

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.209

考虑新型设备的配电网规划研究综述

罗旭¹, 罗潇², 温力力¹, 范丽¹, 李博¹, 刘璐桡¹, 刘华勇¹, 任洲洋²

(1. 国网重庆市电力公司经济技术研究院, 重庆 401120;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:随着分布式能源、电动汽车、多能耦合元件等新型设备的接入,配电网呈现出多样化、不确定化和复杂化等新特点。文章围绕新型设备大规模接入下的配电网规划研究展开综述。首先,分析配电网规划中的源-荷功率模拟方法;其次,介绍考虑不同要素的配电网规划模型,并综述多种配电网规划策略与求解算法;最后,结合现有问题,从人工智能和能源互联网两方面,对配电网规划理论与技术的发展做出展望。

关键词:新型设备;配电网规划;优化模型;优化策略

中图分类号: TM315

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)01-035-11

Review of new equipment integrated distribution network planning

LUO Xu¹, LUO Xiao², WEN Lili¹, FAN Li¹, LI Bo¹, LIU Lurao¹, LIU Huayong¹, REN Zhouyang²

(1. Economic & Technology Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401120, P.R. China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: With the integration of renewable energy resources, electrical vehicles, multiple energy coupling equipment and other new elements, distribution network has new characteristics, including diversification, high uncertainty and complexity. This paper reviews the research on the planning methods for new equipment integrated distribution network. Firstly, the simulation approaches of generation power and load power used in distribution network planning are investigated. Secondly, the distribution network planning models considering different factors are introduced. Several optimization strategies and solution algorithms for distribution network planning are also reviewed. Finally, with considering the state-of-the-art and the developments of AI technology and energy internet, the prospect of distribution network planning theories and technologies under new conditions are presented.

Keywords: new equipment; distribution network planning; optimization model; optimization strategy

配电网与绝大部分电力用户相联,直接影响用户的生产生活。为了满足负荷增长和电网发展的需求,传统配电网规划的目的是确定变电站和线路新建或扩容的时间、地点和类型^[1]。

随着能源替代与技术革新的铺开,配电网的新能源渗透率不断提高,电动汽车(electrical vehicle, EV)、

收稿日期: 2021-03-05 **网络出版日期:** 2022-05-20

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2019jcyj-msxm X0092)。

Supported by Natural Science Foundation of Chongqing of China (cstc2019jcyj-msxmX0092).

作者简介: 罗旭(1974—),男,高级工程师,主要从事电力系统规划与设计研究,(E-mail) l417117794@163.com。

储能系统(energy storage system, ESS)、电-天然气/电-热/电-氢气等耦合设备接入,多种配电网主动管理手段被启用^[2-5]。上述变化在缓解环境与能源问题的同时,也使配电网规划面临新的挑战,比如:源荷不确定性进一步增强,规划对象规模剧增,系统特性多样化与复杂化等。

目前,考虑新能源、EV、ESS、多能耦合设备等对象的配电网规划研究主要包含以下 3 个方面:

1)源荷功率模拟。由于电源侧和负荷侧功率均具有随机性和多样性,因此源荷功率模拟是研究配电网规划的基础,其主要涉及到可再生能源出力特性、负荷不确定性等。

2)优化规划模型。面对大规模接入的新型设备,需结合其自身的运行特性,在建立优化规划模型时全面考虑其给配电网带来的新变化,以求获得可靠、经济、环保的规划方案。

3)优化规划策略与求解算法。针对变量规模和随机性都大幅提高的优化规划模型,采用与之相匹配的优化策略及求解算法能够保证模型寻优的精确、高效。

笔者将从上述 3 个方面,围绕新型设备大规模接入下的配电网规划研究展开综述。首先,介绍配电网规划中的源荷功率模拟方法;其次,对配电网规划模型、规划策略与求解算法进行分析;最后,面向人工智能技术和能源互联网,展望新形势下配电网规划可能的发展方向。

1 配电网规划中的源荷功率模拟

配电网稳态运行时,会受到各种不确定性扰动的影响^[6],如图 1 所示。在电源侧,不确定性主要来源于可再生能源出力的间歇性和波动性,以及化石燃料价格的不确定性;在电网侧,大量一次设备的故障发生时间及类型难以准确预测^[7];在负荷侧,用户的用电行为差异性大,并常伴突发状况^[8]。

