

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200729

考虑源-网-荷不确定性的增量配电网规划研究综述

伍也凡^{1,2}, 刘浩田^{1,2}, 肖振锋^{1,2}, 陈仲伟^{1,2}, 刘鹏³, 侯慧³, 唐爱红³, 崔戎舰^{3,4}

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410004; 2. 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004; 3. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 4. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 随着电力体制改革的全面深化, 具有清洁性、智能性与竞争性的增量配电网应运而生。增量配电网不仅结构灵活, 同时鼓励多种具有间歇性的分布式电源与新型负荷接入配电网侧。传统配电网的规划技术已难以适应源-网-荷均存在不确定性的增量配电网。基于以上现状, 在考虑源-网-荷不确定性的前提下对增量配电网规划研究进行综述。分别从增量配电网中新型源-网-荷发展现状, 适用于增量配电网规划阶段的不确定性分析方法和常见的规划研究方法等三个方面进行归纳分析。最后给出了考虑源-网-荷不确定性的增量配电网规划总结与未来展望。
关键词: 增量配电网; 源-网-荷; 不确定性分析; 规划技术; 分布式电源

Review of incremental distribution network planning considering the uncertainty of source-network-load

WU Yefan^{1,2}, LIU Haotian^{1,2}, XIAO Zhenfeng^{1,2}, CHEN Zhongwei^{1,2}, LIU Peng³, HOU Hui³, TANG Aihong³, CUI Rongjian^{3,4}

(1. Research Institute of Economics and Technology of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China;
2. Hunan Key Laboratory of Energy Internet Supply and Demand Operation, Changsha 410004, China;
3. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
4. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd., CPECC, Wuhan 430071, China)

Abstract: Given an ever increasing power system reform, a clean, intelligent and competitive incremental distribution network emerges as is now required. The incremental distribution network not only has flexible structure, but also encourages a variety of intermittent distributed generation and new loads to access the distribution network side. Traditional distribution network planning technology has found it difficult to adapt to the incremental distribution network with source-network-load uncertainties. Given this, the incremental distribution network planning research is reviewed with particular consideration of source-network-load uncertainties. The development status of new source-network-load in an incremental distribution network, the uncertainty analysis methods suitable for incremental distribution network planning stage and common planning research methods are summarized and analyzed. Finally, the summary of and prospect for incremental distribution network planning considering source-network-load uncertainties are given.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5216A220000F).

Key words: incremental distribution network; source-network-load; uncertainty analysis; planning technology; distributed generation

0 引言

国家发展改革委、国家能源局于2015年颁布了《中共中央国务院关于进一步深化电力体制改革的

若干意见》^[1], 鼓励和引导社会资本投资增量配电业务, 并将增量配电网建设作为电力体制改革的下一步工作重心。次年, 国家发展改革委、国家能源局确定了延庆智能配电网等105个项目作为第一批增量配电业务改革试点项目^[2], 开始探索增量配电网规划、建设与运营的合理模式与方法^[3]。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5216A220000F)

顾名思义,增量配电网(Incremental Distribution Network, IDN)即为新建设的配电网工程,目前主要涵盖了配电网线路新建工程与分布式电源(Distributed Generation, DG)接入工程等^[4]。相对而言, IDN 中新建线路规划方法与传统配电网(Traditional Distribution Network, TDN)中所对应的规划方法基本相似。另一方面,受益于电力改革政策,作为独立运营主体的 IDN 被赋予了发电资质,可以直接与电力用户进行交易^[1],这将吸引大量社会资本在 IDN 中投资建设 DG,从而获得更多收益。但在 DG 渗透率逐渐升高的背景下,如何在 IDN 中对 DG 进行合理有效规划,使其能满足 IDN 经济、稳定与安全运行,已经成为限制 IDN 快速发展的一大难题^[5]。

IDN 鼓励清洁、智能与创新,相对 TDN 而言, IDN 中电源侧、电网侧与负荷侧均出现较大程度变化^[6]。在电源侧,上级电网提供的电能将不再作为 IDN 的主要供电电能,而 DG 以其建设周期短、投资成本低与绿色低碳效益等优势,逐渐成为 IDN 中广受青睐的电源^[7-9]。在电网侧, IDN 吸收了主动配电网(Active Distribution Network, ADN)的先进技术,根据当前运行状态,通过灵活的网络拓扑结构调动配电网中抽头、开关与无功补偿器等设备,保证供电可靠性与电能质量^[6,10-11]。在负荷侧,不再单纯以工业、农业、商业与居民等负荷特性去描述配电网中的负荷出力,大量可与配电网进行互动的新型负荷与新型技术如雨后春笋般出现,彻底改变了配电网的负荷特性^[12-13]。

因此,不同于 TDN 在规划时所涉及的具有相对恒定特性的源-网-荷, IDN 规划需要在开放的电力市场环境下,考虑在具有不确定性的风光出力、配电网运行状态与新型负荷互动等条件下进行。这将使得 IDN 规划难度加大,极大地影响了其科学价值与综合效益^[14]。国内外不少科研工作者针对 IDN 规划中所涉及的“源-网-荷”不确定性进行了深入的探索研究^[15]。本文将结合最新的研究成果,对考虑源-网-荷不确定性的 IDN 规划技术研究进行系统分析与总结,大致可以分为三个层面:新型源-网-荷发展现状;源-网-荷不确定性分析方法; IDN 常见规划方法。最后展望了考虑源-网-荷不确定性的 IDN 规划技术的未来发展方向。

