

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.007

新基建负荷与光伏接入下配电网可开放容量评估及优化

郭勇¹, 李秋燕¹, 马杰¹, 全少理¹, 李争博², 刘友波²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450000;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:随着新基建概念的提出,以5G基站、电动汽车为代表的新型负荷大规模接入城市配电网,对配电网的安全与经济运行产生了显著影响。为了评估城市配电网对新基建负荷的容纳能力,提出一种基于负荷增长需求与配电网承载能力的配电网可开放容量评估方法,在新基建负荷及分布式能源接入的条件下计算各负荷节点所能增供负荷的总额作为可开放容量。在考虑电压、潮流等约束条件下,采用二阶锥松弛方法实现模型的快速优化求解。此外,考虑到分布式光伏接入位置和顺序对可开放容量的影响,以可开放容量最大为目标按照动态规划的方法对分布式光伏的并网位置进行优化。在某地区配电网网格中进行仿真分析,结果表明,所提方法可以有效评估城市配电网网格的可开放容量水平,并通过调整分布式光伏的接入位置实现了可开放容量的动态优化。

关键词:城市配电网;新基建负荷;可开放容量评估;二阶锥松弛;光伏选址优化;动态规划

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)06-0064-10

0 引言

近年来,随着新型基础设施建设的不断发展,能源利用模式也在发生巨大变革。以5G基站、电动汽车(electric vehicle, EV)为主要代表的新基建增量负荷规模不断增长,以光伏为代表的新型能源规模化接入电网,其波动性和间歇性特征^[1-4]给配电网的安全经济运行带来了前所未有的挑战。为了保障配电网的持续健康运行与长远发展,须在负荷增长条件下评估配电网剩余可利用的供电能力大小,即配电网动态可开放容量(dynamic available capacity, DAC)。极限传输能力(total transfer capability, TTC)和可用传输能力(available transfer capability, ATC)侧重于计算电网跨区域功率交换的实时传输能力大小^[5-7]。而对于DAC,在负荷增长条件下,各负荷节点剩余可开放容量仍须满足电压上下限、线路容量上限以及供电出力限制等,故配电网DAC大小应为满足安全运行要求下各节点剩余可开放容量总和。相较于TTC、ATC, DAC具有提高电力市场交易效率以及容量效益等作用。基于各节点剩余可开放容量的计算结果可对配电网实际接纳能力进行有效评估^[8],从而为后续投资决策和扩容改造提供理论和数据支撑。

针对配电网供电能力评估问题,传统的思路是不断增加负荷,直到有设备达到热稳定极限,判定方法以人工或者经验为主^[9]。通过该方式得到的

剩余可开放容量精度较差、应用范围有限,难以适用于由众多联络线和分段开关组成的现代复杂城区配电网。一些研究将目光集中于最大供电能力(total supply capability, TSC)的评估中,该指标的含义为在满足主变及馈线 $N-1$ 安全校验下配电网所能承载的最大负荷,一般有解析法和模型法2类^[10-12]方法。文献[11-12]中依据TSC进行规划的方法虽然保证了供电可靠性,但须保留较大的备用容量,无法实现充分利用现有配电设施资源的目的。文献[13-14]基于TSC评估方法提出了一种配电网可用供电能力(available supply capability, ASC),其含义为在满足 $N-1$ 安全准则的前提下基于现有负荷仍可容纳的负荷增量。若要实现ASC最大,负荷需要在各节点按特定的容量比例分布。然而,实际中各节点的负荷是按用户需求分布的,为了理想的场景而对负荷进行人为重新排布难以实现。在TSC模型改进方面,有学者提出了剩余供电能力(residue supply capability, RSC)的概念和计算方法^[15-16]。RSC为在不减少节点负荷的前提下,配电网可利用的剩余供电潜力。文献[15]所提RSC计算方法适用于网架结构和开关位置都不发生变化时的场景,表征配电网在特定网络拓扑下的RSC;文献[16]则进一步将配电网在实际运行中的网架结构和开关状态的变化纳入考虑。2篇文献均采用线性规划模型^[17-18],利用Lingo软件求解,但均未考虑光伏等分布式电源和EV等新型负荷接入后各节点剩余可开放容量的动态变化,面对负荷分布变化时也无法进一步确定网架的最佳拓扑。

收稿日期:2023-06-07;修回日期:2023-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977133)

随着电网自动化水平的提高和源-荷两端波动的加剧,相比于强调稳定可靠的传统配电网,现代城区配电网相对处于“动态”,对新负荷的接纳能力也应当是动态的。此外,网络重构、区域互联等方式均可在一定程度上提升配电网的承载能力。为满足配电网传统负荷以及不断增长的新基建负荷需求,急需适当的评估方法来量化分析,以提升系统 DAC。

为实现不同负荷分布下的配电网 RSC 评估,文中提出了一种针对 DAC 的评估模型,充分考虑 5G 基站、EV 等新基建负荷增长需求,同时将分布式能源对 DAC 的支撑效益纳入研究,在计及网络安全约束的条件下对电网容纳新增负荷的能力进行评估。首先,对典型新基建负荷运行特性及新型能源的输出特性进行了分析;其次,对评估网格按照“网格化”标准划分,同时从网格内互联互通的角度出发,提出了一种考虑多供电区域互联及配电网重构的 DAC 评估模型;然后,考虑光伏接入对配电网 DAC 的影响,将光伏接入位置及容量作为决策变量加入所提模型中,利用动态规划方法调整光伏接入位置以实现 DAC 的优化。该动态优化过程以 DAC 评估为基础,体现了所提模型对配电网 DAC 的准确估计,以及在支撑后续扩展规划工作中起到的关键作用。最后,在我国某城市配电网网格中进行仿真分析,结果验证了所提方法在评估及优化配电网 DAC 方面的有效性。

