

高比例新能源接入的主动配电网规划综述

刘洪波, 刘珅诚, 盖雪扬, 刘永发, 阎禹同

(东北电力大学电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Overview of Active Distribution Network Planning With High Proportion of New Energy Access

LIU Hongbo, LIU Shencheng, GAI Xueyang, LIU Yongfa, YAN Yutong

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

摘要: 新能源以分布式电源的形式接入配电网, 给系统带来了不可控性、随机性和波动性问题。借助现代电力电子、信息通信及自动控制等技术, 灵活可控的主动配电网成为发展趋势, 其中主动配电网规划是近年来研究的热点之一。综合国内外在这一领域的研究成果, 对主动配电网规划相关研究内容及其方法进行总结、分析及展望。对主动配电网基本结构进行了描述, 介绍了配电网组成元素的特点; 根据其控制变量的不同, 对主动配电网规划模型进行了归类, 总结了模型中的优化目标; 针对常用模型求解算法及其优缺点进行分析、总结; 通过对关键性问题的讨论, 分析了未来主动配电网的发展趋势。

关键词: 电力系统; 主动配电网规划; 新能源; 分布式电源

ABSTRACT: The new energy is connected to the distribution network in the form of distributed generation, which brings uncontrollability, randomness and volatility to the system. With the help of modern power electronics, information and communication and automatic control technologies, the active distribution network with flexibility and controllability has become a development trend. The active distribution network planning is one of the major research fields in recent years. Based on the research results in this field at home and abroad, the research contents and methods of active distribution network planning were summarized, analyzed and prospected. The basic structure of the active distribution network was described, and the characteristics of the components of the distribution network were introduced. According to the different control variables,

the planning models of active distribution network were classified, the optimization objectives in the model were summarized. The commonly used model solving algorithms and their advantages and disadvantages were analyzed and summarized. Through the discussion of key issues, the development trend of active distribution network in the future was analyzed.

KEY WORDS: electric power system; active distribution network planning; new energy; distributed generation

0 引言

配电网是电力系统的重要组成部分, 科学合理地规划配电网, 可提高电力系统的可靠性与经济性, 提升电网的供电质量, 减少运营商的投资运维成本。传统配电网的电力潮流从上端变电站单一流向负荷节点, 只需采用必要的容量裕度即可应对可能的场景, 相当于被动配电网。分布式电源、分布式供电系统的出现, 尤其是风、光等高渗透率新能源发电接入系统对潮流约束、可靠性约束的冲击, 给系统带来了不可控性、随机性和波动性问题^[1]。为解决在配电侧兼容这类间歇式可再生能源、提升绿色能源利用率、改变一次能源结构等问题, 具有灵活可控特性的主动配电网(active distribution network, ADN)应运而生^[2-3]。

主动配电网借助现代电力电子、自动化以及信息通信等技术, 通过源-网-荷综合主动管理措施进行协调优化, 是具有灵活拓扑结构的公共配电网^[4]。主动配电网能够有效应对大量分布式电源的并网并进行集成管理, 减少弃风弃光, 发挥

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5100-202226021A-1-1-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5100-202226021A-1-1-ZN).

多类型分布式电源并网的积极作用,以提升系统经济性和可靠性^[9]。

与传统配电网相比,主动配电网的主动性体现在以下方面^[9]:1)能够通过先进的信息通信技术(information and communication technology, ICT)及自动化技术,实现系统特定运行目标的最优;2)具备动态的技术标准以实现定制供电;3)具备灵活的网络结构以有效应对双向的潮流特性;4)采用分散式管理,可进行精确的模拟计算。

本文综合主动配电网规划领域的研究成果,介绍主动配电网的基本结构及组成元素特点,对主动配电网规划模型进行归类,分析关键性问题,总结相关求解算法,并对未来发展趋势进行展望。

1 主动配电网基本结构及组成元素

主动配电网除了从上级电网得到电能外,还可以由风电、光伏等分布式新能源供电。主动配电网还存在以燃气轮机、内燃机等传统分布式电源为主的冷热电联供系统,以及多类型储能系统(如机械储能、化学储能等),同时,还包含电动汽车(electric vehicle, EV)、微网等可交互系统。主动配电网中可以通过需求响应策略对负荷用电行为进行有效引导。这样,具有多种分布式电源、多功能交互系统以及需求响应的用户构成了主动配电网基本结构^[7],如图1所示。所含有的规划元素包括电源类型、分布及容量,储能类型、位置

及容量等。根据地区的负荷特点、用电需求,可选择不同的规划元素进行合理规划。

传统可控的分布式电源(如燃气轮机、燃料电池)与分布式可再生能源形成互补发电系统,在一定程度上平衡风、光出力的波动性^[8]。因此,如何合理规划可控性分布式电源与不可控性分布式电源的容量、出力匹配,是分布式电源合理接入主动配电网需要解决的问题之一。

