用系数更高,也将对配电网设备利用率造成一定影响。

智能用电技术中的储能、电动汽车和需求侧响应等元素参与系统运行,一方面能够有效地抑制 DG 出力的不确定性^[24,36,43],另一方面也能起到削峰填谷提高系统负荷率的作用^[44-46],从而提升配电网设备利用率。考虑储能、电动汽车和需求侧响应的引入,使得设备利用率的评价的因素和场景更丰富复杂,目前有关智能用电背景下设备利用率评价方法的研究还比较少,想要对适应智能用电的发展趋势下设备利用率进行客观评价,必须对需求侧响应下多因素作用的设备利用率评价方法作进一步研究。

3 面向智能用电技术的配电网源网荷规划

传统的配电网规划的特征主要为源网与负荷的被动匹配,智能用电技术的发展和和应用使配电网的结构形态、运行特性与控制方式产生了根本性变化。未来配电网负荷的不确定性特征使传统配电网规划方法效果下降,而源荷供需互动作为引导和优化负荷行为的重要手段,使规划的复杂性进一步增强^[11]。因此,面向智能用电技术的配电网规划必然是与运行耦合的源网荷多维集成规划。

3.1 DG 规划

DG 接入配电网,对配电网的节点电压、线路潮流、输电阻塞、供电可靠性和安全性等都会带来影响,其影响程度与 DG 的安装位置和容量密切相关,DG 规划一般包括选定安装位置和确定安装容量,以及综合考虑两者之间的协调关系^[47]。总结国内外 DG 规划方案,其优化目标主要集中于:系统可靠性最高、网损最小、电能质量最优、投资成本最低、运行及维护成本最小、污染排放量最少、燃料消耗量最低、能源利用率最高等。

在 DG 规划时,若在完成了 DG 或储能、充电站的选址定容之后再行配电网架规划,任一者的变化均会对规划结果产生影响。又或者只考虑 DG 出力的不确定性而不考虑负荷需求的波动性和负荷需求侧响应,也可能导致 DG 规划容量偏大或系统源荷供需不匹配造成的电能质量问题^[48]。因此,在智能用电技术背景下的 DG 规划需要综合考虑源网荷交互协调。下面选取几篇代表性文献进行评述与分析。

文献[49]在电力市场环境下以 DG 运营商作为主体,从经济层面、技术层面和环境效益 3 个方面建立了 DG 选址定容多目标优化模型,并结合模糊决策和场景技术对解集进行筛选分析。然而,文中所述的场景并未考虑负荷与 DG 互动的需求侧响应的情形。

文献[50]分析 DG 出力和负荷时序波动特性,引入 K-均值聚类多场景概率分析方法,以降低源荷波动性及不确定性对规划偏差的影响。然而对于具备需求侧响应能力的负荷,由于其源荷互动改变了传统源荷独立运行的出力行为,对其不确定性必然产生一定的耦合相关性,因此规划时需对源荷互动的耦合相关性进行考虑。

文献[51]针对 DG 与电动汽车充电站接入配电网,提出综合协调规划方法,该方法考虑风、光、负荷的随机不确定性和环境效益,以配电系统总成本的随机期望值最小为目标,对含 DG 与充电站的配电网进行综合协调规划。然而,所建立的规划模型没有考虑电动汽车与电网互动的 V2G 技术。

文献[52]在规划阶段充分应用不同类型 DG 和

负荷的时序性,引入不同恢复率的激励型需求响应模型,从而构建考虑不同 DG 和负荷类型的协同规划决策模型,形成了投资层面和运行模拟层面的多时间尺度双层优化。所述模型虽然考虑了源荷的需求侧响应对 DG 规划的影响,但是对于需求侧响应实际运行的不确定性却没有在建模中进行描述。