1 新型源-网-荷发展现状

1.1 电源侧

我国在《能源发展“十三五”规划》中提出,应大力发展非化石能源,推动清洁低碳的可再生能源成为能源结构转型的主体增量,借助我国各地区

资源禀赋的特点,因地制宜地大力拓展可再生能源在电力系统中的应用^[16]。国际大电网会议(CIGRE)认为, DG 一般是指接入在配电网中装机容量小于 50 MW,并且靠近负荷侧的分散型发电装置^[17]。因此, DG 能够借助其成本低廉、安装简便以及就地消纳等特点,充分利用当地的可再生资源,向用户提供“绿色电力”,在配电网领域中具有广阔的应用前景^[18]。《可再生能源发展“十三五”规划》提出了非化石能源于 2030 年将占一次能源消费比重的 20% 的目标,并确保全国风电与光伏并网装机容量要于 2020 年底分别达到 2.1 亿 kW 与 1.1 亿 kW 以上。由此可见,以风能和太阳能为主的 DG 发电已在我国能源结构中占据了举足轻重的地位^[19]。

然而受 DG 发电机理的限制,随着气候、时间与空间等条件的改变, DG 出力会呈现间歇性与随机性变化, IDN 中的电力潮流也会因此改变。另一方面, DG 在接入 IDN 后,将原本单向流动的电力潮流转变为双向流动^[20]。当 DG 所产生电能过多时,可直接向附近的负荷供电,多余的电能输送至 IDN;当 DG 所产生电能过少时,附近的负荷可以由 IDN 进行供电。这种双向流动的电力潮流模糊化了 IDN 中“源”与“荷”之间的界限,极大地增加了 IDN 复杂度。当 DG 在 IDN 中的接入位置与容量不合理时,不仅会直接影响到 DG 接入点附近的用户侧,也会对 IDN 的经济、稳定、安全运行产生重大影响^[21]。因此,如何对 DG 的不确定性进行有效分析与合理规划,已经成为了 IDN 规划领域中的重点问题。

1.2 电网侧

受限于出力的随机性与波动性, DG 发出的电能常常被视为“垃圾电”。另一方面,由于“自发自用、余电上网”的鼓励政策,传统电网公司的售电收益受到严重影响,也因此推动 DG 规划建设的积极性不高。有研究表明,受多种技术因素与经济因素的影响, TDN 对 DG 发电的接纳能力不会大于 10%。

针对这一难题,国外学者在 2008 年 CIGRE 上首次提出了 ADN 的概念^[22],旨在解决配电网侧兼容大规模间歇式可再生能源,提升绿色能源利用率以及一次能源结构等问题。这一技术概念在 IDN 中同样具有广阔的应用优势,可使 IDN 中电网侧与电源侧、电网侧与负荷侧的互动能力提升到一种新的高度。它借助有载调压变压器抽头、无功补偿器、馈线调压器、各种出线开关、分段/联络开关等设备,实现 IDN 主动网络管理,配电运行人员也能够应用灵活的网络拓扑调整潮流的分布。

然而,配电网的网架结构一般较为复杂,元件

故障率较高、负荷需求波动范围较大,随着电力电子化等新兴技术的发展和运用,由环境条件、设备老化、操作失误及外部破坏等因素引起的电网侧运行不确定性正在逐渐凸显^[23]。设备故障作为电网运行中的低频事件,难以通过分析历史数据获得其准确的概率分布函数。此外,考虑设备运行状态的不确定性将引入离散变量,大大增加规划模型求解难度。因此,在规划阶段,往往通过 $n-k$ 准则的后校验方式考虑设备故障的不确定性。文献[24]基于故障排序法建立了配电网故障场景。文献[25]对设备可靠性参数不确定性进行了量化分析,为 IDN 规划提供了理论基础。

1.3 负荷侧

在 TDN 中,负荷相对而言种类单一,不确定因素较少^[26]。但伴随着清洁低碳现代能源体系的蓬勃发展,世界各国均在加速推进化石能源的深度替代,实现原有化石能源产业的“再电气化”^[27]。在这一时代背景下,电动汽车(Electric Vehicle, EV)与电动船舶(Electric Ship, ES)等新型负荷应运而生,借助科学技术革新从而摒弃了原有的动力结构体系。通过在配电网中普及充电桩和岸电电源等等设施,彻底打破了化石能源在汽车船舶等交通领域的垄断性^[28]。据国际能源署(International Energy Agency)的数据显示,全球 EV 数量将于 2030 年达到 1.25 亿辆。目前我国 EV 发展也呈上升趋势,产业化进程已经走在世界前列,未来随着电池技术的突破与充电设施的普及,电动汽车发展将呈现爆发式增长^[29]。但在不考虑电动汽车带来的经济收益时,随着电动汽车占有率的提高,电动汽车的随机快速充电负荷将给配电网带来难以忽视的风险^[30]。另外我国船舶 90% 以上采用柴油机动力系统,技术等级低,航行和进港过程产生大量的油污水和有害气体及颗粒物,且噪音污染严重,对水域生态环境造成严重影响^[31]。因此,具有能耗低、零排放、低噪音、无污染的电动船舶也将出现跨越式发展。上述两种具备移动属性的新型负荷将彻底改变配电网中旧有的负荷特性,也将改变到在规划 IDN 过程中负荷预测结果,进而严重影响 IDN 规划方案的有效性。

另一方面,受配电网供需运行状态的影响, IDN 利用需求响应(Demand Response, DR)技术与用户签订协议,并积极采用直接负荷控制(Direct Load Control, DLC)、可中断负荷(Interruptible Load, IL)、需求侧竞价(Demand Side Bidding, DSB)、紧急需求响应(Emergency Demand Response, EDR)等方式,改善用户用电习惯,降低电网最大负荷,达到削峰填