1 新基建负荷及分布式光伏能源建模

随着我国对新基建的重视程度不断加深,5G 基站、大数据中心、新能源汽车以及工业互联网等多种新基建设备的建设进度不断加快。其中,大数据中心、工业互联网等大型负荷往往利用自然能源或自身发电厂供电,对配电网供电能力的影响较小。而 5G 基站、新能源汽车这类负荷有着不同于基础负荷的独特性,在进行 DAC 评估时须先对此类负荷运行情况进行建模,并计算峰值负荷同时率。

1.1 新基建负荷特性建模

1.1.1 EV 充电负荷特性

实际中,同一网格内不同区域的 EV 数量、充电功率大小、用户行驶习惯等存在一定差别,这些因素将影响 EV 负荷的时序特征和未来增长趋势。故为同时获取 EV 负荷在长期发展过程中的增长趋势与短期时段的负荷特性,可利用区域 EV 渗透率、EV 日常充电模型、行驶概率模型等^[19]模拟不同区域中负荷的时序分布情况以及各阶段下配电网 EV

负荷的充电情况。

首先,定义 EV 渗透率。EV 渗透率既可作为区域内 EV 发展水平的直观表现,也可侧面反映 EV 负荷的峰值大小。

$$\eta_R = \frac{N_{EV,R}}{N_R} \quad (1)$$

式中: η_R 为配电网区域 R 内 EV 渗透率; N_R 为配电网区域 R 内用户数量; $N_{EV,R}$ 为配电网区域 R 内 EV 数量。

由文献[19]所提方法得到 EV 充电开始时间和行驶时长的概率模型,如式(2)、式(3)所示。将参数 μ_s 、 σ_s 、 μ_D 、 σ_D 分别设置为 18.3、0.5、3.2、0.88,在此条件下,通过蒙特卡洛模拟仿真 EV 出行和充电行为,得到典型日 EV 充放电情况。并按照式(4)、式(5)计算得到 EV 充电负荷最高峰时段的 EV 充电同时率以及一天内 EV 最大充电功率。

$$f_s(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) & \mu_s - 12 < t \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) & 0 \leq t \leq \mu_s - 12 \end{cases} \quad (2)$$

$$f_D(t) = \frac{1}{t \sigma_D \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right) \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\max_{t=1,2,\dots,24} P_{EV}^{\text{time}}(t)}{\sum_{e \in \psi_R} P_e} \quad (4)$$

$$P_{EV,R} = \gamma \eta_R N_R \sum_{e \in \psi_R} P_e \quad (5)$$

式中: $f_s(t)$ 为 EV 开始充电时刻 t 的概率密度函数; $f_D(t)$ 为 EV 一天内行驶里程总数的概率密度函数; γ 为 EV 充电同时率; $P_{EV}^{\text{time}}(t)$ 为典型日内 t 时刻下 EV 负荷的充电功率; P_e 为 EV 额定充电功率; ψ_R 为区域 R 内的 EV 集合; $P_{EV,R}$ 为区域 R 内的 EV 充电功率。

1.1.2 5G 基站负荷特性

5G 基站主要设备包含基带处理单元(base band unit, BBU)、有源天线单元(active antenna unit, AAU)和天馈系统,同时还有为基站提供稳定运行环境和用电保障的电源、电池及空调等设备。其中 5G 基站负荷的主要能耗来自 BBU、射频 AAU 和空调。基站的能耗也与设备型号、主设备功率、载波数和综合业务量相关。由文献[20]中所展示的不同厂家 5G 基站的功耗表及不同类型基站的功耗表可知,根据覆盖半径可将 5G 基站分为宏基站、微基站、皮基站和飞基站。宏基站覆盖最广,功耗最高,

常安装于室外^[20],受天气以及接入移动设备数量的影响较大,且在某区域内密集安装 5G 基站对局部电网的安全运行有较大冲击。因此,文中主要针对宏基站进行分析。

在 5G 基站负荷能耗中,空调设备的功耗较为固定^[21];BBU 功耗与所插板件相关,受业务负荷影响不大,一般情况下为 293~330 W;而 AAU 功耗与业务负荷相关^[22],50%业务负荷下平均功耗为 892~956 W,100%业务负荷下平均功耗为 1 127~1 175 W。根据上述情况,在构建 5G 基站负荷模型时,由于 5G 基站的 AAU 功耗受用户使用情况的影响较大,同一网格内部不同区域中基站负荷功率也存在一定差别。考虑到不同区域内用户数和用户手机激活比之间的差异,计算射频 AAU 的功率大小,应按照式(7)对不同区域内的 AAU 负荷功率进行区分^[23]。单个 5G 基站的总功耗可表示为:

$$P^{5G} = P^{AAU} + P^{BBU} + P^{AC} \quad (6)$$

$$P^{AAU} = \frac{D_{DLd} \lambda_R N_R}{D_{max_DLd}} (P_{max}^{AAU} - P_{base}^{AAU}) + P_{base}^{AAU} \quad (7)$$

式中: P^{5G} 为 5G 基站的总功耗; P^{AAU} 为 AAU 的功耗; P^{BBU} 为 BBU 的功耗; P^{AC} 为空调系统的功耗; P_{max}^{AAU} 为射频 AAU 设备最大功耗; P_{base}^{AAU} 为射频 AAU 设备基础功耗; D_{max_DLd} 为单位时间内传输业务下行最大吞吐量; D_{DLd} 为单位时间内单个设备的下行数据流量; λ_R 为区域 R 内用户智能手机 5G 服务激活比。