以上文献均在一定程度上考虑了源网荷协调下的 DG 规划,对 DG 规划现有研究工作间的比较分析见表 1。

表 1 现有 DG 规划研究工作比较

Table 1 Comparison of DG planning among current researches

文献	关注点	贡献	不足
[49]	DG 规划	建立 DG 选址定容多目标优化模型	未考虑负荷与 DG 的互动
[50]	考虑 DG 与负荷时序多场景不确定性下的 DG 规划	降低源荷不确定性对规划偏差的影响	未考虑源荷互动出力行为的耦合相关性
[51]	DG 与电动汽车协调规划	考虑不确定性的 DG 与充电桩规划	未考虑电动汽车与电网互动 V2G
[52]	考虑需求侧响应下的 DG 规划	构建不同 DG 和负荷类型协调规划模型	仅考虑 DG 不确定性而未考虑 DR 不确定性

表 1 表明,现有研究多从不同角度建立了 DG 优化规划模型,但对负荷与 DG 的协调互动考虑不足^[49,51],又或者对 DG 与负荷的不确定性和耦合相关性缺乏合理建模^[50,52]。实际上,智能用电背景下 DG 规划必不可少需考虑 DG 与负荷的互动,负荷与 DG 的互动改变了 DG 的出力行为,DG 不确定性在需求侧响应的互补作用下有所削减,因此在规划阶段不仅要考虑 DG 的不确定性,还需要考虑负荷的不确定性以及 DG 与负荷互动下的耦合相关性。综上所述,在 DG 规划阶段就考虑规划完成后源网荷或者源荷协调互动运行的问题,才能使 DG 的规划更加科学合理并满足智能用电技术下源网荷协同运行的理念。

3.2 配电网规划

配电网是电力系统的重要组成部分,对其进行科学合理的规划是保证配电网安全经济运行的重要前提^[53]。配电网规划的目标设计主要是从投资成本、网络损耗和可靠性等方面进行规划。

如前所述,智能用电技术的引入使传统配电网逐渐向主动配电网转变,其拓扑结构要求可灵活调整,且需具有主动控制和运行能力。传统的配电网规划方法都建立在未来具体的规划网架之上且受诸多不确定因素的影响,一旦规划网架发生变化,已经投入的 DG 又可能不符合规划初衷而造成成本沉没^[54]。因此,面向智能用电技术的配电网架规划应该在规划阶段就考虑源网荷协调互动。针对考虑 DG 和柔性负荷的配电网联合规划,已有学者进行相

关研究。

文献[55]提出基于配电网风险应对的多时段配电网扩展规划方法,文中利用需求侧响应和短时储能系统等非电网手段来消纳 DG 出力预测的偏差,提高配电网规划运行的经济性。实际上,需求侧响应资源和储能参与系统运行也存在着不确定性,因此,在规划阶段需综合考虑 DG、需求侧响应资源运行的不确定性,以使模型更完善。

文献[56]统一考虑储能系统、电动汽车充电站与配电网扩展的联合规划,基于配电网扩展规划模型,考虑电动汽车充电负荷和分布式储能的选址定容,构建配电网架升级多阶段联合规划模型。所提模型虽然考虑了电动汽车充电的不确定性,却未考虑需求侧响应下电动汽车入网(V2G)对配电网规划的影响。

文献[57]提出一种考虑供电公司、DG 运营商和用户利益的主动配电网三层规划模型,其中,“源”层以 DG 运营商利益最大进行 DG 的选址定容,“网”层以供电公司建设运行成本最小进行配电网的扩展规划,“荷”层以用户参与利益最大进行基于激励型和价格型需求侧响应项目的用电调整,用于协调“源”、“网”、“荷”三方的利益以及促进资源的优化利用。所述模型虽然反映了源网荷协调规划以及效益分摊的核心思想,但由于电价机制通常为预先制定且具有时段性,通过电价机制作为杠杆来促进荷层的负荷需求侧响应难以反映和满足系统实时运行的需求,在智能用电背景下,配电网规划时需将具备需求侧响应能力的负荷当作可调度的资源,并且使其能够根据系统的运行需要实时主动参与到调度中。