谷的作用。如文献[32]在负荷侧引入 DR 技术,对插电式电动汽车的随机充电负荷和 DG 采用时空优化调度策略,有效地提高了可再生能源利用效率并降低了充电成本。

然而,新型负荷的发展以及由此带来的用能多样性无疑使负荷不确定性明显增加^[33]。此外,DR 的顺利执行需要用户及时有效地配合,但用户参与响应受到多种因素影响,用户心理、决策机制、市场规则和响应时滞等因素导致 DR 响应效果难以准确评价,也使负荷不确定性特征变得更为复杂^[34]。同时,规划年负荷大小既受经济环境和气候变化等因素的影响,又与配网运行方式相关。考虑到未来能源布局以及能源价格的调整,规划年负荷预测的不确定性也将不断增加。因此,对 IDN 进行规划时有必要考虑 DR 和社会发展对负荷的影响,但这无疑也会增加 IDN 规划的复杂性^[35]。

2 不确定性分析方法

适用于分析 IDN 中源-网-荷不确定性的规划方法主要有多场景分析(Multi-scene Analysis, MA)、机会约束规划(Chance Constrained Programming, CCP)、模糊数学理论(Fuzzy Mathematic Theory, FMT)与鲁棒优化(Robust Optimization, RO)等^[36]。

2.1 多场景分析法

MA 通过构建有限而具有特征的典型场景,从而将不确定性条件转化为确定性条件,适用于分析 DG 规划问题。多场景分析方法按步骤可分为场景生成与场景缩减^[37-38]。

场景生成往往采用某些抽样方法离散化所研究对象的概率模型,并保留数据量依旧庞大的总体特征。这些抽样方法主要分为四类:适合于直接对概率模型进行抽样的蒙特卡洛模拟法(Monte-Carlo Simulation, MCS)或拉丁超立方抽样法(Latin Hypercube Sampling, LHS)^[39];适合对历史统计数据进行分析处理的自回归滑动平均法(Autoregressive Moving Average, ARMA)^[40];容易发生“维数灾难”的场景树抽样法(Scene Tree Sampling, STS)^[41];适用于日前调度的核密度估计法(Kernel Density Estimation, KDE)^[42]。

场景缩减则是指通过某些方法来深入挖掘已生成的大量场景之间的潜在关系,最后只使用少量的典型场景来描述其共性特征,从而大幅简化计算过程。目前常见的场景缩减方法有:快速前向选择法(Fast Forward Selection, FFS)^[43]、后向削减法(Backward Reduction, BR)^[44]以及聚类分析法(Cluster Analysis, CA)等^[45]。

MA 利用建立多种典型场景的方法, 可将不确定性规划情景转化为确定性规划情景, 大幅降低建模与求解难度, 是实现源荷侧不确定性建模的有效方法。但不确定因素之间存在相关性或者其数量过多时, MA 将较难保留原有规划情景的特征与精度。

2.2 机会约束规划法

CCP 是一种随机规划方法, 适用于约束条件含有随机变量的规划问题, 通过使约束条件成立的概率在极小的置信区间来确保规划决策能满足约束条件。因此可使用随机变量来描述规划情景的不确定性因素, 并在数学模型中用 CCP 方法对其进行约束^[46]。

文献[47]在考虑光伏出力空间与时间相关性的基础上, 利用 CCP 建立了计及光伏总费用、电网运行成本、主动管理费用的多目标 DG 并网规划模型。文献[48]在 DG 输出不确定的情况下通过进行多周期随机最优潮流来确定规划方案可行性边界, 从而利用 CCP 提供 DG 容量区间确定且经济价值相对较高的 DG 规划方案。文献[49]将 DG 选址定容问题转化为机会约束规划问题, 通过 MCS 模拟确定机会约束是否满足。

相较于 MA, CCP 能够运用随机变量分析不确定性因素, 因此不会受到不确定性因素过多带来的负面影响。但 CCP 在实际应用中存在计算量大的现象, 难以同时保证求解效率和全局最优性。

2.3 模糊数学理论法

FMT 是一种适用于处理模糊问题与抽象过程的现代数学方法, 通过建立模糊集合的方式来定义不确定性问题。因此, FMT 也常被用于分析 DG 出力与 EL 功率存在的不确定性。

文献[50]建立了 DG 的模糊数学模型, 使用 FMT 分析了受外界环境影响下 DG 出力的不确定性。文献[51]采用 FMT 建立了 DG 与 EV 模糊数学模型, 分析 EV 独特的出行方式对 IDN 各节点 EL 造成不确定性影响, 使得 DG 规划方案更符合 IDN 实际运行结果。

相较于 MA 与 CCP, FMT 的优点之一在于无需准确知晓 DG 出力与 EL 功率的概率分布函数或者全过程场景, 但也因此其规划方案精度相对较低。

2.4 鲁棒规划

不同于上述规划方法, 鲁棒优化将优化问题中的不确定性因素表征为具有边界的不确定集合, 以集合内最坏情况下成本最小为目标进行决策, 从而最大程度地抑制不确定性因素影响, 确保最优解在任意不确定场景下的可行性。鲁棒优化为处理 $n-k$

设备故障约束提供了巧妙的解决思路, 是实现电网侧不确定性建模的有效方法^[52]。作为一种常用的不确定优化问题处理方法^[53-54], 鲁棒优化具有如下优势: 1) 不需要知道不确定性因素的概率分布, 适用于历史数据和场景资料较少的低频不确定性因素。2) 适用于不满足约束条件将导致严重后果的应用场景, 其保守性恰好符合规划人员处理电力系统安全问题时的谨慎。3) 计算性能良好, 可以处理不确定因素较多的优化问题。鲁棒优化因其独特优势, 成为电力系统领域解决不确定优化问题的重要方法^[55], 目前还广泛应用在经济调度, 机组组合、电力系统规划等问题中。

然而, 鲁棒优化的核心思想较为保守, 规划的保守性往往成为限制鲁棒优化发展应用的重要因素之一。因此, 如何合理地降低其保守性成为急需解决的问题。在实际规划过程中, 降低保守性的关键在于对配电网规划和运行的深入分析。一方面可以通过从历史数据中挖掘有效信息, 构建更符合实际的不确定集合, 另一方面也可以通过对配电网发展的合理预测, 掌握未来配电网的应用需求。此外, 由于不同规划方法在目标函数和考虑因素上的差异, 对其规划结果保守性的合理评价也将是未来的研究重点。