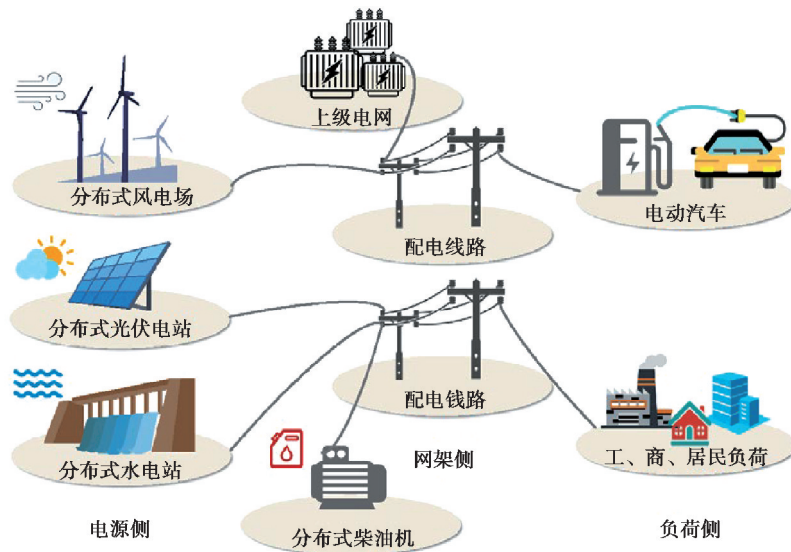


图 1 配电网中的不确定性

Fig. 1 Uncertainty in distribution networks

由于新型设备的不断接入,电源侧和负荷侧的不确定性对配电网规划影响进一步提升。本节将对配电网规划中的源荷功率模拟方法进行综述。

1.1 电源侧功率模拟

电源侧的火电、水电等机组能够实现人为调控,而风电场、光伏电站的输出功率受天气、地形、机组排布方式等多重因素的影响,输出功率预测精度低且具有难可控性。因此,文献重点关注了风光场站的功率模拟。

概率建模是电源功率模拟最常用的方法,风光的概率性通常基于 Weibull 分布和 Beta 分布^[9-11]建模,计及相关性时可采用联合概率分布^[12]或 Copula 函数^[13]。基于概率模型,采用 Monte Carlo 模拟法^[11,14]、拉丁超立方抽样^[9]等抽取离散或连续的功率状态,实现对风光功率的表征。然而,概率分布类型的确定具有主观

性,致使建模精度不足。文献[15]基于贝叶斯非参数模型生成典型的光伏出力统计特征,相较于上述方法,模拟精度有所提高。

模糊分析、区间分析和场景分析法也常用于电源侧不确定性建模。模糊分析法的基本思想是构建合理的风光功率或气象要素的隶属度函数、盒式不确定集^[16]和三角模糊数^[17]常用于描述不确定性。区间分析是将不确定因素描述成一个确定性的区间,文献[2]将风速和风功率描述为预测值和波动量组成的区间形式;文献[18]通过区间分析找到最恶劣的风光出力,用于制定规划方案。场景分析法基于研究对象的不确定性特征,生成若干含有概率的确定性时序场景,其突出特点在于能够模拟对决策影响较大的关键事件。文献[10]利用自回归滑动平均模型生成风光场站的时序运行状态,并通过 Kantorovich 方法筛选典型场景集。文献[19]结合概率分布函数和聚类算法提取风光出力的典型场景。考虑到新能源渗透率的提高,配电网规划对于电源功率的模拟精度提出了更高的要求。在这一背景下,上述方法可能难以准确刻画不确定性因素的高维非线性特征,适用性降低。

与传统算法相比,神经网络算法能够在减少使用复杂数学原理的前提下,深入挖掘变量间的非线性映射关系^[20],在电源功率模拟方面展现出更加良好的性能。为了预测下一年的风速,文献[21]结合风速数据及其统计特征,基于神经网络和模式识别方法依次预测年、月、日和小时级的风速趋势。文献[22]提出了光伏年度发电量预测方法,提取光伏出力特征,并采用特征提取后的数据训练时序模型,生成时序数据,在此基础上,基于多层感知器、卷积神经网络等构建组合预测模型,生成光伏发电量数据。

1.2 负荷侧功率模拟

传统负荷特性与社会经济发展水平、人口规模、气候等条件有关。相较于风光出力模拟,负荷功率模拟研究的开始时间更早,发展也更加成熟,概率与回归建模、模糊分析、场景分析等方法同样适用于此类问题。然而,EV 等新型负荷具有更强的随机性^[23],需要引入新的研究思路适应这一变化。因此,神经网络算法在中长期负荷功率模拟中应用更加广泛。由于相应方法的特点已在 1.1 节详细说明,因此本节仅按照传统算法和神经网络算法对现有方法简要介绍。

1)传统算法。正态分布可用于负荷^[9]、EV 行驶里程和出行时间^[24]的建模。文献[25]采用偏最小二乘回归方法建立负荷预测模型。盒式不确定集、三角模糊数^[16-17]和梯形模糊数^[26]等模糊理论,以及基于聚类的场景生成法^[3,27],也可以用于描述负荷的不确定性。文献[28]以高峰日典型负荷曲线为基础,分别对分布式电源(distributed generation, DG)的可信出力和柔性负荷功率建模,并修正典型负荷峰值。

2)神经网络算法。在长期负荷预测方面,文献[29]提出了基于 Elman 神经网络的长期负荷预测方法。文献[30]基于人工神经网络,构建了用于配电网规划的负荷曲线库。文献[31]基于气温数据和电表负荷数据,采用混合深度学习算法预测未来的负荷功率。文献[32]为了预测馈线的年负荷,选取负荷的影响因素及其特性指标,并对其数据进行降噪和降维处理;之后采用长短期记忆网络和门控循环单元网络进行时序负荷预测。