微网在分布式电源合理接入主动配电网方面具备优势。微网是由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统。微网常态方式下与主动配电网并联运行,紧急情况下可以通过合理配置解列点孤立运行^[9]。微网虽然不涉及用户互动管理,但是可以将分散的分布式电源、分布式储能系统、柔性负荷等多种分布式设备合理结合起来,并且不需要分布式就地控制器,只需采用常规量测装置就能实现对整个电网的控制。因此,以微网群形式接入主动配电网能够提高系统的可靠性和供电质量,这是未来配电系统的发展趋势^[10]。

储能设备能很好地解决高渗透分布式电源并网所带来的能源消纳问题^[11-12]。储能设备可以通过对主动配电网充放电来实现平衡发电与负荷需求,从而起到调节电压、降低网损、削峰填谷的作用,还可以解决因保用电可靠性而带来的发电成本提高问题。储能系统具有多种形式,其中蓄电池因具有高效性与经济性而成为规划方案中储能设备的首选^[13]。高功率、高能量密度的蓄电池(如钠硫电池)可通过公共交通运输系统在一定范围内实现动态的储能增减配置,具备良好的移动潜力和巨大的发展空间^[14]。氢储综合系统作为化学储能的重要形式,近年来也受到广泛关注。文献[15]研究了电制氢(power-to-hydrogen, P2H)技术在提高主动配电网的灵活性、促进新能源消纳等方面的应用。

电动汽车作为一种新型清洁用电设备,有可能成为移动储能设备,具备解决能源消纳问题的潜力,因此充电桩安装位置、接入容量等电动汽车相关设备、配置优化开始被纳入主动配电网规划方案中^[16]。然而,电动汽车充放电基础设施与

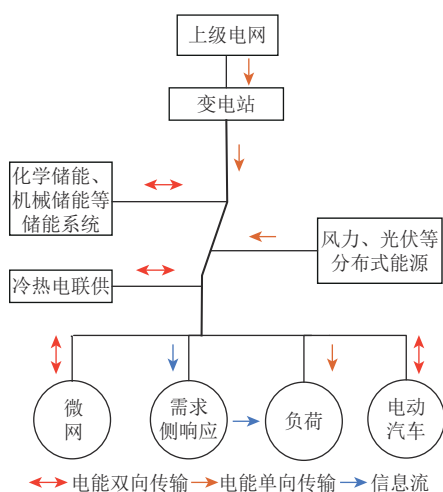


图1 主动配电网基本结构

Fig. 1 Active distribution network

风光互补系统的容量配比还需进一步研究。

需求侧响应与用户用电行为相伴而生,用户可通过响应价格信号或者激励机制改变用电行为,有效促进新能源的消纳^[17]。用户的互动管理是主动配电网区别于传统配电网的显著特征,主动配电网可以通过改变用户的用电方式、负荷柔性控制等实现需求侧管理。目前,大多数规划方案选择特定激励模式的需求侧响应特性,但价格型需求响应在能源消纳方面更具优势。文献[18]根据电动汽车的需求侧响应特性,使电动汽车可以有序充放电,同时考虑分布式电源相关性,对分布式电源和充电桩的投资-运行进行协同配置,可实现对系统负荷峰谷差的调节。

主动配电网考虑多种主动管理方式^[19],在提升系统稳定方面具备明显优势,能够有效应对分布式电源的接入。主动配电网可通过管理电压电流、分布式电源的出力等参数实现主动潮流管理,通过调节变压器分接头、接入无功补偿设备等实现主动电压调整,通过网络重构合理地改变潮流分布。文献[20]考虑有载调压变压器、分组投切电容器等多种主动管理手段,构建主动配电网分层鲁棒规划模型,对主动配电网进行升级改造。

2 主动配电网规划模型

2.1 数学模型

传统配电网规划模型包括最大化变电站所带负荷的变电站模型,最小化线路投资、运行费用的网架规划模型,以及变电站网架联合规划模型^[21]。主动配电网规划模型与传统配电网规划模型相似,但主动配电网在规划阶段不仅要考虑各种不确定性工况,还要考虑多种电源的源-网协调优化问题^[22]。

主动配电网规划模型一般为多目标、非线性的混合整数优化问题。由于不同目标之间可能存在互斥关系,因此主动配电网规划一般采用多层规划模型来解决优化问题。在多层规划模型中,最上层作为规划层面对自身最优目标进行寻优且反馈给下一层,下一层同时考虑上一层的结果进行自身目标的寻优后,将包含自身最优的结果反馈给上一层进行相应调整,通过这种层层递进、

反复循环的过程,形成主目标最优、次目标相对最优的方案。其模型公式表示如下:

$$\begin{cases} \min_{x_1} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \\ h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

x_2 由下面式子得到:

$$\begin{cases} \min_{x_2} f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

...

$$\begin{cases} \min_{x_n} f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \\ h_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (n)$$

式中: $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为规划模型的控制变量; f_i 为规划方案的优化目标; $g_i(\cdot)$ 与 $h_i(\cdot)$ 分别为规划模型的不等式约束与等式约束。