以上文献均从源网荷协调运行角度出发考虑需求侧响应和 DG 出力不确定性等问题,对配电网进行规划和论证。考虑智能用电技术的配电网规划现有研究间的比较分析见表 2。

表 2 现有配电网规划研究间比较

Table 2 Comparison of distribution network planning among current researches

文献	关注点	贡献	不足
[55]	配电网规划	考虑储能和需求侧响应消纳 DG 出力不确定性	未考虑需求侧响应资源的不确定性
[56]	配电网与储能、电动汽车联合规划	考虑电动汽车充电不确定性下的配电网架升级多阶段模型	未考虑 V2G 对配电网规划的影响
[57]	源网荷协调规划	考虑了电价机制下需求侧响应的源网荷协调规划	难以反映源网荷实时运行状态

表 2 表明,现有配电网规划的研究多将电源和负荷当作一个已知或者满足一定不确定性分布的功

率源节点^[55-56],而对其源网荷互动行为的建模尚没有精确的反映^[55-57]。面向智能用电的配电网规划需全面反映源网荷协调运行的实际,促进配电网中源网荷运行调度的有机结合和互动。

3.3 储能及电动汽车充电站规划

当前配电网中,广泛应用的具备需求侧响应能力的负荷主要是储能系统、电动汽车和空调等温控负荷^[19,36,58]。空调等温控负荷的规划通常以需求为导向,即哪个地方需要装设空调就安装,可规划的空间较小。目前国内外学者针对负荷侧的规划主要集中在储能及电动汽车充电站的规划上。

储能系统凭借其快速功率调节和兼具供蓄能力的特征,是实现广泛接入的分布式能源灵活调节、参与需求侧响应以及网络优化运行的关键所在^[12]。智能用电技术背景下的储能规划多从系统的源网荷相协调角度出发,以充分发挥储能的积极作用。文献[59]从抑制风电场短期和长期功率波动的角度,提出基于小波变换算法实现对储能容量的配置;文献[60]从负荷聚合商的角度出发,利用储能装置作为其提高供能平稳性的手段,建立了负荷聚合商基于市场等级化补偿规则的储能容量优化配置模型,提高负荷聚合商参与市场的质量;文献[61]根据负荷和可再生能源的出力特性,以及储能接入后对配电网重构的影响,对储能进行选址定容规划,实现源网荷多方运行效益的协调。上述有关储能的规划均考虑建成后参与电网运行的效果,然而其储能配置多为储能对 DG 或者负荷的单方向的匹配,而智能用电强调源荷双向互动,因此,有必要对储能在 DG 或负荷的双向协调互动下的规划做进一步研究。

电动汽车作为柔性负荷,是实现与智能电网灵活互动的重要元素之一。电动汽车充电站作为电动汽车配套设施的重要组成部分,是电动汽车与电网灵活互动的窗口。面向智能用电技术的电动汽车充电站合理规划,需要综合考虑与配电网和 DG 的协调互动。文献[62]在考虑系统负荷水平和电价的不确定因素情况下,计及用户参与需求侧响应速度,提出了配电系统中电动汽车充电桩规划方法。文献[63]提出了基于节点充电需求的分散式充电桩规划策略,构建了以投资成本和系统网损之和最小、快速充电站截获的交通流量最大为目标的配电系统与电动汽车充电网络协调规划的多目标优化模型。文献[64]考虑 DG 同时为配电网负荷和充电站供电,建立了总成本最小、网络损耗最小和交通满意度最高的电动汽车充电站与 DG 定容选址模型。上述充电桩的规划虽然考虑了与配电网运行的协调,然而缺乏考虑充电桩建成后电动汽车可以在充电桩采用 V2G 技术与电网互动支撑电网尖峰负荷的情形。

以上选取的代表性文献反映了当前储能和电动

汽车规划的一般思路,现有储能与电动汽车研究间的比较分析见表 3。

表 3 现有储能与电动汽车规划研究间比较

Table 3 Comparison of energy storage and electric vehicles planning among current researches

文献	关注点	贡献	不足
[59]	抑制 DG 出力波动的储能规划	抑制 DG 的短期和长期出力波动	储能配置多为储能
[60]	提高负荷供能平稳性的储能规划	建立市场化补偿的储能优化配置模型	对 DG 或者负荷的单方向的匹配,未考虑双向互动
[61]	考虑配电网重构的储能规划	促进配电网对可再生能源的消纳	
[62]	负荷水平和电价水平下的电动汽车规划	考虑需求侧响应速度的优化规划模型	缺乏考虑智能用电背景下 V2G 技术下的电动汽车规划方法
[63]	配电网与电动汽车协调规划	构建配电网与电动汽车协调规划模型	
[64]	电动汽车与 DG 的协调规划	促进配电网运行对 DG 的消纳	