3 IDN 常见规划方法

根据现有文献, DG 在 IDN 中的规划内容大致可以分为四类: 仅规划 DG 的接入位置^[56]; 仅规划 DG 的接入容量^[57]; 规划 DG 的接入位置与容量^[58]; 规划 DG 的接入位置、容量与类型^[59]。为了使规划方案达到综合效益最佳, IDN 投资建设者可采用单目标规划(Single Objectives Programming, SOP)、多目标规划(Multi Objectives Programming, MOP)、双层规划(Bi-level Programming, BLP)、人工智能规划等方式。

3.1 单目标规划

SOP 主要是用来解决某类突出性问题的规划方法, 从经济性、技术性或者安全性等某一个角度出发, 最后得到的规划方案一般能在此角度有着良好表现。而 DG 接入 IDN 之后, 由于其接入位置、容量甚至类型的不同, 形成了多种 DG 规划方案^[60]。而不同规划方案在经济环保性、供电可靠性、电压稳定性等方面的表现存在差异, 为了最大限度地发挥 DG 规划的综合效益与对 IDN 性能的积极影响, 有必要归纳研究 DG 规划中所涉及的常见目标函数, 如表 1 所示。

表 1 DG 规划常见目标函数

Table 1 Common objective functions of DG planning

DG规划效益	目标函数
经济效益	设备投资成本最小 ^[61]
	线路网损成本最小 ^[61]
	停电损失成本最小 ^[61]
	向上级电网购电成本最小 ^[61]
技术效益	政府环境补贴最大 ^[62]
	弃风、弃光率最小 ^[63]
	供电峰谷差下降率最大 ^[64]
	可再生能源渗透率最大 ^[65]
安全效益	三相不平衡度最小 ^[58]
	节点电压偏移量最小 ^[66]
	电压稳定裕度最大 ^[67]

文献[61]从经济层面分析了 DG 接入对 IDN 的影响, 提出以设备投资成本、线路网损成本、停电损失成本与向上级电网购电成本四种指标最小为目标建立 DG 规划模型。文献[62]附加考虑了 DG 进行无污染发电时政府给予的环境补贴, 促进 DG 在 IDN 的大面积推广, 从而改善城市的空气质量与环境水平。

文献[63]则是从技术层面分析了 IDN 对 DG 的消纳能力, 提出弃风率与弃光率两种指标, 构建了一种适用于高比例可再生能源接入下的促进风光消纳的 DG 规划模型。文献[64]将接入 DG 后的 IDN 供电峰谷差下降率作为规划目标, 意在提高 IDN 供电稳定性。文献[65]在考虑风光互补特性的基础上建立了以可再生能源渗透率最大为优化目标的 DG 规划模型, 不仅可以促进风能与太阳能在 IDN 中的应用, 同时也能保证 IDN 的安全稳定运行。

文献[66]从安全层面分析了 DG 接入对 IDN 潮流的影响。考虑到 DG 渗透率过大时将导致节点电压偏移严重, 故而建立了以节点电压幅值与电压波动为约束的 DG 规划模型, 适用于求解各节点可接入的 DG 最大准入容量。文献[67]以提高 IDN 电压稳定裕度为目标, 在不超过 IDN 母线电压且满足馈线电流限制的条件下对 DG 进行最优规划, 从而提高 IDN 电压稳定裕度。

上述文献均为针对某类突出性问题的规划方法, 而事实上 DG 的接入会对 IDN 产生多层面的复杂影响。因此, 有必要从多种维度对接入 IDN 的 DG 进行多目标规划。

3.2 多目标规划

当 DG 规划所涉及的指标类别不少于两个, 同时指标之间存在一定博弈关系, 需要采用 MOP 进行处理。MOP 利用数学建模的方式, 可将多种维度

指标有机组合, 达到多维度的最优平衡。

在实际求解过程中, 多目标问题主要包括: 加权合并为单目标、基于 Pareto 理论和基于博弈论等三大类处理方法。文献[68]基于判断矩阵确定各目标权重, 并通过归一化处理将多目标问题转换为单目标问题。这种方法虽然降低了求解难度, 但权重选择较为主观性, 并且不同目标间的量纲难以统一。

基于 Pareto 理论进行求解时, 通常根据非支配选择规则将多个目标进行统一优化, 得到 Pareto 最优解集, 并根据不同规划需求选择最终方案。文献[69]将年综合费用最小和 IDN 运行风险最小作为求解目标, 得出待选方案的 Pareto 解集, 供决策者进行选择。文献[70]以年综合费用最小、线路网损最小以及节点电压偏差最小为目标, 实现了经济性、技术性和安全性的统一效果, 对推动配电网规划的多维平衡具有重要意义。但这种方法的求解时间往往随着优化规模的扩大而显著增加, 并且易陷入局部最优。

基于博弈论进行求解时, 可分为合作博弈和非合作博弈。合作博弈通常将优化问题转化为合作者间的谈判博弈, 使用互补约束将多目标规划问题转化为混合整数规划问题^[71]。非合作博弈则将目标函数转化为非合作博弈参与者, 通过不动点、变分均衡等方法计算纳什均衡解。可以看出, 这种方法可以从博弈的角度分析目标函数间的关系, 但在优化问题较为复杂或规模较大时, 适用性较差。

此外, 多目标优化研究通常缺少对规划结果的认同度和接受度的深入分析。由兼顾可靠性或技术指标所引起的经济损失是否合理仍需进一步的论证。因此, 相较于单目标规划, 多目标规划考虑的因素更加全面, 但求解过程也更加复杂, 并且在规划结果认同度方面仍存在一定的质疑, 如何实现多目标规划合理性的分析论证将成为关键。