式(1)一般作为规划模型的规划层,是规划方案主要的优化目标;式(2)—(n)一般作为运行层,包含一些次要优化目标,同时帮助主要优化目标达到最优解。

2.2 控制变量

选择控制变量也就是选择进行规划的对象。主动配电网模型的控制变量一般可分为规划层面、运行层面2种。运行层面控制变量一般为电压质量、网络损耗、电源出力等规划方案中需要突显的指标。规划层面控制变量大体可分为2类:一类是电源规划,如分布式电源、充电站等选址定容;另一类是在电源规划的基础上,考虑多种因素且以电网建设为主的综合规划^[23]。

1) 电源规划

电源规划直接影响规划区域配电网的结构及系统运行的经济性、可靠性,合理的电源规划能够保证配电网未来的扩容,并为系统的安全稳定运行提供合适的裕度。例如,文献[24]将能源互联配电网的能源耦合设备和分布式电源的选址定容作为决策变量,所构建模型为电源规划的经济性和可靠性提供了参考。

2) 综合规划

计及多种设备和技术融入的综合规划,考虑

了电源选址定容、网架建设、主动管理等技术协调作用。例如,文献[25]通过建立主动配电网3层模型,将规划环节中的网架建设、分布式电源的选址定容以及不同时段运行管理相结合。文献[26]采用双层规划模型,建立以线路升级改造、分布式电源和储能系统的选址定容为决策变量的上层模型,以各时序场景下分布式电源出力及其功率因数、分组电容投切、变压器分接头档位、负荷削减系数、储能系统充放电功率、智能软开关(soft open point, SOP)各端口有功/无功输出为决策变量的下层模型,从而形成了含SOP主动配电网源-网-荷-储协调的综合规划。

2.3 优化目标

主动配电网的优化目标可以分为经济类目标、技术类目标和环保类目标^[10,27]。

各种设备的投资运维成本、分布式电源运营商收益、配电网运行商收益、网损成本、储能套利、用户利益、用户满意度、弃风弃光成本、主网购电成本等是经济类目标优化的重点,也是规划层面通常考虑的优化目标^[12,24,28]。

技术类目标与规划方案重点关注的领域有关,包括分布式电源接入位置、电源出力及其渗透率,主动配电网电压质量、电压偏差,设备的安全性、可靠性指标等。例如,文献[29]对储能电池总体效率、允许放电深度、使用寿命等技术类目标进行规划。

环保类目标(如可再生能源消纳水平、环境污染指数、碳排放、可再生能源补贴等)近年来逐渐被纳入规划目标中,此类规划目标可转换为经济类指标出现在规划层面或运行层面。

同时,计及经济、技术、环保等多目标规划是近年来研究的热点问题之一^[30-31]。例如,文献[30]以分布式电源渗透率、风光消纳水平、经济效益以及电压偏差指标作为优化目标,建立了多目标规划模型。

2.4 约束条件

由于配电网中规划元素的增加以及主动管理的引入,需同时考虑多方面的约束条件,以保证主动配电网有效运行。约束条件分为等式约束与不等式约束,无论是传统配电网还是主动配电网,

考虑潮流约束及节点电压、支路电流不越限约束等网络安全约束是系统正常运行的基础。

当分布式电源接入主动配电网时,需要考虑接入分布式电源的节点功率平衡、安装数量等约束;当储能接入主动配电网时,需要对储能装置的功率、容量等进行约束;当电动汽车接入主动配电网时,需要对电动汽车的充电效率、充电站容量等进行约束;考虑不同需求响应时,还有调节系数、可中断负荷、激励负荷量等约束。文献[32]将风光储与充电站进行协同规划,考虑对电动汽车的充电需求约束,针对主动管理的方式对变压器分接头档位、次数进行约束,并将场景的机会约束融入潮流计算中,以提高计算效率。

3 主动配电网模型求解算法及多目标处理

3.1 求解算法

传统配电网规划常采用启发式算法,这种算法发展比较成熟完备,但由于其基于直观和经验进行构造,缺少随机元素,给定输入,得到对应的固定输出,因此得到的可行解与最优解的偏离程度一般不可预计。文献[33]为解决主动配电网发生故障时一部分会转化为计划孤岛(即孤岛分割)问题,提出采用前瞻性贪婪算法这种启发式算法求解1-nkp模型。

目前,应用于主动配电网规划模型的求解算法主要分为以下2类^[34]:一类是数学优化算法,这类算法适用于小规模系统,求解精度高,能得到理论上的最优解,但是若系统规模增大,求解难度也随之提高;另一类则是发展迅速的元启发式算法,这类算法适用于大规模系统,计算效率高,通用性强,但是容易陷入局部最优解,计算速度会随系统的增加变得缓慢,并且算法仍依赖经验来选择参数。因此,对元启发式算法的改进问题还需进行研究。

3.1.1 数学优化算法

对于一些线性问题,可直接采用分支定界算法、Benders分解、内点法等数学优化算法,或借助CPLEX、GUROBI、Mosek求解器进行求解。文献[13]所构建模型的决策变量只有2个,约束条件较多,与元启发式算法相比,采用数学优化算