1.3 小结

综上所述,现有的中长期源荷功率模拟研究存在如下特点:

1)为了减轻计算负担,以概率建模、模糊分析、区间分析、场景分析法为代表的模型驱动方法在配电网规划中被广泛应用。尽管上述方法操作简便,但其存在主观性强、建模精度低等缺陷,难以适应新型设备大规模接入的配电网规划。

2)神经网络算法是一种数据驱动方法,对于难以通过数学公式直观描述的非线性特征,该方法可通过网络训练过程逐步拟合,因此更加适合配电网未来的发展趋势。

3)由于配电网规划的研究时段长,源荷预测考虑的因素更复杂,导致其对精准度的控制逊色于短期预测^[33]。因此,神经网络算法虽已被应用在长期源荷功率模拟中,但相较于短期预测^[34],在数据预处理、训练特征构建、精细化建模^[35]、神经网络结构等方面仍有较大研究空间。

2 配电网优化规划模型

传统配电网大多采用“闭环设计,开环运行”的方式,电源即为上级变电站,线路组成配电网络,用户为传

统的工业、商业和居民负荷^[36]。现代配电网的规模更大,优化变量类型更多,建模方法也更加复杂。一般地,配电网规划模型需重点关注规划对象、目标函数、约束条件等要素。本节从上述要素出发,针对传统配电网和考虑新型设备与主动管理手段的配电网规划模型分别进行综述,并总结不同规划模型的特点。

2.1 传统配电网规划模型

传统配电网规划主要是为满足未来年负荷增长和电网发展需求,确定何时何地新建或扩建何种类型的线路、变电站和新增电源等设备。传统配电网的规划可分为电源规划、网架规划和源网协同规划等类型。

传统的配电网电源规划主要以变电站、无功电源为研究对象,从经济性、可靠性等角度出发建立优化规划模型。电源规划模型一般以经济成本最小为目标,包括投资成本、设备维护成本、网损成本等,并考虑规划对象出力约束、调度约束、潮流约束以及投资约束、容量约束、位置约束^[37]等运行和技术约束条件。文献[38]建立了以变电站及其低压侧线路初始投资和运行年费用最小为目标的选址定容模型,并在约束条件中计及变电站负载率和供电半径等。文献[39]针对经济性因素,以设备全寿命周期成本最小为目标建立了变电站规划模型。上述传统电源规划模型只考虑了确定型负荷,难以直接用于接入的柔性负荷的配电网规划。

传统网架规划问题的核心是根据负荷和网架的发展需求,对网架结构进行调整,或对线路容量扩容。文献[17]所构建的网架规划模型以含 DG 的配网馈线建设成本和网损成本期望值最小为目标,在约束条件中保证了辐射形网架拓扑。

上述独立规划方法固然可降低建模与求解维度,然而,电源与网架在电能输送、成本优化、资源整合等方面具有较强的耦合关系。因此,在规划中同时考虑电源与网架,建立源网协同规划模型就显得尤为重要。文献[40]建立了投资、运行总成本最小的综合规划模型,为降低求解难度,将混合整数非线性规划模型转化为二次约束规划模型进行求解;文献[41]将配电网规划问题分解为中压变电站规划和高压变电站与中压馈线规划 2 个子问题,并采用了特殊编码的遗传算法改进了其全局最优解的有效性。

2.2 考虑新型设备与主动管理手段的规划模型

随着 DG、EV、ESS、多能耦合设备等新型设备的大规模接入,以及主动管理手段在配电网中的启用,与传统配电网相比,现代配电网具有随机性强、设备规模大、特性复杂等新特点,由此造成了配电网规划模型的非线性、多约束、高维度等特征。围绕上述特点,下面将对含新型设备与主动管理手段的配电网规划模型进行综述。

DG 的发展对电源功率预测、配电网潮流流向、电源组成等带来了大量的不确定性因素,如何合理规划 DG 的容量和位置,使其与电网扩展规划相配合,是目前主动配电网规划面临的主要难点。文献[42]从经济性角度对含 DG 的 ADN 规划技术进行阐述;文献[43]利用了场景分析技术解决 DG 出力不确定性和间歇性问题,建立了考虑 DG 运行的配电网双层规划模型。文献[44]建立了以系统有功损耗最小为目标的 DG 优化配置模型,并基于锥优化算法求解,大大提升了规划模型的求解效率。

EV 的充电行为和模式具有强随机性,但其具有储能特性,能够作为可调控的需求响应资源^[3]。文献[3]在考虑配电网建设和运维成本的基础上,重点研究了 EV 充放电对系统潮流平衡的影响。对于多类型充电桩的协调互补规划问题,文献[45]考虑了 EV 分布不平衡情况下的充电需求和充电距离,建立了多类型充电桩整体规划模型,使得规划结果更加贴合实际。