3.3 双层规划

BLP 将目标函数按照一定属性分为两个层面, 通过相互博弈的方式依次在每个层面进行规划决策。上层规划的结果将作为下层规划的起始条件, 下层规划的结果同时会反馈给上层规划模型, 上层规划与下层规划相互制约相互影响^[72]。

文献[73]将 DG 运营商与电网公司视为两个不同的利益主体, DG 运营商在上层规划模型中重点关注 DG 能够创造的经济价值, 而电网公司则基于 DG 运营商提供的规划方案对 IDN 无功电容器进行合理配置, 从而保证 DG 规划不会影响 IDN 的安全运行。文献[74]同样将 DG 与 IDN 投资成本最小作为上层规划模型得目标函数, 在下层模型中则研究

需求响应技术对用户侧的影响，并以电力用户购电成本最小为目标函数，可以看出该双层模型为 DG 运营商与电力用户之间的利益博弈。可见 BLP 常以经济价值为导向构建上层规划模型，而在下层规划模型则更侧重于 IDN 的实际运行结果，因此 BLP 更适用于在复杂情景下对 DG 进行规划，但是受限于复杂的目标函数，其规划问题可能存在非线性与非凸函数，求解难度非常大，是一种 NP-hard 问题^[75]。

综上，SOP 无法满足目前 IDN 与电力用户的综合需求，而 BLP 虽然综合性强，但在求解过程中又存在着难度大与耗时长等问题，因此 MOP 的应用前景则相对显得更为广阔。

3.4 人工智能规划

随着配电网结构的日趋复杂以及规划要求的不断提高，按照传统方法对设计方案进行求解，往往要消耗大量人力物力。在这一背景下，粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、蚁群算法(Ant Colony Optimization, AC)、布谷鸟搜索算法(Cuckoo Search, CS)、人工蜂群算法(Artificial Bee Colony, ABC)、萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)^[76]等智能算法构成的智能决策支持系统，不仅可以加速配网设计过程，而且能使设计方案兼顾经济性、高效性和可靠性等要求，为 IDN 优化设计提供辅助支持。如表 2 所示。

表 2 常见的智能算法

Table 2 Common intelligent algorithms

	PSO	ACO	CS	ABC
优点	收敛速度快， 参数少，简 单易操作	全局搜索能力 强，鲁棒性好	不易陷入局部 最优，通用性 好，鲁棒性强	全局搜索 能力强
不足	易陷入局部最 优，易早熟 收敛	易发生停滞， 连续优化 求解较弱	收敛速度较 慢，缺少 活力	后期种群多样 性丢失，收敛 速度变慢
适应 场合	连续优化	离散优化 组合优化	连续优化	连续优化 组合优化

为解决上述算法易陷入局部最优、易早熟收敛以及求解后期多样性较差等问题，对传统算法的优化改进成为研究热点。文献[77]将文化基因算法和蚁群算法结合，实现了非凸非线性离散优化模型的计算求解，相较于传统遗传算法和粒子群算法在收敛效果上得到改进。文献[78]则基于交替方向乘子法和最优潮流建立输配电网协调规划模型，使规划方案更为优化、合理。文献[79]针对传统遗传算法迭代次数多、译码过程复杂等问题，提出了一种基于矩阵编码模式的改进遗传算法，不仅使求解效率更高，还保证了规划方案的科学性和灵活性。在此

基础上，文献[80]提出一种基于多目标蚁群算法的两阶段规划方法，实现 DG 安装位置和安装容量的优化求解。另外，文献[81]将粒子群优化算法和模拟退火算法结合起来，用于求解 DG 的位置和容量，相较于单独的优化算法，使得规划结果更为合理。可见，传统算法的优化改进，对提高求解速度、改善求解效果以及满足具体规划问题具有重要意义。

由上述分析可知，随着配电网的日趋复杂，人工智能已成为配电网规划必不可少的途径之一。但如何将智能规划应用于情况复杂多变的实际生产建设中，以及如何确定一种适宜工程需要的和简单易行的标准算法或标准改进算法将是智能规划急需深入挖掘和解决的问题。

4 总结与展望

本文针对 IDN 规划所涉及的“源-网-荷”不确定性进行了深入的探索研究，从适用于 IDN 规划阶段的不确定性分析方法和常见的规划研究方法两方面对配电网规划研究现状进行了总结归纳，得出了以下主要结论。

1) 源-网-荷不确定性。IDN 将鼓励越来越多的新型源-网-荷设备与技术接入，将势必会对 IDN 规划提出更高要求。因此，有必要对各种新型设备进行建模，对各种新型技术进行分析，厘清因设备与技术的应用产生的不确定性。此外，随着高电压、大容量、远距离直流输电的发展应用，传统配网和输电网彼此独立的规划模式将受到更为严峻的挑战，导致输送容量不匹配和供电能力不协调等问题。所以在规划阶段，如何考虑输电网规划的不确定性，实现不同电压等级电网的协同配合将成为后续研究的热点之一。

2) 不确定建模方法。多场景分析、机会约束规划、模糊数学理论与鲁棒优化等方法理论的发展和改进，为 IDN 规划时不确定性的建模处理提供了多种可选途径。但多种不确定性因素间的相关性以及极端场景的精细化表征及规划保守性都有待进一步深入研究。此外，对不确定性问题的考虑主要集中在不确定性描述，以及利用已有方法对其进行简化求解，对不确定性形成的原因及其背后的社会行为学、经济学考虑较少。

3) 优化目标函数。目前 IDN 在规划时所涉及的目标函数与算法不胜枚举，所应用的具体场景也不胜枚举。随着智能化发展的要求，配电网规划的需求已转变为提高设备利用率，实现高可靠连续供电。因此，急需深入挖掘负荷侧调控潜力，避免用传统的“冗余”思想解决负荷增长问题，实现配电网的