通过表 3 对比分析可见,储能与电动汽车的规划目标主要集中于促进 DG 消纳^[59,64]、平滑负荷波动^[60,62]和优化配电网的运行^[61,63],这些规划均从匹配现有的源网荷出发,缺乏考虑源网荷的多维集成互动下的主动规划。面向智能用电技术的储能和电动汽车充电站规划思路需要考虑建成以后的运行问题,充分调动负荷参与需求侧响应的作用,最终实现源网荷协调互动,保证系统运行的安全、可靠、经济、灵活。

4 有待深入研究的问题

为适应一系列新变化,如大规模、高渗透率的 DG 接入配电网,传统配电网向运行更为灵活的主动配电网、微网转变,储能、电动汽车的应用与推广,传统配电网中的被动用电方式向注重源网荷灵活互动的智能用电发展是必然趋势。在此背景下,展望智能用电技术发展趋势,结合当前配电网灵活优化运行的应用需求以及配电网源网荷多维集成规划研究现状,下一步需要着重研究以下几个方面的问题。

a. 建模层面:如何在智能用电技术背景下进行源网荷协同优化建模?可再生能源出力具有强随机性,而其随机特性只有在动态环境中才得以体现;储能、电动汽车、空调负荷等需求侧响应资源的接入,使得用户侧用能规律渐趋复杂,对负荷精准预测提出挑战;DG、储能、新型无功补偿装置等电力电子设备具备快速可控性及强非线性等特征,与电网相互作用变得更加复杂。传统的静态独立建模方法已经难以全面反映智能用电技术背景下源网荷不确定性运行与双侧灵活交互的运行状态,针对此问题,基于物理机理和考虑多主体利益博弈的源网荷全状态建模方法,将是一个重要的课题,是当前智能用电背景

下电网运行规划值得考虑的关键点。

b. 算法层面:如何高效求解多维度混合整数非线性机会约束优化模型?智能用电技术中的灵活互动,在规划和运行方面,由于需要兼顾源网荷多端最优潮流控制,使得优化模型变得更为复杂,对优化算法的求解效率和寻优质量将是巨大的挑战,而各主体的数据共享在现实中也不一定可行。一方面,研究适应多主体的高效分布式协同优化算法,将成为求解智能用电技术中多主体优化模型的关键;另一方面,机器学习、深度学习和人工智能技术的进步,为高效求解该类复杂问题提供了新的方法,有望成为智能用电与智能电网运行管理的核心工具,将成为求解考虑智能用电优化模型的研究的重点之一。

c. 运行应用层面:信息物理融合如何促进智能用电和智能配电网优化运行?智能用电技术背景下,大量可再生能源接入以及源网荷的双侧互动,大幅增加了系统运行的复杂性和不确定性,传统监测系统的态势感知能力和信息共享能力难以满足运行控制的实时需要。互联网+、物联网、高效能芯片等信息物理融合技术,实现信息能量互联互通与深度融合,将传统“盲调”的配电网变得“透明”、可见、可控,其不确定性得到显著的抑制。在此基础上,采用高级量测采集的海量实时数据,通过通信架构与信息集成,建立基于大数据与云计算的广域状态监测、优化调度和决策平台,是包含智能用电技术的智能配电网优化运行亟需突破的关键环节。

d. 规划应用层面:如何提出与运行耦合的多场景、多主体、多目标配电网优化规划方法?如何协调一次系统规划、二次系统规划、通信规划、自动化规划、物联网规划等不同体系?未来配电网的规划必须与建成之后的运行耦合协同,未来配电网将更加强调供需互动的灵活性,这就使得能量市场复杂化(多利益主体并存和多方博弈)、运行目标多元化(多能互补和用户灵活互动)和控制对象广泛化(电力电子设备广泛接入)。提出与运行相耦合的多场景、多主体、多目标配电网优化规划方法,协调一次系统规划、二次系统规划、通信规划、自动化规划和物联网规划等不同体系,应对多要素灵活性对配电网规划提出的挑战,是未来配电网规划的研究的重点方向。