法进行求解更好,因此最终采用动态规划算法解决液流电池的配置问题。

目前,数学优化算法大多采用松弛变换先将非线性问题转化为线性问题,再借助求解器进行求解。文献[11]在目标松弛变换的基础上又采用 ϵ -松弛法,用多面体来近似二阶锥,以提高求解的速度。文献[18-20,35-40]均采用二阶锥松弛变换将非线性问题转化为线性问题,目前研究已证明这种线性化过程并不影响优化精度。文献[35-36]中由于模型采用智能算法时求解效率低下,因此采用二阶锥松弛变换将模型转化为线性度更好的二阶锥模型,并结合Benders分解进行求解。

3.1.2 元启发式算法

对于越来越复杂、规模越来越大的主动配电网模型,元启发式算法尤其是人工鱼群算法、粒子群算法、遗传算法等在求解速度、搜索效率方面表现良好,并且不需要对繁杂的约束条件、目标函数进行处理,已广泛应用于主动配电网规划模型的求解中。但元启发式算法自身存在收敛速度慢、编译复杂、易陷入局部最优、依赖参数等缺点,需要进行改进。目前,对元启发式算法的改进大致分为以下3个方向。

1) 对初始种群进行改进

对目标种群进行优化可以避免伪随机数列的影响,同时减少落后种群不必要的迭代,显著提高求解速度。文献[25]考虑线路数量的不同和可能发生的变化,采用特殊编码方式将线路映射到0~1的连续区间,生成特殊种群,实现快速求解。文献[30]采用Logistic映射生成混沌初始化序列,对种群的位置与速度进行优化,有效地提升了收敛速度和全局寻优的效果。文献[31]采用帐篷混沌映射生成初始种群,针对目标问题对根树优化算法进行改进,提出离散型根树优化算法。

2) 对自身参数进行改进

元启发式算法中的部分参数对搜寻、收敛能力等影响巨大,针对这些参数进行改进,可以提高寻优能力、摆脱局部解、提升收敛速度。文献[41]针对粒子群算法更新公式中惯性权重因子影响全局搜索能力的问题,对惯性权重因子进行改进,将其从1线性降低到0,并在算法中加入交叉

与变异,通过多次计算得到最佳解集。文献[35]针对遗传算法编码方式复杂、求解效率低等问题,提出了基于正态分布思想并结合进化策略中离散重组操作的正态分布交叉(normal distribution crossover, NDX)算子,以代替原有的模拟二进制交叉(simulated binary crossover, SBX)算子对交叉过程进行模拟,提升解的搜索能力,减轻局部最优问题。文献[42]采用混合整数编码算子求解初始个体,采用混合整数变异算子求解变异个体,以提高求解效率。

3) 融合其他算法

融合其他智能算法可以使当前算法拥有所融合算法的显著优点,但同时也要考虑对2种算法融合后的局限性进行改进。文献[5]为减少计算时长,采用差分算法的变异交叉策略替代标准和声搜索算法的音量调整和初始随机选取新解的过程,结合并行计算技术提出了并行差分 and 声搜索算法。文献[43]采用应用于快速非支配遗传算法的快速非支配法,根据各非支配解的拥挤-距离赋值,选择每次迭代中的最优解,得到Pareto最优前沿的一组多样性解集。

3.2 多目标处理

主动配电网规划模型常通过对多目标进行规划得到最优解,求解模型前要对多目标进行处理,处理方式大致分为2种。一种通常出现在采用数学优化算法求解的多目标模型中,这类方案常采用权重系数法^[11-12,18,31,44],在多个目标函数前加上权重,从而转化为单个目标函数。但权重系数的选择通常依靠经验,权重大小的确定较为主观。

另一种则是基于Pareto多目标的智能优化算法^[17,28,30,43]。与权重系数法不同,这种方法是对多目标赋予同样的权重,得到一组处于最优前沿的解集。解集尽可能展现不同目标的多种可能性,规划方案可以通过对某个指标的侧重来选择其中一组解,但这种方法求解时间长、计算量大。文献[43]基于Pareto的多目标改进粒子群算法,得到10种可供决策者选择的最优备选方案集合。

4 主动配电网关键问题的处理

在主动配电网规划设计过程中,普遍出现的

问题是由于规划元素(如分布式电源的出力、电价、负荷需求响应等)存在随机性,给主动配电网实际运行管理带来了不确定性。此外,追求切合实际的方案不仅要考虑传统的投资运营方,还要逐渐向用户、当地管理者、第三方投资者等多个主体倾斜。

4.1 主动配电网不确定性特征处理

在规划方案选择规划元素阶段,分析所选元素的变化特性和规律,对具有不确定性的元件进行模拟建模,模拟越精细,越能体现配电网运行的实际工况^[45]。

模拟建模的方法有2种:一种为体现时序特性的场景分析法,多用于在时间序列上能够呈现一定规律的规划元素建模;另一种为以概率模型为首的数学理论分析方法,常结合大量历史数据,用于在统计层面呈现一定规律的规划元素建模。