精细化、智能化发展。同时,随着多方投资的参与,使得 IDN 规划问题需要协调各方利益。规划模型不再仅仅考虑单方利益的最大化,应该与时俱进,体现各方需求。

尽管在 IDN 规划问题方面,现有研究已取得诸多成果,但近年来随着人工智能、能源互联网、大数据融合、分布式储能和电力电子化等技术的发展应用,对配电网智能化、灵活化和数据化建设水平提出了更进一步的要求,在新形式下配电网规划不确定性呈现出如下特征。

1) 能源耦合不确定性。综合能源系统已成为能源行业发展的必然趋势之一。冷、热、气等能源系统所含的不确定性,如冷、热、气负荷波动、设备故障、管道故障、能源市场变化等不确定性,也会通过能源耦合对电力系统产生复杂的次生影响。配电网作为未来综合能源系统乃至能源互联网的重要载体,其不确定性将呈现出不同于传统单一电力系统的复杂性和特殊性。

2) 电力电子化。与传统电力系统相比,未来配电网的显著特征就是电力电子化。电力电子器件优良的控制性能,不仅可以支撑可再生能源发电的大规模接入,也满足用户对电能质量和用电多样化的要求,因此配电网电力电子化程度不断加深。然而实践证明,电力电子化在提升配电网可控性和灵活性的同时,非线性、高敏感、快变化和冲击性等电力电子特征,也给配电网优质电能供应和系统稳定运行带来了新的挑战。

3) 数据融合不确定性。数据信息的挖掘与应用作为配电网规划的新型技术,在保证配电网高效运行的同时,量测误差、传递异常、系统随机故障、人为攻击等信息系统不确定因素对电力系统的影响也更为直接深入。如信息系统故障通常会使得控制中心失去对相关电力设备的控制能力,对配电可靠性造成严重影响。因此,智能化过程可能会成为未来配电网潜在的薄弱环节。

参考文献

- [1] 中共中央国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见[EB/OL]. [2015-03-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-03/09/content_2831228.htm.
- [2] 国家发展改革委、国家能源局. 关于规范开展增量配电业务改革试点的通知[EB/OL]. [2016-11-27]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201612/t20161201_962794.html.
- [3] MENSOU S, ESSADKI A, NASSER T. Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bioinspired optimization algorithms[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 21-35. DOI: 10.1186/s41601-019-0149-x.
- [4] 山西省经济和信息化委员会, 山西省发展和改革委员会. 关于印发<山西省放开增量配电业务试点方案>的通知[EB/OL]. [2016-09-29]. https://www.sohu.com/a/116627751_131990.
- [5] KAABI S S A, ZEINELDIN H H, KHADKIKARV. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(2): 785-793.
- [6] 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): 28-34. XIN Haijun, CHEN Haozhong, ZHANG Shenxi, et al. Review of active distribution network planning[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 28-34.
- [7] 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): 2689-2701. YANG Nan, DONG Bangtian, HUANG Yu, et al. Incremental distribution network source-load collaborative planning method considering uncertainty and multi-agent game[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2689-2701.
- [8] 肖振锋, 辛培哲, 刘志刚, 等. 泛在电力物联网形势下的主动配电网规划技术综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(3): 43-48. XIAO Zhenfeng, XIN Peizhe, LIU Zhigang, et al. An overview of planning technology for active distribution network under the situation of ubiquitous power internet of things[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 43-48.
- [9] JOOSHAKI M, FARZIN H, ABBASPOUR A. A model for stochastic planning of distribution network and autonomous DG units[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(6): 3685-3696.
- [10] LI Rui, WANG Wei, XIA Mingchao, et al. Cooperative planning of active distribution system with renewable energy sources and energy storage systems[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 5916-5926.
- [11] ZHU Xiaojun, HAN Haiteng, GAO Shan, et al. A multi-stage optimization approach for active distribution network scheduling considering coordinated electrical vehicle charging strategy[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 50117-50130.
- [12] 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.
- [13] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [14] GANGULY S, SAMAJPATI D. Distributed generation allocation on radial distribution networks under uncertainties of load and generation using genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 688-697.
- [15] MUNOZ D G, CONTRERAS J, ARROYO J M. Multistage generation and network expansion planning in distribution systems considering uncertainty and reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3715-3728.
- [16] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电力发展“十三五”规划[EB/OL]. [2016-12-22]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201612/P020190905497888172833.pdf>.
- [17] International Council on Large Electric Systems. Definitions for distributed generation: a revision[R]. FRA: CIGRE, 2007.
- [18] LI Ruisheng, WONG P, WANG Kun, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 183-189. DOI: 10.1186/s41601-020-00163-x.
- [19] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 可再生能源发展“十三五”规划[R]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2016.
- [20] ZHAO Y N, YE L, PINSON P, et al. Correlation-constrained and sparsity-controlled vector autoregressive model for spatio-temporal wind power forecasting[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5029-5040.
- [21] 盛万兴, 吴鸣, 季宇, 等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2175-2186, 1. SHENG Wanxing, WU Ming, JI Yu, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2175-2186, 1.
- [22] 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, 36(22): 12-18. FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 36(22): 12-18.
- [23] JAIN T, GHOSH D, MOHANTA D K. Augmentation of situational awareness by fault passage indicators in distribution network incorporating network reconfiguration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 323-336. DOI: 10.1186/s41601-019-0140-6.
- [24] FLISCOUNAKIS S, PANCIATICI P, CAPITANESCU F, et al. Contingency ranking with respect to overloads in very large power systems taking into account uncertainty, preventive, and corrective actions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4909-4917.
- [25] KONG Xiangyu, YONG Chengsi, WANG Chengshan, et al. Optimal strategy of active distribution network considering source-network-load[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(24): 5586-5596.
- [26] 高赐威, 李倩玉, 李慧星, 等. 基于负荷聚合商业务的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86. GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [27] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494. TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [28] DUAN Z Y, GUTIERREZ B, WANG L Z. Forecasting plug-in electric vehicle sales and the diurnal recharging load curve[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 527-535.
- [29] 刘卓然, 陈健, 林凯, 等. 国内外电动汽车发展现状与趋势[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 25-32. LIU Zhuoran, CHEN Jian, LIN Kai, et al. Domestic and foreign present situation and the tendency of electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 25-32.
- [30] 侯慧, 徐焘, 柯贤彬, 等. 电动汽车快充对配电网的风险研究[J]. 新能源汽车供能技术, 2020, 4(1): 48-54. HOU Hui, XU Tao, KE Xianbin, et al. Research on risks of electric vehicle charging to distribution network[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2020, 4(1): 48-54.
- [31] 罗青龙. 基于储电船舶时空分布特性的远洋海岛微电网能量优化管理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