1.2 分布式光伏能源特性建模

分布式光伏电源的发电情况与光伏电源所在区域、区域内部天气情况有着较为密切的联系。由文献[24]提出的波动参数 $\mu(t)$ 、净空理论出力 $P_R^{PV}(t)$ 可知,波动参数 $\mu(t)$ 随着天气和气温条件的改变而发生变化,净空理论出力 $P_R^{PV}(t)$ 在不同区域内的出力大小存有一定的差别。因此,进行光伏发电出力模拟时,可将各区域内不同时刻下的波动参数 $\mu(t)$ 与光伏电站对应时刻净空理论出力 $P_R^{PV}(t)$ 的乘积作为各时刻下光伏电源的出力大小。 t 时刻下光伏出力大小的计算公式如式(8)所示,其中区域 R 内光伏电源的净空理论出力 $P_R^{PV}(t)$ 与光照强度在较大范围内呈正相关线性关系。目前多采用 Beta 分布模拟光照强度概率分布^[25],其概率密度函数如式(9)所示。随后,计算出一天内所有时刻下的波动参数值便可得到一天内的光伏出力变化。波动参数 $\mu(t)$ 受天气、温度的影响较大,可按照晴天、雨天、多云以及随机天气(晴天转雨天或雨天转晴天)4 种情况进行划分。

$$P^{PV}(t) = P_R^{PV}(t) \mu(t) \quad (8)$$

$$P_R^{PV}(t) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{\rho_t}{\rho_{t,lr}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho_{t,lr}}\right)^{\beta-1} \quad (9)$$

式中: $P^{PV}(t)$ 为光伏电源 t 时刻的实际出力; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; α, β 均为 Beta 分布的形状参数,取 $\alpha = 0.66, \beta = 1.82$; ρ_t 为 t 时刻下的光照强度; $\rho_{t,lr}$ 为晴天天气中 t 时刻下的基准光照强度。

利用蒙特卡洛仿真的方法得到一天中各种天气情况下的光伏出力以及 EV、5G 基站负荷的功率分布情况,如图 1 所示。由图 1 可知, EV、5G 基站负荷以及光伏出力的峰值时刻和基础负荷的峰值时刻均不相同。因此,负荷功率与分布式资源出力同时率应为基础负荷峰值时刻下各类负荷功率大小、光伏出力大小同自身峰值时刻的比值,并在计算 DAC 时,将该同时率与各节点所接负荷、光伏的基准功率相乘作为各节点负荷功率、光伏电源出力的大小。

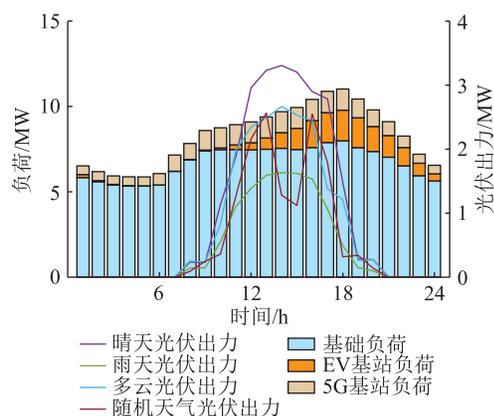


图 1 新基建负荷与分布式光伏的时序特征

Fig.1 Time series characteristics of new infrastructure loads and distributed photovoltaics

2 可开放容量优化模型

考虑到滚动发展阶段负荷分布随机性、网架结构多样性的特点,文中提出了 DAC 的概念以表征考虑负荷增长和拓扑重构时配电网剩余可接入负荷的大小,其含义为在保证系统增量负荷增长下,网格内部剩余可利用的允许供电容量之和。该供电能力可以通过配电网重构及供电区域互联等灵活性技术进行最大程度的挖掘。与文献[15]中提到的 RSC 不同,文中提出的 DAC 充分考虑了拓扑重构、区域互联以及负荷增长对网格内部供电潜力的影响,可以在长时间尺度上,实现对所划分网格供电能力的逐阶段推演。

2.1 目标函数

配电网 DAC 评估模型的目标函数为在配电网网格内满足新基建负荷供电需求的条件下,各负荷

节点在峰值时刻剩余可接入的传统负荷容量之和最大化,其公式如下:

$$\max \sum_{R \in \psi_g} P_R^{\text{OPL}} \quad (10)$$

$$P_R^{\text{OPL}} = \sum_{i=1}^{N_R} \Delta p_i^{\text{OPL}} \quad (11)$$

式中: P_R^{OPL} 为区域 R 内配电网总可开放容量; ψ_g 为网格内所有区域的集合; Δp_i^{OPL} 为节点 i 的可开放容量。

2.2 约束条件

区域配电网 DAC 优化评估模型的约束条件如下。

(1) 功率平衡约束:

$$\begin{cases} p_i^g - p_i^d = f^+ (p_{ij}^+ - p_{ij}^- + r_{ij} \tilde{I}_{ij}) + \\ \quad f^- (p_{ij}^- - p_{ij}^+ + r_{ij} \tilde{I}_{ij}) \\ q_i^g - q_i^d = f^+ (q_{ij}^+ - q_{ij}^- + x_{ij} \tilde{I}_{ij}) + \\ \quad f^- (q_{ij}^- - q_{ij}^+ + x_{ij} \tilde{I}_{ij}) \end{cases} \quad \forall i, j \in B \quad (12)$$

潮流方向约束:

$$0 \leq \sqrt{(p_{ij}^+)^2 + (q_{ij}^+)^2} \leq f^+ S_{ij}^{\text{max}} \quad \forall (i, j) \in E \quad (13)$$

$$0 \leq \sqrt{(p_{ij}^-)^2 + (q_{ij}^-)^2} \leq f^- S_{ij}^{\text{max}} \quad \forall (i, j) \in E \quad (14)$$