4.1.1 场景分析法

场景分析法包含场景的生成与削减2部分^[46]。场景的生成可以用真实的数据或者概率统计数据按照时间序列生成所需场景,对生成的多场景进行分析,可使规划结果更加精确、符合实际。在场景削减中,场景数量的确定存在计算工作量与计算精度间的矛盾。过多的场景可以充分体现数据所含有的特征,体现多样性的同时也造成了计算负担、计算效率低下等问题;过少的场景虽然提升了计算速度,但计算精度下降,使场景多样性、代表性缺失。场景分析法大致分为以下2类:

1) 选取四季典型日场景^[8,20,32,47-49]进行分析。但这类方法选择场景过于简略,将其应用于各季日气候差异不明显的地区,或者是通过计算场景出现概率来选取场景进行分析的方案,存在一定的局限性。将负荷按特性分类,并计及风电、光伏出力特点以及二者之间的互补特性,选择四季典型日场景,可具有更好的参考性^[8]。

2) 基于实际数据或预测数据建立多场景后,通过聚类算法对场景进行削减^[15,17,25,30-31,43,50-51]。这类方法通常因为多种变量物理意义不同,先采用均匀化的方法进行处理,再根据场景数量对单维变量进行聚类,最后对场景进行组合。如何确定方案所需场景数量(即聚类中心数量)、如何组合单

维场景模拟实际场景,是这类方法研究的主要问题。文献[30]采用改进模糊C均值聚类算法对风-光-荷样本进行聚类,在聚类过程中通过计算样本与聚类中心的欧式距离,并利用以此建立的隶属度函数进行分类,重复步骤,以达到场景分类的效果。

在场景数量选择方面,文献[43]采用 k 均值聚类算法将负荷和可再生能源的365种场景聚类为典型场景,引入戴维斯柏丁指数来确定合适的聚类数量。文献[51]除引入戴维斯柏丁指数外,还引入后向场景削减法、联合概率分布,根据最优聚类状态自行设定初始的聚类中心,删减调整聚类中心步骤,并联合时序场景进行聚类,在保证削减后场景拟合精度的同时极大地减少了运算量。

在场景组合方面,通常采用遍历法对场景进行组合,这种方法精度高但计算复杂。针对单维场景的组合,目前考虑分布式电源出力之间的相关性,可为不同场景的组合分析提供参考。如风速较大的天气常伴随着阴天出现,晴空万里的天气风速一般较低。考虑分布式电源出力的相关性,可以使场景组合从首尾顺序组合到有针对性地组合,能够更贴近所模拟实际地区。文献[18,36-37]从变量的角度考虑了相关性。文献[36]首先利用Spearman秩相关系数对不确定性变量之间的概率相关性进行表征,然后通过Cholesky分解进行独立变换,将原始变量转化为相互独立的随机变量,从而可以研究不同不确定性变量之间的相关性对规划决策的影响。

4.1.2 概率模型方法

目前,常采用数学上的概率模型对风速、光照等不确定性量进行模拟,可通过已有概率密度或者通过数学方法模拟出概率密度来描述不确定性,如风速、光照强度分别与Weibull分布、Beta分布相符,通常采用这2种概率模型来模拟风光变化^[52-53]。另外,可在概率模型的基础上结合采样法(如蒙特卡洛、拉丁超立方、重要采样法等)生成模拟风光出力的场景,但采用概率模型在描述其时间相关的特性方面表现较差。文献[18,25,41,44]采用蒙特卡洛模拟对风速、光照进行采样。文献[26,52]则采用拉丁超立方采样对不确定性进行

处理。文献[43]针对风光概率模型进行改进,并在用正态分布模拟的随机负荷基础上加入时序模型,使概率模型能够有效地捕捉时序性,体现各可再生能源与负荷的相关性。

4.1.3 随机网络、模糊理论等方法

除了应用广泛的概率模型以外,区间理论^[38-39,43,48,53]、随机网络理论、模糊理论^[24,29,42]等数学理论也可解决不确定性问题。文献[40]在对光伏采用Beta模型的基础上引入区间分布概率,进一步精确描述其不确定性。文献[28]引入条件风险价值改进置信区间上下限的计算方法,采用条件置信区间表示光伏出力。文献[24]考虑到风光目标函数实际上为随机变量,采用基于Minimin形式的随机机会约束规划模型建立目标函数。

4.2 多利益主体、时间相关规划问题

规划方案与时间长短息息相关,考虑时间的规划可以得到更加精细的规划方案,能够应对不同的工况。与时间相关的规划方案通常包括以下2种:

1) 以年甚至10年为单位的规划问题和以小时为单位的运行问题之间的多时间尺度协调规划方案。文献[33]建立了双层规划模型,上层以长期规划为目标,考虑长期的经济效益、系统可靠性以及环保性;下层以短期运行为目标,考虑不同时段套利以及故障发生后快速恢复的能力。

2) 中长期规划通常指多阶段规划。多阶段规划分为2类:一类为每个阶段分别寻优;另一类为多阶段统一规划,即每个阶段可能不是最优,但可以保证总方案最优。多阶段统一规划的主要难点在于,规划阶段数量、状态变量、参数取值的选择较难,与其他方法相比,优势不明显^[23]。