- LUO Qinglong. Study on optimal energy management for off-shore island microgrid based on temporal and spatial distribution characteristics of electric vessels[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [32] SUN S Y, YANG Q, YAN W J. Optimal temporal-spatial PEV charging scheduling in active power distribution networks[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(4): 379-388. DOI: 10.1186/s41601-017-0065-x.
- [33] QUEVEDO P M D, MUNOZ G, CONTRERAS J. Impact of electric vehicles on the expansion planning of distribution systems considering renewable energy, storage and charging stations[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(1): 794-804.
- [34] HUANG Wujing, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(2): 148-150. DOI: 10.1186/s41601-019-0126-4.
- [35] KAABI S S, ZEINELDIN H, KHADKIKAR V. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(2): 785-793.
- [36] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(8): 1-9.
ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, XING Haijun, et al. Review of distributed generation planning in distribution network considering uncertainties[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(8): 1-9.
- [37] NICK M, CHERHAOUI 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.
- [38] 黄冯. 面向电力系统分析的可再生能源典型场景生成方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
HUANG Feng. A typical scenario generation method for renewable energy in power system analysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [39] ZOU K, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M, et al. Distribution system planning with incorporation DG reactive capability and system uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(1): 112-123.
- [40] BIZRAH A, ALMUHAINI M. Modeling wind speed using probability distribution function, Markov and ARMA models[C] // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA: 1-5.
- [41] 雷宇. 基于场景分析的含风电场电力系统机组组合问题的研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
LEI Yu. Research on unit commitment of power system with wind farm based on scenario analysis[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [42] ZHOU B, MA X, LUO Y, et al. Wind power prediction based on LSTM networks and nonparametric kernel density estimation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 165279-165292.
- [43] PATEL N K, SERRAO J J. Accuracy estimation of approximated Gaussian distribution obtained from fast forward selection scenario reduction algorithm[C] // 2015 International Conference on Energy Systems and Applications, October 30-November 1, 2015, Pune, India.
- [44] SHI Libao, WANG Chen, YAO Liangzhong, et al. Optimal power flow solution incorporating wind power[J]. *IEEE Systems Journal*, 2012, 6(2): 233-241.
- [45] LIU Ruidong, VERBIC G, MA Jin, et al. Fast stability scanning for future grid scenario analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 514-524.
- [46] 赵雨萍, 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 Liping, ZHANG Shuwei, ZHANG Xueyan, 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.
- [47] 宋淼, 王克文. 主动配电网中考虑空间与时间相关性的分布式光伏并网规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 106-114.
SONG Miao, WANG Kewen. Planning of distributed PV grid-access considering the space and time correlation in active distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 106-114.
- [48] CAO X Y, WANG J X, ZENG B. Distributed generation planning guidance through feasibility and profit analysis[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 5473-5475.
- [49] LIU Zhipeng, WEN Fushuan, LEDWICH G. Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(4): 2541-2551.
- [50] AL-AWAMI A T, AMLEH N A, MUQBEL A M. Optimal demand response bidding and pricing mechanism with fuzzy optimization: application for a virtual power plant[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(5): 5051-5061.
- [51] AHMADIAN A, SEDGHI M, ALIAKBAR GOLKAR M.