式中: p_i^g 、 q_i^g 分别为节点 i 处的注入有功、无功功率(即变电站注入功率和分布式电源注入功率); p_i^d 、 q_i^d 分别为节点 i 处的总有功、无功负荷(即原有负荷、增量负荷); f^+ 、 f^- 均为 0-1 状态变量, 表征经过支路 (i, j) 的功率方向, f^+ 为正向即从 i 流向 j , f^- 为反向即从 j 流向 i ; p_{ij}^+ 、 p_{ij}^- 分别为支路 (i, j) 上与规定方向相同和相反的有功潮流大小; q_{ij}^+ 、 q_{ij}^- 分别为支路 (i, j) 上与规定方向相同和相反的无功潮流大小; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为支路 (i, j) 的电阻和电抗; \tilde{I}_{ij} 为支路 (i, j) 处的电流平方值; B 为网络中节点的集合; S_{ij}^{max} 为支路 (i, j) 的视在功率最大值; E 为网络中支路的集合。

(2) 节点电压上下限和支路首末端电压约束:

$$V_{j, \min}^2 < \tilde{V}_j < V_{j, \max}^2 \quad \forall j \in B \quad (15)$$

$$\tilde{V}_j < \tilde{V}_i - 2(p_{ij} r_{ij} + q_{ij} x_{ij}) + \tilde{I}_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) + M(1 - z_{ij}) \quad \forall (i, j) \in E \quad (16)$$

式中: \tilde{V}_i 、 \tilde{V}_j 分别为节点 i 、节点 j 处的电压平方值; $V_{j, \max}$ 、 $V_{j, \min}$ 分别为节点 j 处电压上限和下限; p_{ij} 、 q_{ij} 分别为流过支路 (i, j) 的有功、无功潮流大小; M 为

一足够大的正数; z_{ij} 为 0-1 状态变量, 表征支路 (i, j) 的通断状态。

(3) 支路电流上下限约束:

$$I_{ij, \min}^2 \leq \tilde{I}_{ij} \leq I_{ij, \max}^2 \quad \forall (i, j) \in E \quad (17)$$

式中: $I_{ij, \max}$ 、 $I_{ij, \min}$ 分别为支路 (i, j) 上电流的最大值和最小值。

(4) 注入功率上下限约束:

$$p_i^{g, \min} \leq p_i^g \leq p_i^{g, \max} \quad \forall i \in B^g \quad (18)$$

$$q_i^{g, \min} \leq q_i^g \leq q_i^{g, \max} \quad \forall i \in B^g \quad (19)$$

式中: $p_i^{g, \max}$ 、 $p_i^{g, \min}$ 分别为电源节点 i 有功出力的最大值和最小值; $q_i^{g, \max}$ 、 $q_i^{g, \min}$ 分别为电源节点 i 无功出力的最大值和最小值; B^g 为网络中功率注入节点的集合。

(5) 可开放容量约束:

$$p_i^g = p_i^{\text{PV}} + p_i^{\text{sub}} \quad \forall i \in B \quad (20)$$

$$p_i^d = p_i^{\text{base}} + p_i^{\text{add}} + \Delta p_i^{\text{OPL}} \quad \forall i \in B \quad (21)$$

$$q_i^d = q_i^{\text{base}} + q_i^{\text{add}} + \sqrt{1 - \delta^2} \Delta p_i^{\text{OPL}} / \delta \quad \forall i \in B \quad (22)$$

$$p_i^d \leq p_i^{\text{max}} \quad \forall i \in B \quad (23)$$

$$q_i^d \leq q_i^{\text{max}} \quad \forall i \in B \quad (24)$$

式中: p_i^{PV} 为节点 i 处的光伏电源有功出力; p_i^{sub} 为节点 i 处的变电站有功出力; p_i^{base} 、 q_i^{base} 分别为节点 i 处的有功、无功基础负荷值; p_i^{add} 、 q_i^{add} 分别为节点 i 处的有功、无功增量负荷; δ 为功率因数, 取 0.8; p_i^{max} 为节点 i 可接入负荷有功功率上限; q_i^{max} 为节点 i 可接入负荷无功功率上限。

(6) 径向约束/辐射状约束:

$$0 \leq z_{ij}^+ + z_{ij}^- \leq 1 \quad \forall (i, j) \in E \quad (25)$$

$$f^+ z_{ij}^+ + f^- z_{ij}^- = 1 \quad \forall (i, j) \in E_{\text{nor}} \quad (26)$$

$$f^+ z_{ij}^+ + f^- z_{ij}^- \geq 0 \quad \forall (i, j) \in E_{\text{bal}} \quad (27)$$

式中: z_{ij}^+ 、 z_{ij}^- 均为 0-1 状态变量, 表征是否有正向、反向功率流过线路 (i, j) ; E_{nor} 为常规节点支路集合; E_{bal} 为含有联络开关所在线路的支路集合。

在求解方法方面, 传统 DAC 评估往往采用线性模型, 潮流、电压等约束被简化。这种处理方式虽然提高了计算效率, 但却牺牲了优化结果的精度和可行性。智能优化算法作为解析算法的重要补充, 具有应用范围广的特点, 在 DAC 评估领域也得到应用。但是该算法本身存在计算时间长、局部最优解等问题, 因此须引入兼具效率和精度的算法, 以实现 DAC 的快速准确评估。而影响计算效率的主要原因是潮流方程即式 (28) 保留了非线性特点, 故采用二阶锥松弛 (second-order cone relaxation, SOCR) 将潮流方程转化为二阶锥约束的形式, 如式 (29) 所示, 可实现最优潮流模型的求解并获得良好

的求解速度^[26]。

$$\frac{p_{ij}^2 + q_{ij}^2}{\tilde{V}_j} = \tilde{I}_{ij} \quad \forall (i,j) \in E \quad (28)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2p_{ij} \\ 2q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{V}_j \end{matrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{V}_j \quad \forall (i,j) \in E \quad (29)$$