不同时间尺度之间的相互影响使得多阶段、多时间模型求解更加复杂,因此与时间相关的规划发展缓慢。

由于规划方案更注重经济性,主要考虑投资方的收益,但是多种类型的能源、多样的技术融入意味着主动配电网的规划方案向着考虑多方主体利益的方向发展,通过多方利益博弈得到相对较优的方案^[54]。文献[55]在规划时考虑到电网公司以及第三方公司的利益,可以更好地对分布式电

源和储能装置进行选址定容,决定哪一方对某种能源进行大力投资,实现利益最大化、系统可靠性最优化。

5 结论

1) 主动配电网规划方案的难点在于对规划元素不确定性的处理。不同元素的不确定性差异明显,特别体现在与时间序列的密切相关性上,如分布式新能源的出力、居民的用电行为、电动汽车的使用习惯等。因此,基于时间维度对规划元素进行分析建模,充分反映不同元素的实际运行情况,在一定程度上将不确定性变为规律性,可使规划方案变得更为合理。

2) 在掌握规划元素不确定性的基础上,根据当地电源、负荷及电网特点,考虑各元素间的耦合关系,即不同元素之间的互补与互斥联系。考虑这种相关性的规划方案能使投资、运维等经济性指标显著提升,也可以提高系统的安全可靠性。

3) 在大力开发利用可再生能源的过程中以及在多种能源全面发展的形势下,电能作为不同形态能源的纽带,可以将不同特性的能源进行耦合,使大量多形态的分布式电源接入配电网中,而配电网运行规划与用户的用电可靠性、电能质量直接相关。因此,研究能容纳多种能源、平衡协调出力、满足多种负荷需求的主动配电网规划是发展的必然趋势。随着多种类型能源的并网互动,配电网结构日益复杂,导致控制变量、优化目标、约束条件的数量激增,加剧了计算负担,因此,有效的建模方法和高效的求解手段是解决未来规划方案的关键技术条件。

参考文献

- [1] 季玉琦,王涛,史少戡,等.含分布式电源的配电网功率优化模式影响因素分析[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):97-107.
JI Y Q, WANG T, SHI S Y, et al. Analysis of influencing factors of power optimization modes in distribution network containing distributed generations [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 49(15): 38-46.
- [2] 席向东,侯香臣,萨仁高娃,等.计及电压预测的主

- 动配电网分布式电源在线优化决策方法[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 24-32.
- XI X D, HOU X C, SAREN G W, et al. Online optimization decision algorithm for distributed generations considering voltage prediction in active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 24-32.
- [3] 刘建伟, 李学斌, 刘晓鸥. 有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 476-484.
- LIU J W, LI X B, LIU X O. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 476-484.
- [4] 李振坤, 黄滢, 李谅, 等. 计及需求侧响应的主动配电网多时间尺度优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 36-48.
- LI Z K, HUANG Y, LI L, et al. Multi-time scale optimal dispatching of active distribution network considering demand-side response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 36-48.
- [5] 孙旻, 张大, 余愿, 等. 计及投资方收益与主动配电网管理的分布式光伏电源规划[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 56-62.
- SUN M, ZHANG D, YU H, et al. Planning of distributed photovoltaic generations considering investor benefits and active distribution network management[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 56-62.
- [6] 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 J H, ZENG B, ZHANG Y Y, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [7] 邓正臣. 主动配电网规划研究与综述[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(12): 56-58.
- DENG Z C. Research and summary of active distribution network planning[J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(12): 56-58.
- [8] 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 H J, LIU J Y. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4911-4922.
- [9] 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): 12-18.
- FAN M T, ZHANG Z P, SU A X, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [10] 李睿. 主动配电系统协同规划模型与方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- LI R. Cooperative planning models and methods of active power distribution systems[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [11] 项恩新, 王科, 关静恩, 等. 基于凸松弛的主动配电网储能与无功补偿协同规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 63-69.
- XIANG E X, WANG K, GUAN J E, et al. Collaborative planning for energy storage and reactive power compensation in active distribution network based on convex relaxation method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(10): 63-69.
- [12] 栗世玮, 张谦, 熊炜, 等. 含高渗透可再生能源的动态网络重构与无功电压调整协同优化[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 100-110.
- SU S W, ZHANG Q, XIONG W, et al. Coordination optimization of dynamic network reconfiguration and reactive power voltage regulation with high penetration renewable energy generation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 100-110.
- [13] 方金涛, 龚庆武. 考虑需求响应并计及液流电池动态特性的主动配电网系统储能优化配置[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 1-8.
- FANG J T, GONG Q W. Optimal allocation of energy storage system in active distribution network considering demand response and dynamic characteristics of VRB[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 1-8.
- [14] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
- WEN J Y, ZHOU B, WEI L S. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [15] 李佳蓉, 林今, 邢学韬, 等. 主动配电网中基于统一运行模型的电制氢(P2H)模块组合选型与优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4021-4033.
- LI J R, LIN J, XING X T, et al. Technology portfolio selection and optimal planning of power-to-hydrogen (P2H) modules in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4021-4033.