ESS 响应速度快、调节精度高,能够实现能量的时空转移^[46],然而 ESS 造价高昂,需对其接入点和容量进行合理规划。文献[2]建立了 ESS 在配电网中的选址定容优化模型,将 ESS 的功率约束、运行约束和容量约束加入模型中,在保证风电全部消纳的同时,提高配电网的经济性。

在多能耦合互补的趋势下,电燃气、冷热电耦合设备将使配电网与气网、热网等网络深度融合^[47],这将改变配电网的形态与规划策略。另外,随着主动潮流管理、主动电压调整和需求侧管理等主动管理手段的应用^[48],配电网的规划及调度手段更加多样化。因此,考虑 EV、ESS、多能耦合设备、主动管理手段的配电网规划将是未来一段时间内的研究重点。文献[5]通过设计多能源接口和 ESS,同时考虑多能耦合设备和 ESS 的运行约束,从而优化规划成本和切负荷量。文献[49]综合考虑了电、水、气网络规划,建立了 DG 与供能网络联合规划模型。文献[50]针对综合能源系统中燃气锅炉、燃气机组及发电机组等能量转换器,提出了一种综合能源系统拓展规划方法,并验证了其有效性。文献[51]建立了一种考虑热能-流量约束及热损平衡约束的

热网模型,在此基础上针对多区域冷热电联供机组进行选址定容。

2.3 小结

综上,两类规划模型的规划要素和优化目标可直观总结如图 2 所示。

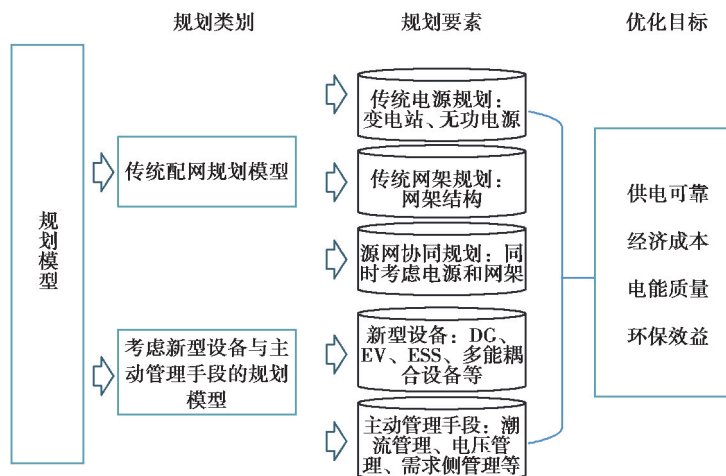


图 2 配电网规划模型

Fig. 2 Planning models of distribution networks

对于传统配电网规划模型,其建模思路仍可沿用至现代配电网规划中,诸如潮流约束、线路容量约束、节点电压约束等基本约束条件仍然适用。然而,传统配电网中的规划对象单一,规划对象间相对独立,此类模型难以考虑规划中源-网-荷-储的灵活互动与耦合特征,对于新型设备的特点及其接入带来的挑战,此类模型显然无法充分应对。

对于第二类模型,由于每类新型设备具有不同特征,因此详细总结其难点及研究重点:

1)与火电、水电机组相比,DG 具有更强的不确定性和难可控性。因此,在配电网规划中准确量化 DG 给配电网供电带来的风险,合理确定 DG 与上级变电站容量的配比,有助于电力系统碳排放的降低。另外,由于分布式能源接入传统辐射状配网后,会带来频率调节能力弱和电压控制困难等问题,现有的配网形态无法满足未来配网发展需求^[52]。有学者指出,将传统的辐射状网络发展为灵活可控的环形网络是促进分布式能源接入的重要方式和必然趋势^[53]。

2)尽管 EV 具有储能特性,但其单体容量远小于配电网负荷总功率,若希望将 EV 用于配电网功率的调节,需要发挥其数量优势。然而,EV 的随机性使得对其群体调度十分困难。如何在配电网规划中,化零为整,整合 EV 的储能资源,是含 EV 的配电网规划中需要面对的难题。

3)ESS 能够对电能实现较大规模的储存,因而可用于平抑 DG 出力波动、削峰填谷等。但是,ESS 目前的成本较高,不利于配电网的经济性。所以,在配电网规划中,权衡 ESS 的成本与收益、合理配比不同类型的储能容量、通过市场化手段对储能进行定容与调控、充分发挥其与源/网/荷的互动能力等,均可促进 ESS 的大规模发展。

4)多能耦合设备作为沟通不同能量系统的纽带,其容量和接入位置对于多能耦合系统的运行具有决定性作用。并且,不同能源形式的转化与传输,丰富了配电网中电能的调配与储存方式。考虑多能耦合设备接入后,更加剧配网形态演变的需求和趋势。因此,研究适用于电、天然气、冷热、氢气等异质能源互联的配电网形态及其规划方法,可作为目前配电网规划中重要的研究方向。