5 结语

随着电力市场的开放, DG、储能、电动汽车等柔性负荷接入配电网,需要一种新型用电方式以使需求侧与供给侧平等地参与配电网优化运行。灵活互动的智能用电技术,赋予了配电网运行规划更加丰富的内容。在智能用电技术背景下,总结分析配电网运行对源网荷协调互动的应用需求以及面向智能

用电技术的配电网规划方法,是本文的立意所在。本文分类总结分析了智能用电技术背景下配电网灵活优化运行的应用需求,并对面向智能用电技术的配电网规划思路及研究现状进行了综述,最后,对下一步需要着重研究的问题和研究趋势进行展望。随着智慧用能与能源互联网的提出与发展,智能用电技术将迎来更多的发展和作为的空间,为建设坚强的智能电网提供更有力的支撑。

参考文献:

- [1] 黄莉,卫志农,韦延方,等.智能用电互动体系和运营模式研究[J].电网技术,2013,37(8):2230-2237.
HUANG Li, WEI Zhinong, WEI Yanfang, et al. A survey on interactive system and operation patterns of intelligent power utilization[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2230-2237.
- [2] 李扬,王蓓蓓,李方兴.灵活互动的智能用电展望与思考[J].电力系统自动化,2015,39(17):2-9.
LI Yang, WANG Beibei, LI Fangxing. Outlook and thinking of flexible and interactive utilization of intelligent power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 2-9.
- [3] 曾博,杨雍琦,段金辉,等.新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望[J].电力系统自动化,2015,39(17):10-18.
ZENG Bo, YANG Yongqi, DUAN Jinhui, et al. Key issues research prospects for demand-side response in alternate electrical power systems with renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 10-18.
- [4] 陈旭,张勇军,黄向敏.主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J].电力系统自动化,2016,40(1):143-151.
CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the background of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 143-151.
- [5] 郝然,艾芊,肖斐.基于多元大数据平台的用电行为分析构架研究[J].电力自动化设备,2017,37(8):20-27.
HAO Ran, AI Qian, XIAO Fei. Architecture based on multivariate big data platform for analyzing electricity consumption behavior[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 20-27.
- [6] 李同智.灵活互动智能用电的技术内涵及发展方向[J].电力系统自动化,2012,36(2):11-17.
LI Tongzhi. Technical implications and development trends of flexible and interactive utilization of intelligent power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 11-17.
- [7] 孙国强,李逸驰,卫志农,等.智能用电互动体系构架探讨[J].电力系统自动化,2015,39(17):68-74.
SUN Guoqiang, LI Yichi, WEI Zhinong, et al. Discussion on interactive architecture of smart power utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 68-74.
- [8] 葛磊蛟,王守相,张明,等.智能用电条件下用户用能管理与服务平台[J].电力自动化设备,2015,35(3):152-156.
GE Leijiao, WANG Shouxiang, ZHANG Ming, et al. Power usage management & service platform in smart electricity utilization condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 152-156.
- [9] 余贻鑫,刘艳丽.智能电网的挑战性问题[J].电力系统自动化,2015,39(2):1-5.