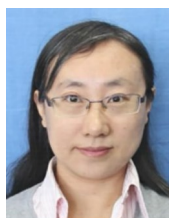
- [16] 蔡黎, 张权文, 代妮娜, 等. 规模化电动汽车接入主动配电网研究进展综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 75-82.
- CAI L, ZHANG Q W, DAI N N, et al. Review on research progress of large-scale electric vehicle access to active distribution network[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 75-82.
- [17] 朱文广, 廖志军, 刘洪, 等. 考虑需求响应与高比例可再生能源接入的主动配电网扩展规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(5): 84-91.
- ZHU W G, LIAO Z J, LIU H, et al. Expansion planning for active distribution network considering demand response and high ratio of renewable energy access[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2019, 31(5): 84-91.
- [18] 刘晋源, 吕林, 高红均, 等. 计及分布式电源和电动汽车特性的主动配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 41-48.
- LIU J Y, LYU L, GAO H J, et al. Planning of active distribution network considering characteristics of distributed generator and electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 41-48.
- [19] 谢仕炜, 胡志坚, 王珏莹, 等. 基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1038-1054.
- XIE S W, HU Z J, WANG J Y, et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1038-1054.
- [20] 高红均, 刘俊勇, 魏震波, 等. 主动配电网分层鲁棒规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1389-1401.
- GAO H J, LIU J Y, WEI Z B, et al. A bi-level robust planning model of active distribution network and its solution method[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1389-1401.
- [21] 王明渊, 何凯, 王木. 基于配网规划等值曲线的输配电网协调规划[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 46-54.
- WANG M Y, HE K, WANG M. Coordinated transmission & distribution network expansion planning based on project-net revenue curve of distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 46-54.
- [22] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 考虑越限风险的主动配电网中DG、SOP与ESS的两阶段协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 71-82.
- WANG J, WANG W Q, WANG H Y, et al. Two-stage coordinated planning of DG, SOP and ESS in an active distribution network considering violation risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 71-82.
- [23] 邢海军, 程浩忠, 张沈习, 等. 主动配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2705-2711.
- XING H J, CHENG H Z, ZHANG S X, et al. Review of active distribution network planning[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2705-2711.
- [24] 赵丽萍, 张书伟, 张雪岩, 等. 基于随机机会约束规划的面向能源互联的主动配电网选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 121-129.
- ZHAO L P, ZHANG S W, ZHANG X Y, et al. Locating and sizing method for energy interconnection oriented active distribution networks based on stochastic chance constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 121-129.
- [25] 刘洪, 郑楠, 葛少云, 等. 内嵌需求响应与优化运行策略的主动配电系统源网协同规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 89-97.
- LIU H, ZHENG N, GE S Y, et al. Coordinated planning of source and network in active distribution system with demand response and optimized operation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 89-97.
- [26] 张忠会, 雷大勇, 李俊, 等. 基于自适应 ε -支配多目标粒子群算法的含SOP的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2199-2212.
- ZHANG Z H, LEI D Y, LI J, et al. Source-network-load-storage bi-level collaborative planning model of active distribution network with SOP based on adaptive ε -dominating multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2199-2212.
- [27] 严艺芬, 吴文宣, 张逸. 主动配电网规划关键问题研究[J]. 电气技术, 2016(11): 1-5.
- YAN Y F, WU W X, ZHANG Y. Important issues in planning of active distribution system[J]. Electrical Engineering, 2016(11): 1-5.
- [28] 温丰瑞, 李华强, 温翔宇, 等. 主动配电网中计及灵活性不足风险的储能优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3952-3962.
- WEN F R, LI H Q, WEN X Y, et al. Optimal allocation of energy storage systems considering