3 配电网优化规划策略与求解算法

基于不同的规划模型与对象,需要选择条理清晰的优化策略,并采用高效准确的求解算法。本节将综述 4 种配电网优化规划策略及其求解算法。

3.1 单层规划方法

单层规划方法可处理单目标优化问题,或加权后的多目标优化问题。文献[26]从经济、技术和环境三方

面建立 DG 选址定容多目标优化模型,采用实数对 DG 的接入点、容量和技术参数编码,并基于带有精英策略和非支配排序的遗传算法求解。

该类方法规模相对较小,求解便捷,但优化对象的时间尺度等较为单一,难以在规划中考虑配网的运行状况。

3.2 多层规划方法

多层规划方法可按照规划、运行等不同尺度,或不同利益主体,构建 2 层及以上的优化模型,不同层间利用传递变量传递优化结果,总结了 2 种不同的建模思路。

一方面,按照规划尺度和运行尺度分别构建主模型和子模型。文献[10]的双层模型分别优化了风-光-储联合系统的规划策略和运行策略,并将其中的非线性约束条件做线性化和松弛处理,转化为混合整数二阶锥规划求解。文献[46]将 ESS 的选址定容与充放电策略分别作为主模型和子模型的优化对象,将 ESS 容量和最大充放电功率作为 2 层模型的传递变量,采用遗传算法求解。

另一方面,根据配电网规划中的不同利益主体建立多层优化模型。文献[54]针对多利益主体建立 3 层优化模型,分析了 3 个利益主体之间的静态和动态博弈关系,结合迭代搜索法和极大极小值法求解博弈行为的纳什均衡点。

双层和多层规划方法可降低每一层的变量规模,模型意义清晰。然而,该类方法构建的优化模型整体规模较大,需要不断迭代得到每一层模型的最优解,求解复杂度相对较高。

3.3 多阶段规划方法

实际工程中,电网规划的跨度通常为 5~15 年,需要逐步构建合理可靠的电网^[47];在理论研究中,现有文献考虑社会、经济、负荷等动态因素在规划期内的变化,提出了多种多阶段规划方法。

文献[27]提出的主问题为配电网多阶段规划问题,子问题为考虑配网重构的运行问题,基于 Benders 分解方法对主问题和子问题迭代求解。文献[28]同样构建了双层多阶段规划模型,主模型优化完整规划期内的投资成本,子模型优化规划期内各个阶段的运行策略。该模型将传统粒子群算法和快速非支配遗传算法相结合,求解多阶段规划模型。文献[3]将多阶段规划模型转化为两类单阶段规划模型。第一类模型仅用于规划期末,确定规划期的整体规划方案;第二类从规划期倒数第二年到规划初期倒序应用,确定设备新建和升级的实施年份。

多阶段规划方法从动态视角制定配电网的规划策略,以各阶段结束时的规划方案作为下一阶段的起始状态,能够计及不同阶段间动态因素的变化。

3.4 不确定性规划方法

不确定性规划的核心是将含有不确定性变量的模型转化为若干确定性规划模型,从而降低求解难度。现有的不确定性规划方法包括鲁棒优化、模糊理论、区间分析、随机规划、场景分析等,该类规划方法最适用于当前不确定性逐步增强的配电网规划问题。

在最极端场景下,文献[16]采用内点法对双层鲁棒优化模型迭代求解。文献[2]基于二阶锥松弛技术将所提模型凸化,之后采用鲁棒对偶转化方法,将双层凸规划问题转化为单层凸规划模型。

文献[17]构建的模糊期望值模型中,将不等式约束作为惩罚函数加到目标函数中,利用遗传算法求解。为了避免中压配网负荷预测的误差,文献[48]采用负荷上下限计算确定性潮流,得到配网扩展规划投资与网损总成本的区间值。

文献[55]提出了一种光伏场站和 ESS 接入低压配网的随机规划方法。每次求解迭代基于低压配网装机容量的历史统计数据,随机在负荷节点中选择场站的接入点和容量。

3.5 小结

综上,4 种规划策略的基本原理对比如图 3 所示。

由于配网规划问题的复杂性带来求解模型非线性化和优化目标多样化,使用传统的数学优化算法和启发式算法往往会导致模型维数灾难,求解效率下降等问题^[56]。深度强化学习是人工智能领域的一个新的研究热点,它以一种通用的形式将深度学习的感知能力与强化学习的决策能力相结合^[57],但应用至规划领域尚处于探索阶段,目前只有少部分强化学习应用于包含简单策略集的规划问题的研究^[58]。深度强化学习可