2.3 评估流程

基于上述模型,可以给出多类型增量负荷场景下配电网 DAC 统计评估方法^[27]的具体流程,如图 2 所示。

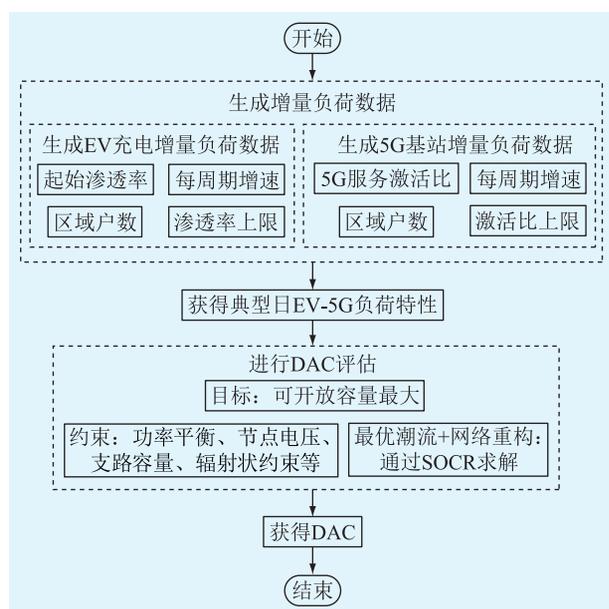


图 2 配电网 DAC 统计评估方法流程

Fig.2 Flow chart of statistical evaluation method for DAC of the distribution network

(1) 根据特定区域内的 EV 起始渗透率数据、区域户数、每周周期增速和渗透率上限获得 EV 充电增量负荷数据,同时根据特定区域内的 5G 服务激活比、区域户数、每周周期增速和激活比上限获得 5G 基站增量负荷数据;

(2) 根据典型日 EV-5G 负荷特性计算峰值负荷同时率;

(3) 将得到的增量负荷数据以及峰值负荷同时率输入到 DAC 评估算法中,配置功率平衡、节点电压、支路容量与辐射状约束等约束条件;

(4) 利用 SOCR 方法优化后的 DAC 评估模型,求解结果即为该配电网 DAC 大小。

3 考虑光伏接入的可开放容量动态优化

3.1 动态规划方法

随着配电网所供负荷量与分布式光伏渗透率

逐步提升,配电网 DAC 呈现一种多阶段波动下降的趋势。如何优化该过程中光伏电源的选址定容工作,尽可能提升配电网 DAC 是一个多阶段的决策过程,可利用动态规划的方法对该问题进行求解^[28]。实际上,配电网 DAC 在负荷增长过程中逐步下降,该过程可按年份分成多个阶段,分布式光伏的接入同样按多个阶段划分,各阶段的决策、决定均会对后续发展造成影响。为尽可能提升各阶段中分布式光伏电源接入下的配电网 DAC,文中将光伏选址定容方案作为动态规划方法中的决策,各阶段选取的决策均对应一种光伏选址定容策略,不同策略产生的影响可对应为动态规划方法中的状态转移。当各阶段的策略确定后便可组成一条决策序列,从多阶段的决策序列中找出最优化的决策过程即为动态规划方法的最优解。

因此,按照动态规划的思想,分布式光伏电源的动态规划过程须先对规划周期进行划分。以 1 a 为一个规划阶段的时间长度展开后续研究。将各阶段分布式光伏不同规划选址位置作为当前阶段的不同规划方案,当前阶段最佳方案的确定须以上一阶段的规划结果为基础。该规划过程中各阶段规划方案的选择仅对下一阶段的光伏规划结果产生影响,且该影响为单向传递,不可逆转。

3.2 基于动态规划的分布式光伏并网约束

分布式光伏电源在并网运行时首先应满足自身容量的要求,其次由于分布式电源的有功出力约束和倒送功率等限制^[29],分布式光伏电源并入配电网时须对上述可开放容量模型增加如下约束:

$$\sum_{i \in \psi^{PV}} z_i^{PV} \leq N^{PV} \quad (30)$$

$$p_i^{PV} \leq z_i^{PV} p_{\max}^{PV} \quad \forall i \in B \quad (31)$$

$$p_i^{PV} \leq p_i^{\text{base}} + p_i^{\text{add}} \quad \forall i \in B \quad (32)$$

式中: z_i^{PV} 为光伏在节点 i 处的安装情况,为二进制变量, $z_i^{PV} = 1$ 表示允许安装, $z_i^{PV} = 0$ 表示不允许安装; N^{PV} 为最大光伏可接入节点数; ψ^{PV} 为光伏电源允许接入节点集合; p_{\max}^{PV} 为光伏有功出力上限值。

动态规划方法中各阶段做出的决策均会对后续发展产生影响,因此在进行各阶段分布式光伏电源的优化配置时,应按照配电网运行现状和上述模型进行配电网支撑能力评估,保证动态规划的结果满足负荷供电需求以及达到 DAC 最大的目标。

4 仿真分析

4.1 场景设置

基于我国中部某城市的配电网网格构建算例。

该网格共包含 4 个供电单元、72 个节点、86 条支路,其中常规支路 44 条,32 条支路配备有供电单元内联络开关(常闭/常开),10 条支路配备有供电单元间联络开关(常闭/常开)。各支路所用电缆线路型号均为 LGJ-185,线路长期容许电流为 515 A、经济输送容量为 2.88 MW。将该标准作为线路容量极限搭建实际的 72 节点配电网网架。同时,在初始网架拓扑中,按照供电节点的不同将配电网网格划分为 4 个供电单元 A、B、C、D,供电单元间互相关联,可相互供电。各供电单元的空间分布情况如图 3 所示。配电网网格的新基建规划建设有如下背景。

(1) 该网格计划 5 a 为一个完整的规划周期,并将该规划周期分为 5 个阶段,每阶段的时间长度为 1 a,每年均须完成 EV 负荷、5G 负荷渗透率指标,且该配电网网格每年的基础负荷增长率为 5%~10%。