- YU Yixin, LIU Yanli. Challenging issues of smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2):1-5.
- [10] 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 Wengpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18):10-16.
- [11] 王成山, 王丹, 周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9):2-9.
- WANG Chengshan, WANG Dan, ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9):2-9.
- [12] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18):46-52.
- YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-objective optimal placement of energy storage systems in an active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18):46-52.
- [13] 曾鸣, 武庚, 王昊婧, 等. 智能用电背景下考虑用户满意度的居民需求侧响应调控策略[J]. 电网技术, 2016, 40(10):2917-2923.
- ZENG Ming, WU Geng, WANG Haojing, et al. Regulation strategies of demand response considering user satisfaction under smart power background[J]. Power System Technology, 2016, 40(10):2917-2923.
- [14] 梁甜甜, 高赐威, 王蓓蓓. 智能电网下电力需求侧管理应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5):81-85.
- LIANG Tiantian, GAO Ciwei, WANG Beibei. Applications of demand side management in smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):81-85.
- [15] ROH H T, LEE J W. Residential demand response scheduling with multi-class appliances in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1):94-104.
- [16] LIU G, TOMSOVIC K. Robust unit commitment considering uncertain demand response[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119:126-137.
- [17] MAGNAGO F H, ALEMANY J, LIN J. Impact of demand response resources on unit commitment and dispatch in a day-ahead electricity market[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 68:142-149.
- [18] NISHANT M, NIKOLAI A S, SCOTT B, et al. Safe control of thermostatically controlled loads with installed timers for demand side management[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86:784-791.
- [19] 朱兰, 严正, 杨秀, 等. 计及需求侧响应的微网综合资源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16):2621-2628.
- ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Integrated resources planning in microgrid based on modeling demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2621-2628.
- [20] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 计及需求侧响应的电力系统鲁棒优化规划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17):137-145.
- ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Robust optimization planning model of power system considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17):137-145.
- [21] 董伟杰, 白晓民, 朱宁辉, 等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究[J]. 电网技术, 2013, 37(5):1265-1271.
- DONG Weijie, BAI Xiaomin, ZHU Ninghui, et al. Discussion on the power quality under grid-connection of intermittent power sources[J]. Power System Technology, 2013, 37(5):1265-1271.
- [22] 付学谦, 陈皓勇. 基于加权秩和比法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1):128-132.
- FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on weighted rank sum ration method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):128-132.
- [23] CHUA K H, YUN S L, TAYLOR P, et al. Energy storage system for mitigating voltage unbalance on low-voltage networks with photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):1783-1790.
- [24] 孙玲玲, 高赐威, 谈健, 等. 负荷聚合技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6):159-167.
- SUN Lingling, GAO Ciwei, TAN Jian, et al. Load aggregation technology and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6):159-167.
- [25] HUI S Y R, LEE C K, WU F. Electric springs—a new smart grid technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1552-1561.
- [26] 李春燕, 王东, 张鹏, 等. 计及负荷聚合商调度优先权的独立微网双层实时调度模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6):37-43.
- LI Chunyan, WANG Dong, ZHANG Peng, et al. Double layer real-time scheduling model of independent microgrid considering scheduling priority of load aggregators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6):37-43.
- [27] CHI K L, SHU Y H. Reduction of energy storage requirements in future smart grid using electric springs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3):1282-1288.
- [28] YAN S, TAN S C, LEE C K, et al. Electric springs for reducing power imbalance in three-phase power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(7):3601-3609.
- [29] 郭小敏, 杨健维, 何正友, 等. V2G模式下城市电网电压质量概率评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10):2986-2992.
- GUO Xiaomin, YANG Jianwei, HE Zhengyou, et al. Probabilistic evaluation method of voltage quality for urban power network considering vehicle to grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(10):2986-2992.
- [30] YANG Xavier. 利于系统服务的负荷控制优化及需求响应机制推广[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22):3608-3614.
- YANG Xavier. Optimization of load control and promotion of demand response mechanism for system service[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3608-3614.
- [31] AKHTAR Z, CHAUDHURI B, SHU Y R H. Primary frequency control contribution from smart loads using reactive compensation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5):2356-2365.
- [32] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):20-26.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):20-26.
- [33] 王蓓蓓, 赵盛楠, 刘小聪, 等. 面向可再生能源消纳的智能用电关键技术分析与思考[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3894-3903.
- WANG Beibei, ZHAO Shengnan, LIU Xiacong, et al. Review on key technologies of smart power utilization for renewable energy integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3894-3903.
- [34] DIETRICH K, LATORRE J M, OLMOS L, et al. Demand response in an isolated system with high wind integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1):20-29.
- [35] 刘泽槐, 翟世涛, 张勇军, 等. 基于扩展 QV 节点潮流的光储联