以克服强化学习策略表征能力差,无法解决大状态空间策略集等问题^[57-59],未来有望在配网规划领域实现突破。

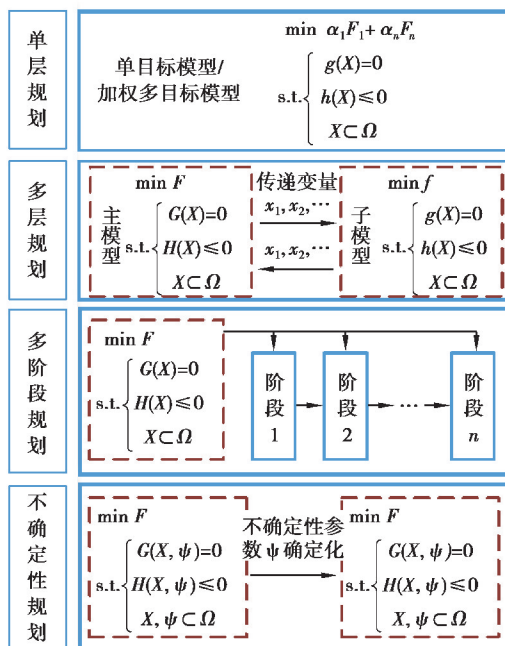


图 3 配电网规划策略

Fig. 3 Planning strategies of distribution networks

4 总结与展望

4.1 总结

文章围绕配电网规划问题,从源荷功率模拟、规划模型、优化策略与求解算法综述了配电网规划的研究现状,从中可总结如下问题:

- 1) 由于配电网规划横跨时段长,源荷功率变化明显,现有方法缺少对规划期内源荷功率的精细化、个性化、多元化模拟方法,致使规划建模没有足够精确的依据。
- 2) 随着配电网规模的增大、接入配电网设备的随机性和多样性增强,配电网规划建模与求解愈发困难,目前的优化策略及求解算法可能难以应对这一趋势。
- 3) 随着多能源的深度耦合,电网在能源互联网体系中必将发挥主干作用。然而,现有的配电网形态可能无法满足能源转换与集成的要求,这将阻碍能源的输送与消纳。

4.2 展望

人工智能技术与能源互联网的发展,能够从算法和能源融合 2 个层面,为配电网提供新的发展方向,以适应中国能源革命和电网建设的发展趋势。针对现有问题,从人工智能和能源互联网两方面考虑,未来配电网规划存在如下 3 个潜在的研究方向:

- 1) 充分借鉴深度学习算法在短期源荷功率预测中的思路,准确评估中长期预测的多元影响因素及其耦合关系和特性,发展基于深度学习的中长期概率预测或场景分析方法,提高源荷功率的模拟精度。
- 2) 将深度强化学习应用至配网规划领域,提高配网规划方案的制定效率。
- 3) 为了充分发挥配电网在能源互联网中的枢纽作用,应基于现有的辐射状结构,探索适应多能耦合特点的配电网新形态及规划方法,以提高能源的转换效率与传输能力。

参考文献:

- [1] 孔涛,程浩忠,李钢,等. 配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 92-99.
Kong T, Cheng H Z, Li G, et al. Review of power distribution network planning[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 92-99.(in Chinese)
- [2] 朱嘉远,刘洋,许立雄,等. 风电全消纳下的配电网储能可调鲁棒优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1875-1883.
Zhu J Y, Liu Y, Xu L X, et al. Adjustable robust optimization for energy storage system in distribution network based on wind power full accommodation[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1875-1883.(in Chinese)
- [3] 曾鸣,于壮状,闫彤,等. 计及电动汽车负荷的智能配电系统多阶段规划模型研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(4): 63-70.
Zeng M, Yu Z Z, Yan T, et al. Study on multi-stage planning method for intelligent power distribution system considering PEV load[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(4): 63-70. (in Chinese)
- [4] Shen X W, Shahidehpour M, Zhu S Z, et al. Multi-stage planning of active distribution networks considering the co-optimization of operation strategies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1425-1433.
- [5] 张雪松,周旋,李卓,等. 面向能源互联网的配电网优化规划[J]. 电力建设, 2017, 38(2): 45-51.
Zhang X S, Zhou X, Li Z, et al. Optimization planning of future distribution network orienting to energy Internet [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 45-51.(in Chinese)
- [6] Verdejo H, Escudero W, Kliemann W, et al. Impact of wind power generation on a large scale power system using stochastic linear stability[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(17/18): 7977-7987.
- [7] Aizpurua J I, Stewart B G, McArthur S D J, et al. Improved power transformer condition monitoring under uncertainty through soft computing and probabilistic health index[J]. Applied Soft Computing, 2019, 85: 105530.
- [8] Yu S Y, Fang F, Liu Y J, et al. Uncertainties of virtual power plant: problems and countermeasures[J]. Applied Energy, 2019, 239: 454-470.
- [9] 王少轩. 面向农网高比例光伏消纳的储能和需求响应优化配置研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
Wang S X. Optimal configuration research of energy storage and demand response for high-proportion PV consumption in rural power grids[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)
- [10] 石玉东,刘晋源,徐松,等. 考虑时序特性的配电网风-光-储随机规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 23-32.
Shi Y D, Liu J Y, Xu S, et al. Integrated wind-photovoltaic-storage stochastic planning model considering time-varying characteristics in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 23-32.(in Chinese)
- [11] Gangwar P, Singh S N, Chakrabarti S. Multi-objective planning model for multi-phase distribution system under uncertainty considering reconfiguration[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(12): 2070-2083.
- [12] 张沈习,李珂,程浩忠,等. 主动管理模式下分布式风电选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 208-214.
Zhang S X, Li K, Cheng H Z, et al. Siting and sizing planning of distributed wind generators under active management mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 208-214.(in Chinese)
- [13] Sun M Y, Cremer J, Strbac G. A novel data-driven scenario generation framework for transmission expansion planning with high renewable energy penetration[J]. Applied Energy, 2018, 228: 546-555.
- [14] 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.
- [15] Ma Y J, Azuatalam D, Power T, et al. A novel probabilistic framework to study the impact of photovoltaic-battery systems on low-voltage distribution networks[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113669.
- [16] 张海鹏,林舜江,刘明波. 考虑光伏不确定性的低压配电网分散无功补偿鲁棒优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3880-3888.
Zhang H P, Lin S J, Liu M B. Robust optimal allocation of reactive power compensation in low voltage distribution networks considering uncertainty of photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3880-3888. (in Chinese)
- [17] 颜炯,万涛,李浩松,等. 计及不确定性因素的配电网网架规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 76-81.
Yan J, Wan T, Li H S, et al. Distribution network planning considering the uncertainties[J]. Power System Protection