(2) 各负荷节点所在供电单元及初始网架结构如图 3 所示,根据实际中 EV 与 5G 服务的预测分析确定不同供电单元中各阶段 EV 负荷、5G 负荷渗透率要求,如表 1 所示。表中, η_A 、 η_B 、 η_C 、 η_D 和 λ_A 、 λ_B 、 λ_C 、 λ_D 分别为供电单元 A、B、C、D 内的 EV 渗透率和用户智能手机 5G 服务激活比。

(3) 为满足部分供电单元负荷增速较快的需求,可利用拓扑重构、增设分布式电源的方式缓解区域间负荷分布不均的压力。

(4) 增设光伏电源时,考虑到接入成本以及接入用地要求等问题,光伏电源接入应满足以下条件:每次允许接入光伏电源的节点不能超过 5 个,每

个节点最大可接入光伏容量的大小为 500 kW_p。

基于上文所提新基建规划建设背景和规划需求数据,使用一台配备 Intel (R) Core (TM) i5-10400CPU@2.90 GHz 的处理器以及 16 GB 运行内存的设备进行仿真。在 MATLAB 2018b 平台中进行编程,通过 Yalmip 工具箱搭建出 DAC 评估模型,再调用 Gurobi 9.1.0 求解器进行求解。

4.2 网架评估

根据上述配电网多阶段发展需求,在不增设光伏电源的情况下,随机选取 3 种常规拓扑结构,利用基于二阶锥的 DAC 评估模型对该配电网系统进行多阶段的动态评估,评估结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着负荷不断增多,各供电单元内节点剩余可开放容量之和均呈现逐渐下降的趋势。在网架固定为拓扑结构 1 时,基本满足所供负荷节点滚动增长阶段的负荷需求;而将网架固定为拓扑结构 2、拓扑结构 3 时,配电网承载能力较为薄弱,在最终阶段二者分别在供电单元 B 和 A 中出现了线路容量不足的问题,难以满足 EV 负荷以及 5G 负荷的指标要求。

考虑到配电网“闭环连接、开环运行”的特性,同一网架往往存在多种拓扑结构。因此,通过调整联络开关状态、变换网架结构,改善配电网内部负荷分布情况,实现 DAC 的提升。在上述 72 节点网格中设置如下 3 种场景。场景 1:不允许配电网进行拓扑重构,按照图 3 所示初始拓扑进行 DAC 的评估;场景 2:允许站内联络线路参与拓扑重构,并计算各供电单元的 DAC;场景 3:允许站间互相供电,

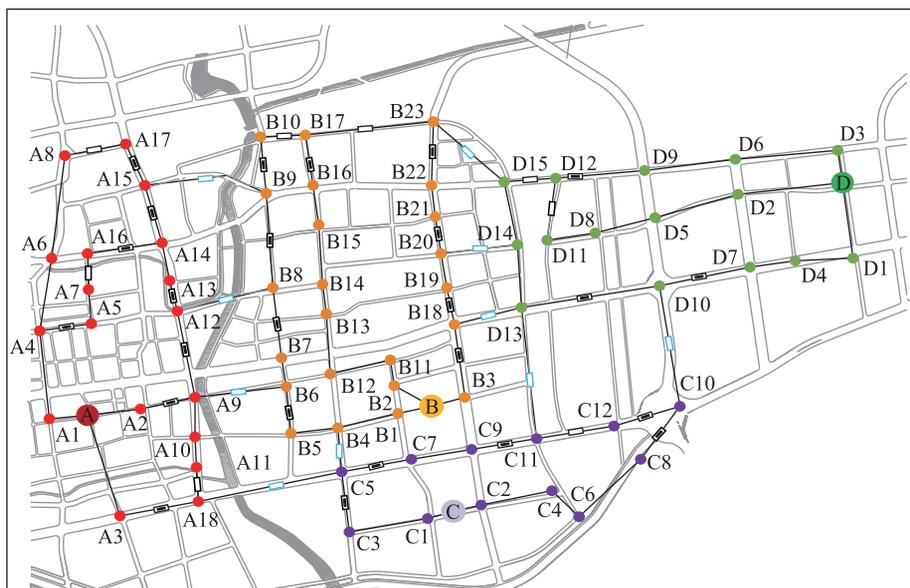


图 3 配电网网格地理接线

Fig.3 Distribution network grid geographic wiring

表 1 EV、5G 负荷渗透率要求
Table 1 EV,5G load permeability requirements

阶段	供电单元 A		供电单元 B		供电单元 C		供电单元 D	
	$\eta_A /$ (辆·户 ⁻¹)	$\lambda_A /$ %	$\eta_B /$ (辆·户 ⁻¹)	$\lambda_B /$ %	$\eta_C /$ (辆·户 ⁻¹)	$\lambda_C /$ %	$\eta_D /$ (辆·户 ⁻¹)	$\lambda_D /$ %
1	0.28	38	0.22	33	0.16	41	0.20	35
2	0.52	58	0.40	48	0.28	51	0.38	50
3	0.76	78	0.58	63	0.40	61	0.56	65
4	0.92	98	0.76	78	0.52	71	0.74	80
5	1.00	100	0.94	93	0.64	81	0.92	95

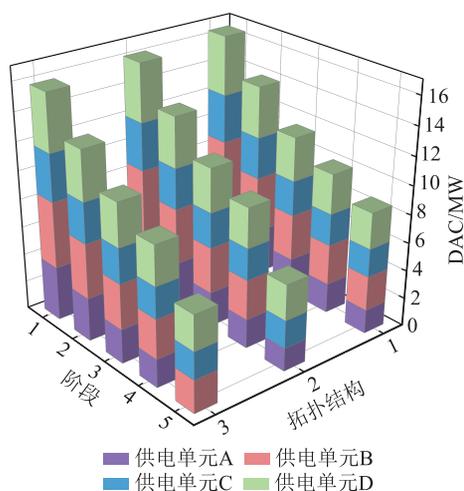


图 4 3 种拓扑下各供电单元 DAC 评估结果对比

Fig.4 Comparison of DAC evaluation results for each power supply unit under three topologies