- 合日前计划[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3435-3441.
- LIU Zehuai, ZHAI Shitao, ZHANG Yongjun, et al. A joint day-ahead scheduling for photovoltaic-storage systems based on extended QV bus-type power flow[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3435-3441.
- [36] 杨家豪, 欧阳森, 吴裕生, 等. 计及风-储联合系统概率模型的配电网随机潮流[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 234-241.
- YANG Jiahao, OUYANG Sen, WU Yusheng, et al. Stochastic power flow of distribution network considering probability model of wind-storage combined systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 234-241.
- [37] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 16-24.
- WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24.
- [38] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 280-294.
- [39] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
- SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [40] 翟世涛, 刘泽槐, 杨家豪, 等. 考虑多时段并网点电压控制的光储容量匹配及优化运行[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1855-1863.
- ZHAI Shitao, LIU Zehuai, YANG Jiahao, et al. Capacity matching and optimal operation of photovoltaic-storage systems based on multi-period PCC voltage control[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1855-1863.
- [41] 王东, 曾沅, 穆云飞, 等. 采用温控负荷控制技术的新能源优化利用方法[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3457-3462.
- WANG Dong, ZENG Yuan, MU Yunfei, et al. An optimization method for new energy utilization using thermostatically controlled appliances[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3457-3462.
- [42] 曾鸣, 彭丽霖, 孙静惠, 等. 兼容需求侧可控资源的分布式能源系统经济优化运行及其求解算法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1650-1656.
- ZENG Ming, PENG Lilin, SUN Jinghui, et al. Economic optimization and corresponding algorithm for distributed energy system compatible with demand-side resources[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1650-1656.
- [43] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 等. 含新能源接入的电动汽车有序充电分层控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3689-3695.
- ZHAN Kaiqiao, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Electric vehicle coordinated charging hierarchical control strategy considering renewable energy generation integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3689-3695.
- [44] 杨晓东, 张有兵, 翁国庆, 等. 基于虚拟电价的电动汽车充放电优化调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 52-62.
- YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, WENG Guoqing, et al. Virtual time-of-use tariffs based optimal scheduling and implementation mechanism of electric vehicles charging and discharging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 52-62.
- [45] 严干贵, 冯晓东, 李军徽, 等. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 27-35.
- YAN Gangui, FENG Xiaodong, LI Junhui, et al. Optimization of energy storage system capacity for relaxing peak load regulation bottlenecks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 27-35.
- [46] 程瑜, 安甦. 主动负荷互动响应行为分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 63-70.
- CHENG Yu, AN Su. Analysis of active load's interaction response behavior[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 63-70.
- [47] 王瑞琪, 李珂, 张承慧, 等. 基于多目标混沌量子遗传算法的分布式电源规划[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 183-189.
- WANG Ruiqi, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Distributed generation planning based on multi-objective chaotic quantum genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 183-189.
- [48] 白晓清, 赵瞻, 鲍海波. 基于 CLARA 算法的考虑时序特性分布式电源规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 14-22.
- BAI Xiaoqing, ZHAO Zhan, BAO Haibo. DG planning based on CLARA algorithm with consideration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 14-22.
- [49] AMELI A, FARROKHIFARD M R, DAVARI-NEJAD E, et al. Profit-based DG planning considering environmental and operational issues: a multiobjective approach[J]. IEEE Systems Journal, 2015, PP(99): 1-12.
- [50] 彭春华, 于蓉, 孙惠娟. 基于 K-均值聚类多场景时序特性分析的分布式电源多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 58-65.
- PENG Chunhua, YU Rong, SUN Huijuan. Multi-objective DG planning based on K-means clustering and multi-scenario timing characteristics analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 58-65.
- [51] 吴万禄, 韦钢, 谢丽蓉, 等. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 65-73.
- WU Wanlu, WEI Gang, XIE Lirong, et al. Coordinated planning of distribution network containing charging station and distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 65-73.
- [52] 高红均, 刘俊勇. 考虑不同类型 DG 和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4911-4922.
- GAO Hongjun, LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4911-4922.
- [53] 盛四清, 范林涛, 李兴, 等. 基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 51-57.
- SHENG Siqing, FAN Lintao, LI Xing, et al. Multi-objective planning of distribution network based on Pareto optimality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 51-57.
- [54] 欧阳武, 程浩忠, 张秀彬. 基于配电网节点边际容量成本的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 28-32.
- OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin. Distributed generation planning method based on locational marginal capacity cost in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 28-32.
- [55] AREFI A, ABEYGUNAWARDANA A, LEDWICH G. A new risk-managed planning of electric distribution network incorporating customer engagement and temporary solutions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1646-1661.
- [56] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-83.
- JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-83.