- and Control, 2017, 45(18): 76-81.(in Chinese)
- [18] 蔡佳铭, 张涛, 王承民, 等. 计及源荷不确定性的主动配电网网架扩展柔性规划[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 109-115.
Cai J M, Zhang T, Wang C M, et al. Flexible planning of active distribution network expansion considering source and load uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 109-115.(in Chinese)
- [19] Santos S F, Fitiwi D Z, Bizuayehu A W, et al. Novel multi-stage stochastic DG investment planning with recourse [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 164-178.
- [20] Wang R H, Li C S, Fu W L, et al. Deep learning method based on gated recurrent unit and variational mode decomposition for short-term wind power interval prediction[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(10): 3814-3827.
- [21] Azad H B, Mekhilef S, Ganapathy V G. Long-term wind speed forecasting and general pattern recognition using neural networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 546-553.
- [22] Eom H, Son Y, Choi S. Feature-selective ensemble learning-based long-term regional PV generation forecasting[J]. IEEE Access, 2020, 8: 54620-54630.
- [23] 韩天轮. 考虑电动汽车负荷影响的配电网规划及运行研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
Han T L. Research on distribution network planning and operation costsidering the influence of electric vehicle[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)
- [24] 沈依婷, 张菁, 武鹏, 等. 含电动汽车的配电网双重不确定性网架规划方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 139-146.
Shen Y T, Zhang J, Wu P, et al. Bi-uncertainty network frame planning method for distribution network with electric vehicles[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 139-146.(in Chinese)
- [25] 黄珊. 配电网规划的回归分析负荷预测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
Huang S. Research of load forecasting method based on regression analysis in distribution network planning [D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese)
- [26] 曾鸣, 杜楠, 张鲲, 等. 基于多目标静态模糊模型的分布式电源规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 954-959.
Zeng M, Du N, Zhang K, et al. Distributed generation planning based on multiobjective static fuzzy model[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 954-959.(in Chinese)
- [27] 吴志, 刘亚斐, 顾伟, 等. 基于改进 Benders 分解的储能、分布式电源与配电网多阶段规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4705-4715, 4973.
Wu Z, Liu Y F, Gu W, et al. A modified decomposition method for multistage planning of energy storage, distributed generation and distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4705-4715, 4973.(in Chinese)
- [28] 马艳霞, 车彬, 孟旭红, 等. 基于多目标的多阶段主动配电网规划方法分析[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(10): 62-67.
Ma Y X, Che B, Meng X H, et al. Analysis of multi-stage active distribution network planning method based on multi-objective[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10): 62-67.(in Chinese)
- [29] 陈潇雅, 刘志坚, 刘晓欣, 等. 基于长期负荷预测和联络分析的配电网规划[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 59-65.
Chen X Y, Liu Z J, Liu X X, et al. Distribution network planning based on long-term load forecasting and Tie-line analysis [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 59-65.(in Chinese)
- [30] Georgescu G. Aspects concerning power distribution networks planning using artificial intelligence[C]//14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 1997- Distributing Power for the Millennium). IEEE, 1997: 1-5.
- [31] Motepe S, Hasan A, Stopforth R. Improving load forecasting process for a power distribution network using hybrid AI and deep learning algorithms[J]. IEEE Access, 2019, 7: 82584-82598.
- [32] Dong M, Grumbach L. A hybrid distribution feeder long-term load forecasting method based on sequence prediction [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 470-482.
- [33] 王洋. 智能电网的负荷预测与定价研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2016.
Wang Y. Study on load forecasting and pricing of smart grid[D]. Qingdao: Qingdao University, 2016. (in Chinese)
- [34] 陆继翔, 张琪培, 杨志宏, 等. 基于 CNN-LSTM 混合神经网络模型的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 131-137.
Lu J X, Zhang Q P, Yang Z H, et al. Short-term load forecasting method based on CNN-LSTM hybrid neural network