在站内、站间联络线路均参与拓扑重构的条件下进行 DAC 的动态评估。3 种场景的对比结果见表 2,可知配电网可开放容量大小会受网架结构的影响,在负荷滚动增长时,不同阶段下均存在一种特定拓扑能够实现配电网可开放容量最大化。因此,场景 2、3 的算例测试将各线路运行状态作为决策变量,按照 DAC 评估模型确定重构后各条联络线路的工作状态,各条站间联络线路上的潮流有功功率大小见图 5。

表 2 可开放容量动态评估结果

Table 2 Dynamic evaluation results of available capacity

阶段	场景 1		场景 2		场景 3	
	可开放容量/MW	可开放容量/MW	增长比率/%	可开放容量/MW	增长比率/%	
1	15.87	16.20	2.08	16.65	4.91	
2	13.26	13.59	2.49	14.23	7.32	
3	11.07	11.35	2.53	11.95	7.95	
4	9.67	9.86	1.96	10.71	10.75	
5	8.26	8.46	2.42	9.46	14.53	

观察图 5 可知,随着负荷需求的提升,部分联络线路传输的潮流有功功率大小也在不断增加。同时,由表 2 中场景 2 相对于场景 1 的增长比率可知,通过

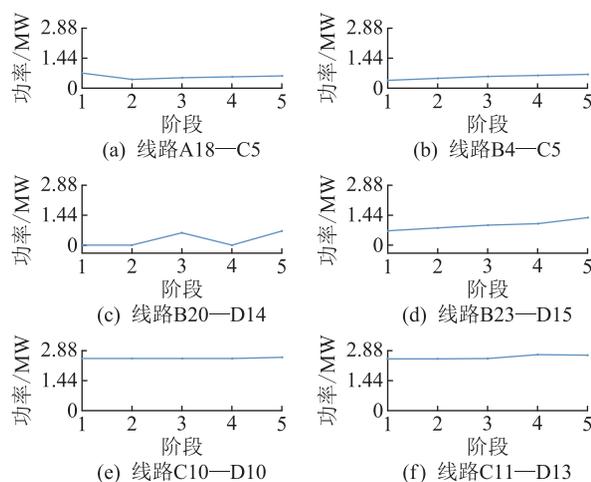


图 5 站间联络线路功率

Fig.5 Power of communication lines between stations

调整站内联络线路运行情况,找出对应负荷分布下网架结构的最优拓扑,可将配电网可开放容量提升 2% 左右,有效提升了配电网可开放容量的大小。并且,对比场景 2、3 中各阶段的增长比率可知,若能合理运用站间联络线路,辅助各区域间进行相互供电,便可实现各供电单元间负荷的均匀分布,进一步提升全网格内整体配电网的可开放容量。

4.3 分布式资源优化配置

配电网 DAC 通常保持下降的趋势,而分布式光伏电源的合理运用能有效改善配电网潮流分布,满足接入更多负荷的需求。因此,按照该配电网网格新建规划建设背景要求,可在场景 3 的基础上展开分布式光伏电源的选址优化,供电单元间允许互相供电,站内、站间联络线路均参与拓扑重构。光伏接入的条件为仅允许在阶段 2、3、4 中接入光伏,供电单元 A 中节点因政策、用地原因不许接入光伏,且每阶段最多允许有 5 个光伏接入节点,每个节点最大接入容量为 500 kWp。根据光伏随机位置接入结果、粒子群算法优化结果和按照动态规划优化模型求解得到的结果计算不同优化条件下配电网 DAC 的提升幅度,并将 DAC 增幅与配电网增设光伏电源总容量之比作为增幅比率,其对比结果见表 3。其中,结合动态规划方法的优化模型在进行各阶段光伏选址时须以上一阶段规划结果为基础,其余 2 种方法则并无该约束限制。观察表 3 可知,分布式光伏电源接入配电网能有效提升配电网 DAC,但光伏接入位置对光伏利用效率的影响较大。在按照随机位置接入光伏的条件下,配电网 DAC 增幅比率较小,阶段 2 中光伏接入后的配电网 DAC 较无光伏条件下容量的增幅比率仅有 35%,光伏电源利用效率较低。而粒子群算法虽能提升光伏接入后的配电网 DAC,增幅比率达到 72%,但

相较于上述优化模型所得 158% 的增幅比率而言仍有一定差距。各阶段中采用优化模型的 DAC 增幅比率均为最高,由此可知,该优化模型能有效提升光伏电源的利用效率,且不会受到由负荷增长引起的负荷分布改变的影响。

表 3 光伏接入成效对比

Table 3 Comparison of the effectiveness of photovoltaic access

阶段	可开放		随机位置		粒子群算法		优化模型	
	容量/ MW	容量增 幅/MW	增幅比 率/%	容量增 幅/MW	增幅比 率/%	容量增 幅/MW	增幅比 率/%	
2	14.23	15.09	35	16.03	72	18.19	158	
3	11.95	14.49	51	15.07	62	17.46	110	
4	10.71	15.96	70	16.30	75	16.97	84	

最后,随着配电网所供负荷量的增加,光伏电源位置区别带来的增幅比率差距在不断缩小,但优化模型所得增幅比率仍为最高。由此可知,虽然配电网网架的承载能力终将受到线路容量限制的影响,但文中所提优化模型仍能完成光伏电源最优选址的规划工作。

5 结论

(1) 文中所提方法可应用于城市或特定区域内配电网 DAC 的总体评估,所得结果对于 EV 充电及通信基础设施规划建设和配电网升级改造均具有一定参考价值。

(2) 算例分析结果显示,网架结构、网格现有用电负荷及各类型增量负荷的增长率等因素对配电网各节点可开放容量有较大影响。因此,综合考虑这些因素可使评估结果更加准确、有效。