- [57] 李逐云,雷霞,邱少引,等. 考虑“源-网-荷”三方利益的主动配电网协调规划[J]. 电网技术,2017,41(2):378-386.
LI Zhuyun, LEI Xia, QIU Shaoyin, et al. Coordinated planning of active distribution network considering “source-grid-load” [J]. Power System Technology, 2017, 41(2):378-386.
- [58] 葛少云,郭建伟,刘洪,等. 计及需求侧响应及区域风光出力的电动汽车有序充电对电网负荷曲线的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(7):1806-1811.
GE Shaoyun, GUO Jianwei, LIU Hong, et al. Impacts of electric vehicle's ordered charging on power grid load curve considering demand side response and output of regional wind farm and photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2014, 38(7):1806-1811.
- [59] JIANG Quanyuan, HONG Haisheng. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2):1363-1372.
- [60] 张开宇,宋依群,严正. 考虑用户违约可能的负荷聚合商储能配置策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):127-133.
ZHANG Kaiyu, SONG Yiqun, YAN Zheng. Energy storage capacity optimization for load aggregators considering probability of demand response resources breach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17):127-133.
- [61] NICK M, CHERKAOUI R, PAOLONE M. Optimal planning of distributed energy storage systems in active distribution networks embedding grid reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, PP(99):1.
- [62] SHOJAABADI S, ABAPOUR S, ABAPOUR M, et al. Optimal planning of plug-in hybrid electric vehicle charging station in distribution network considering demand response programs and uncertainties[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(13):3330-3340.
- [63] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 配电系统与电动汽车充电网络的协调规划[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):10-18.

YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Coordinated planning for power distribution system and electric vehicle charging infrastructures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9):10-18.

- [64] 刘柏良,黄学良,李军,等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术,2015,39(2):450-456.
LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun, et al. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2015, 39(2):450-456.

作者简介:



叶琳浩

叶琳浩(1983—),男,广东清远人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划与运行分析(E-mail: yelh@csg.cn);

刘泽槐(1989—),男,广东揭阳人,博士研究生,通信作者,主要研究方向为智能配电网技术、新能源并网以及储能技术

(E-mail: zehuai_liu@126.com);

张勇军(1973—),男,广东河源人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统无功规划与电压控制、主动配电网的规划与运行控制等(E-mail: zhangjun@scut.edu.cn);

周来(1995—),女,湖南湘潭人,博士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性与规划、配电网设备利用率综合评价等(E-mail: 291666680@qq.com);

张尧(1948—),男,广东广州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划以及运行控制等(E-mail: epyzhang@scut.edu.cn)。

Review on operation and planning of distribution network in background of smart power utilization technology

YE Linhao¹, LIU Zehuai², ZHANG Yongjun², ZHOU Lai², ZHANG Yao²

(1. Planning and Development Department, China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510600, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to adapt to the change of power generation mode and power consumption behaviour after the access of large-scale distributed generators, energy storages and electric vehicles to distribution network, the smart power utilization technology has become the research trend of current and future smart grid, based on the connotation and fundamental features of which, the application demands of flexible and optimal operation of distribution network are reviewed from the aspects of demand response, power quality control, renewable energy accommodation, optimal power flow control and improvement of equipment utilization rate. Considering the interaction between operation and planning of distribution network, the current planning thoughts and research status are summarized and analyzed from three directions of distributed generation planning, distribution network planning, and energy storage and electric vehicle planning. According to the challenges of distribution network operation and planning brought by the generation-grid-load flexible interaction and the development trend of future distribution network, the problems of distribution network operation and planning in the background of smart power utilization technology need to be further researched are pointed out.

Key words: smart power utilization; demand response; smart distribution network; optimal operation; coordinated planning