- model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 131-137.(in Chinese)
- [35] 邓永生, 焦丰顺, 张瑞锋, 等. 配电网规划中电力负荷预测方法研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(14): 1-7.
Deng Y S, Jiao F S, Zhang R F, et al. Research review on power load forecasting methods in distribution network planning[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(14): 1-7.(in Chinese)
- [36] 王成山, 王瑞, 于浩, 等. 配电网形态演变下的协调规划问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2385-2396.
Wang C S, Wang R, Yu H, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2396.(in Chinese)
- [37] Wang S C, Sun Y Y, Li Y H, et al. Optimal planning of distributed generation and loads in active distribution network: a review[C]//2020 4th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA). IEEE, 2020: 176-181.
- [38] 刘洪, 王博, 李梅菊, 等. 基于改进加权 Voronoi 图算法的有源配电网变电站规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 45-52.
Liu H, Wang B, Li M J, et al. Substation planning of active distribution network based on improved weighted voronoi diagram method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 45-52.(in Chinese)
- [39] 苏海锋, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于 GIS 空间分析与改进粒子群算法的变电站全寿命周期成本规划[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 92-99.
Su H F, Zhang J H, Liang Z R, et al. Substation life cycle cost planning based on the GIS spatial analysis and improved PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 92-99.(in Chinese)
- [40] Franco J F, Rider M J, Romero R. A mixed-integer quadratically-constrained programming model for the distribution system expansion planning[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 62: 265-272.
- [41] Najafi S, Hosseinian S H, Abedi M, et al. A framework for optimal planning in large distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 1019-1028.
- [42] Wang S C, Sun Y Y, Li Y H, et al. Optimal planning of distributed generation and loads in active distribution network: a review[C]//2020 4th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA). IEEE, 2020: 176-181.
- [43] Gao Y J, Hu X B, Yang W H, et al. Multi-objective bilevel coordinated planning of distributed generation and distribution network frame based on multiscenario technique considering timing characteristics[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1415-1429.
- [44] 霍凯龙. 大规模配电网变电站多阶段规划优化实用方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Huo K L. Study on practical method of multi-stage planning optimization for a large-scale distribution substation system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [45] 段庆, 孙云莲, 张笑迪, 等. 电动汽车充电桩选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 88-93.
Duan Q, Sun Y L, Zhang X D, et al. Location and capacity planning of electric vehicles charging piles[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 88-93.(in Chinese)
- [46] 王彦虹. 风储联合系统中储能选址定容及控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Wang Y H. Research on the control strategy and optimal sizing of the battery storage in the wind-storage hybrid system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [47] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
Wang Y, Zhang N, Kang C Q. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.(in Chinese)
- [48] 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.(in Chinese)
- [49] Zhang X J, Karady G G, Ariaratnam S T. Optimal allocation of CHP-based distributed generation on urban energy distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 246-253.
- [50] Zhang X P, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [51] 王珺, 顾伟, 陆帅, 等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 17-24.
Wang J, Gu W, Lu S, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network

- model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24.(in Chinese)
- [52] Britain's Power System: The case for a system architect[EB/OL].<http://www.theiet.org>.
- [53] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
Ma Z, Zhou X X, Shang Y W, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.(in Chinese)
- [54] 杨楠,董邦天,黄禹,等. 考虑不确定性和多主体博弈的增量配电网源网荷协同规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2689-2702.
Yang N, Dong B T, Huang Y, et al. Incremental distribution network source-load collaborative planning method considering uncertainty and multi-agent game[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2689-2702.(in Chinese)
- [55] Hadjsaid A, Alvarez-Herault M C, Debusschere V, et al. Integrating storage in planning of LV distribution networks with PV production[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(1): 79-86.
- [56] 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, 217.
Xiao B, Guo B. Review and prospect of distribution network planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 200-211, 217.(in Chinese)
- [57] 刘全,翟建伟,章宗长,等. 深度强化学习综述[J]. 计算机学报, 2018, 41(1): 1-27.
Liu Q, Zhai J W, Zhang Z C, et al. A survey on deep reinforcement learning[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(1): 1-27. (in Chinese)
- [58] 王渝红,胡胜杰,宋雨妍,等. 基于强化学习理论的输电网扩展规划方法[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2829-2838.
Wang Y H, Hu S J, Song Y Y, et al. Transmission expansion planning based on reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2829-2838.(in Chinese)
- [59] 万里鹏,兰旭光,张翰博,等. 深度强化学习理论及其应用综述[J]. 模式识别与人工智能, 2019, 32(1): 67-81.
Wan L P, Lan X G, Zhang H B, et al. A review of deep reinforcement learning theory and application[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 32(1): 67-81.(in Chinese)

(编辑 詹燕平)