- flexibility deficiency risk in active distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3952-3962.
- [29] DAGHI M, SEDGHI M, AHMADIAN A, et al. Factor analysis based optimal storage planning in active distribution network considering different battery technologies[J]. Applied Energy, 2016, 183: 456-469.
- [30] 张永会, 鹿丽, 潘超, 等. 计及风-光-荷时序特性的主动配电网源-储规划策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 48-56.
- ZHANG Y H, LU L, PAN C, et al. Planning strategies of source-storage considering wind-photovoltaic-load time characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 48-56.
- [31] SANNIGRAHI S, GHATAK S R, ACHARJEE P. Multi-scenario based bi-level coordinated planning of active distribution system under uncertain environment[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019(99): 1.
- [32] 孔顺飞, 胡志坚, 谢仕炜, 等. 计及风光储与充电站的主动配电网双层协同规划[J]. 电测与仪表, 2019, 56(17): 60-68.
- KONG S F, HU Z J, XIE S W, et al. Bi-level collaborative planning of active distribution network considering wind-solar-storage and charging stations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(17): 60-68.
- [33] YU Y, MA S. 1-neighbour knapsack problem and prospective greedy algorithm of intentional islanding in active distribution network[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(3): 568-577.
- [34] 肖白, 郭蓓. 配电网规划研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 200-211.
- XIAO B, GUO B. Review and prospect of distribution network planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 200-211.
- [35] 凌松, 张莹. 计及相关性的主动配电网动态鲁棒规划方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 178-187.
- LING S, ZHANG Y. Research on a dynamic robust planning method for an active distribution network considering correlation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 178-187.
- [36] 韩璟琳, 袁建普, 胡诗尧, 等. 考虑多元随机因素概率相关性的主动配电网规划研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 23-29.
- HAN J L, YUAN J P, HU S Y, et al. Active distribution network planning considering probability correlation of multiple random factors[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 23-29.
- [37] XING H, CHENG H, ZHANG Y, et al. Active distribution network expansion planning integrating dispersed energy storage systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 638-644.
- [38] DONG L, LI J, PU T, et al. Distributionally robust optimization model of active distribution network considering uncertainties of source and load[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1585-1595.
- [39] 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.
- [40] LUO Y, NIE Q, YANG D, et al. Robust optimal operation of active distribution network based on minimum confidence interval of distributed energy beta distribution[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021(2): 423-430.
- [41] MAHDAVI S, HEMMATI R, JIRDEHI M A. Two-level planning for coordination of energy storage systems and wind-solar-diesel units in active distribution networks[J]. Energy, 2018, 151: 954-965.
- [42] 马瑞, 罗心仪, 肖麟祥. 基于随机模糊机会约束的主动配电网分布式风电双层规划模型[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 46-55.
- MA R, LUO X Y, XIAO L X. Distributed wind power bi-level programming model for active distribution network based on stochastic fuzzy chance constraint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 46-55.
- [43] LI R, WANG W, WU X, et al. Cooperative planning model of renewable energy sources and energy storage units in active distribution systems: a bi-level model and Pareto analysis[J]. Energy, 2019, 168: 30-42.
- [44] MOKRYANI G. Active distribution networks planning with integration of demand response[J]. Solar Energy, 2015, 122: 1362-1370.
- [45] 黄亦昕. 考虑严重运行受限场景的含高渗透率可再生能源电网规划研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- HUANG Y X. Research on power system planning with high penetration of renewable energy considering severely restricted scenarios[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

- [46] 徐健玮, 马刚, 高丛, 等. 基于风光场景生成的综合能源系统日前-日内优化调度[J]. 分布式能源, 2022, 7(4): 18-27.
XU J W, MA G, GAO C, et al. Day-ahead and intra-day optimal scheduling of integrated energy systems based on scenario generation[J]. Distributed Energy, 2022, 7(4): 18-27.
- [47] 章姝俊, 钱啸, 白聪, 等. 面向多应用场景的储能系统优化配置方法[J]. 浙江电力, 2022, 41(5): 22-31.
ZHANG S J, QIAN X, BAI C, et al. Optimal configuration method of energy storage system oriented to multiapplication scenarios[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(5): 22-31.
- [48] 任智君, 郭敏铨, 郭红霞, 等. 电源-用户互动模式下的主动配电网分布式电源规划[J]. 可再生能源, 2019, 37(11): 1643-1649.
REN Z J, GUO M H, GUO H X, et al. Active distribution network planning method under power-user interaction mode[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(11): 1643-1649.
- [49] BORGES C L T, MARTINS V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 107-116.
- [50] 初壮, 孙健浩, 赵蕾, 等. 考虑风光与负荷时序特性的主动配电网分布式电源优化配置[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 53-62.
CHU Z, SUN J H, ZHAO L, et al. Optimal configuration of distributed power generation in active distribution network considering the characteristics of wind power and load time series[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 53-62.
- [51] 孙建梅, 胡嘉栋, 蔚芳. 基于改进场景聚类法的主动配电网中分布式电源准入容量规划[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 194-200.
SUN J M, HU J D, YU F. Active distribution network power admission capacity planning based on improved scene clustering method[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(1): 194-200.
- [52] 张沈习, 袁加妍, 程浩忠, 等. 主动配电网中考虑需求侧管理和网络重构的分布式电源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(S1): 1-9.
ZHANG S X, YUAN J Y, CHENG H Z, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 1-9.
- [53] MOKRYANI G, HU Y F, PILLAI P, et al. Active distribution networks planning with high penetration of wind power[J]. Renewable Energy, 2017, 104: 40-49.
- [54] 张翔, 廖海君, 周振宇, 等. 含规模化5G基站租赁共享储能的配电网混合博弈优化调度[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 23-32.
ZHANG X, LIAO H J, ZHOU Z Y, et al. Hybrid game optimal dispatching for distribution network with large-scale 5G base station leasing shared energy storage [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 23-32.
- [55] 郭红霞, 任智君. 考虑不同投资主体储能运行策略的主动配电网多目标规划[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 22-28.
GUO H X, REN Z J. Multi-objective planning for active distribution network considering energy storage operation strategies under different investment entities [J]. Smart Power, 2019, 47(11): 22-28.

收稿日期: 2023-06-25.

作者简介:



刘洪波

刘洪波(1973), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统规划运行、电力系统稳定与控制, liuhb@ncepu.edu.cn;



刘坤诚

刘坤诚(1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为主动配电网规划, 763673068@qq.com。

(责任编辑 尚彩娟)