- Fuzzy load modeling of plug-in electric vehicles for optimal storage and dg planning in active distribution network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(5): 3622-3631.
- [52] AMJADY N, ATTARHA A, DEHGHAN S, et al. Adaptive robust expansion planning for a distribution network with DERs[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(2): 1698-1715.
- [53] SRIKANTHA P, KUNDUR D. A game theoretic approach to real-time robust distributed generation dispatch[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(3): 1006-1016.
- [54] AKRAMI A, DOOSTIZADEH M, AMINIFAR F. Optimal reconfiguration of distribution network using μ PMU measurements: a data-driven stochastic robust optimization[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 11(1): 420-428.
- [55] 宋璇坤, 辛培哲, 李珊, 等. 考虑多重不确定性因素的分布式电源鲁棒规划方法研究[J]. *智慧电力*, 2019, 47(6): 56-63.
SONG Xuankun, XIN Peizhe, LI Shan, et al. Robust planning method of distributed generation considering multiple uncertainties[J]. *Smart Power*, 2019, 47(6): 56-63.
- [56] 李顺昕, 洪海峰, 秦砺寒, 等. 考虑配电网最大消纳能力的集中型分布式电源并网点选择方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2019, 34(3): 196-201.
LI Shunxin, HONG Haifeng, QIN Lihan, et al. Selection of centralized distributed generation's connection point considering the maximum absorptive capacity of the distribution network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(3): 196-201.
- [57] 黄河, 高松, 韩俊, 等. 交直流混合配电网分布式电源最大准入容量[J]. *电力建设*, 2019, 40(10): 75-83.
HUANG He, GAO Song, HAN Jun, et al. Maximum capacity of grid-connected distributed generation in AC/DC hybrid distribution network[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(10): 75-83.
- [58] ZHENG Y, DONG Z Y, MENG K, et al. Multi-objective Distributed wind generation planning in an unbalanced distribution system[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2017, 3(2): 186-195.
- [59] 齐志远, 郭佳伟, 李晓炆. 基于联合概率分布的风光互补发电系统优化配置[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(1): 203-209.
QI Zhiyuan, GUO Jiawei, LI Xiaoyang. Optimal configuration for wind power and solar power hybrid systems based on joint probability distribution of wind speed with solar irradiance[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018, 39(1): 203-209.
- [60] SINGH B, SHARMA J. A review on distributed generation planning[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 529-544.
- [61] 吕涛, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 分布式电源与配电网架多目标协调规划[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(21): 139-145.
LÜ Tao, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(21): 139-145.
- [62] SARDI J, MITHULANANTHAN N, GALLAGHER M, et al. Multiple community energy storage planning in distribution networks using a cost-benefit analysis[J]. *Applied Energy*, 2017, 190: 453-463.
- [63] 彭春华, 余愿, 孙惠娟. 基于源网荷协同优化的配电网光储联合系统规划[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 3944-3951.
PENG Chunhua, YU Yuan, SUN Huijuan. Planning of combined PV-ESS system for distribution network based on source-network-load collaborative optimization[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3944-3951.
- [64] 江泽昌, 刘天羽, 江秀臣, 等. 考虑 DG 与负荷不确定性的主动配电网重构[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(19): 76-84.
JIANG Zechang, LIU Tianyu, JIANG Xiuchen, et al. Reconfiguration of active distribution network considering DG and load uncertainty[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(19): 76-84.
- [65] WEN S L, WANG Y, TANG Y, et al. Proactive frequency control based on ultra-short-term power fluctuation forecasting for high renewables penetrated power systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(12): 2166-2173.
- [66] 王蕾, 赵艳雷, 吕东飞. 考虑静态安全约束的分布式电源准入容量与最佳接入位置计算[J]. *供用电*, 2019, 36(5): 34-41, 65.
WANG Lei, ZHAO Yanlei, LÜ Dongfei. Penetration capacity and optimal placement calculation of distributed generations considering static security constraints[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(5): 34-41, 65.
- [67] AL ABRI R S, EL-SAADANY E F, ATWA Y M. Optimal placement and sizing method to improve the voltage stability margin in a distribution system using distributed generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(1): 326-334.
- [68] 吕涛, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 分布式电源与配电网架多目标协调规划[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(21):

- 139-145.
- LÜ Tao, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 139-145.
- [69] 李珂, 邵能灵, 张沈习, 等. 考虑相关性的分布式电源多目标规划方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 51-57, 199.
- LI Ke, TAI Nengling, ZHANG Shenxi, et al. Multi-objective planning method of distributed generators considering correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 51-57, 199.
- [70] CUI R, HUI H, XIAO Z, et al. Multi-objective planning of distributed generations based on time-sequence characteristics[C] // Proceedings of 8th Renewable Power Generation Conference (the RPG), October 24-25, 2019, Shanghai, China: 1-6.
- [71] 谢峥, 刘随阳, 周冬. 基于博弈理论的电力系统扩展规划方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 86-91.
- XIE Zheng, LIU Suiyang, ZHOU Dong. Power system expansion planning method based on game theory[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 86-91.
- [72] 黄伟. 双层规划理论在电力系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- HUANG Wei. Research on the application of bi-level programming theory in power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [73] 温俊强, 曾博, 张建华. 市场环境下考虑各利益主体博弈的分布式电源双层规划方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 61-67.
- WEN Junqiang, ZENG Bo, ZHANG Jianhua. Bi-level programming method for distributed generator considering stake holders' game relationship in an electricity market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 61-67.
- [74] ASENSIO M, MUNOZ-DELGADO G, CONTRERAS J. Bi-level approach to distribution network and renewable energy expansion planning considering demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4298-4309.
- [75] JENABI M, GHOMI S M T F, SMEERS Y. Bi-level game approaches for coordination of generation and transmission expansion planning within a market environment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2639-2650.
- [76] 汪春峰, 褚新月. 基于精英邻居引导的萤火虫算法[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2019, 47(6): 15-21.
- WANG Chunfeng, CHU Xinyue. A firefly algorithm based on elite neighborhood guide[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2019, 47(6): 15-21.
- [77] 唐俊熙, 王梓耀, 张俊潇, 等. 基于文化蚁群算法的高可靠多电源配电网规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 99-107.
- TANG Junxi, WANG Ziyao, ZHANG Junxiao, et al. High reliability multi-power distribution network planning model based on memetic ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 99-107.
- [78] 徐小琴, 王博, 赵红生, 等. 基于交替方向乘子法及最优潮流的输配电网协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 18-27.
- XU Xiaoqin, WANG Bo, ZHAO Hongsheng, et al. Coordination planning method of a transmission and distribution network based on alternating direction method of multipliers and optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 18-27.
- [79] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.
- MA Xiufan, CUI Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.
- [80] LI Y, FENG B, LI G, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution networks considering integration of energy storage[J]. Applied Energy, 2018, 210(15): 1073-1081.
- [81] 刘永强, 郑宁宁, 邵云峰, 等. 基于混合粒子群优化的含分布式电源配电网分层规划方法研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 85-92.
- LIU Yongqiang, ZHENG Ningning, SHAO Yunfeng, et al. Bi-level planning method for distribution network with distributed generations based on hybrid particle swarm optimization[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 85-92.
-
- 收稿日期: 2020-06-27; 修回日期: 2020-10-14
- 作者简介:
- 伍也凡(1989—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统二次及智能化; E-mail: fan_csqq@foxmail.com
- 刘浩田(1992—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统规划; E-mail: 1014373150@qq.com
- 侯慧(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统恢复策略研究。E-mail: houhui@whut.edu.cn
- (编辑 葛艳娜)