(3) 随着 EV 等新基建负荷的接入,城市不同供电单元负荷增长速度不同,城区配电网所受压力也明显不同,采取网络拓扑重构、光伏电源接入等措施可有效提升配电网网络的 DAC,保障电力系统的安全稳定运行。

(4) 分布式光伏电源的接入位置影响着配电网 DAC 的提升,动态规划方法基于各阶段发展现状调整滚动发展阶段中光伏的接入位置,能尽可能提升 DAC 大小,最大化分布式光伏利用效率。

未来的研究中,可依据文中所提最大 DAC 评估方法寻找系统中的过载线路、变压器等瓶颈环节,为电网企业的实际投资决策提供可靠的理论支撑。

致 谢

本文得到国网河南省电力公司科技项目(5217L021000H)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 丁明,方慧,毕锐,等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2187-2201,2.
DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201, 2.
- [3] 李诗颖,杨晓辉. 基于双向动态重构与集群划分的光伏储能选址定容[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(3):51-58.
LI Shiyong, YANG Xiaohui. Capacity and location optimization of photovoltaic and energy storage based on bidirectional dynamic reconfiguration and cluster division[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 51-58.
- [4] 毕会静,马燕峰,秦科源,等. 不同配置模式下分布式光伏发电并网接纳仿真[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(4):236-241.
BI Huijing, MA Yanfeng, QIN Keyuan, et al. Acceptance simulation of distributed photovoltaic power generation grid-connection at different configuration modes[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 236-241.
- [5] 肖友强,邓步青,文云峰. 计及送端电网频率稳定的直流联络线极限承载能力评估[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(2):3-12.
XIAO Youqiang, DENG Buqing, WEN Yunfeng. Total transfer capability assessment of HVDC tie-lines based on frequency stability of the sending-end grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 3-12.
- [6] 谭慧娟,荆朝霞,陈达鹏. 基于 Benders 算法的两电压等级网络可用传输容量计算[J]. 电测与仪表,2020,57(14):34-38,73.
TAN Huijuan, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng. Available transfer capability determination of two-voltage level network based on Benders algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 34-38, 73.
- [7] 张金龙,鲍颜红,黄磊,等. 输电断面热稳定功率极限区间在线识别方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(14):79-85.
ZHANG Jinlong, BAO Yanhong, HUANG Lei, et al. On-line identification method for thermally stable power limit interval of transmission section[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 79-85.
- [8] HUANG Y C, CHEN S R, WANG K, et al. A method to evaluate maximum available capability of accommodating plug-in electric vehicles in residential distribution networks [C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA. IEEE, 2018: 1-5.

- [9] 江苏电力调度控制中心. 关于印发《中压配电网业扩报装可开放容量信息发布的指导意见》的通知[S]. 南京:江苏电力调度控制中心,2018.
Jiangsu Electric Power Dispatching Control Center. Notice on printing and distributing the "Guiding opinions on the release of information on the expandable capacity of medium voltage distribution network industry" [S]. Nanjing: Jiangsu Electric Power Dispatching Control Center,2018.
- [10] 翁晓春,陈石川,陈大才,等. 考虑负荷特性和馈线分段的配电网供电能力评估[J]. 供用电,2021,38(3):61-65,83.
WENG Xiaochun, CHEN Shichuan, CHEN Dacai, et al. Evaluation of power supply capability of distribution network load characteristics and feeder segmentation[J]. Distribution & Utilization,2021,38(3):61-65,83.
- [11] 肖峻,梁子钰,余步鑫. 配电网供电能力曲线的数学模型与形成机理[J]. 中国电机工程学报,2021,41(9):3158-3173.
XIAO Jun, LIANG Ziyu, SHE Buxin. Mathematical model and formation mechanism of total supply capability curve for distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (9) : 3158-3173.
- [12] 刘真,赵健,管敏渊,等. 考虑荷储动态特性时序降维的配电网剩余供电能力评估[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):220-226.
LIU Zhen, ZHAO Jian, GUAN Minyuan, et al. Residue supply capability assessment of distribution network with time series dimension reduction considering dynamic characteristic of load and energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10) : 220-226.
- [13] TANG Z, LIU Y, LIU J, et al. Multi-stage sizing approach for development of utility-scale BESS considering dynamic growth of distributed photovoltaic connection[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016,4(4):554-565.
- [14] 梁钢,高明,宋新甫,等. 配电网部分馈线的剩余供电能力[J]. 现代电力,2019,36(4):72-78.
LIANG Gang, GAO Ming, SONG Xinfu, et al. Residue supply capability of partial feeders in distribution networks [J]. Modern Electric Power, 2019, 36(4) : 72-78.
- [15] 赵志强,高跃,付高善,等. 配电系统实际运行的剩余供电能力计算方法[J]. 现代电力,2018,35(4):59-65.
ZHAO Zhiqiang, GAO Yue, FU Gaoshan, et al. Calculation method of residue supply capability in actual operation of distribution systems[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(4) : 59-65.
- [16] 甄国栋,高新智,于树刚,等. 配电网的剩余供电能力实用模型[J]. 电网技术,2018,42(10):3420-3432.
ZHEN Guodong, GAO Xinzhi, YU Shugang, et al. The practical residue supply capability model of distribution network [J]. Power System Technology, 2018, 42(10) : 3420-3432.
- [17] 胡伟,杨梓俊,荆江平,等. 计及N-1安全和网络重构的配网可开放容量评估[J]. 现代电力,2020,37(2):125-132.
HU Wei, YANG Zijun, JING Jiangping, et al. Open capacity evaluation of distribution network considering N-1 security criteria and network reconfiguration [J]. Modern Electric Power, 2020, 37(2) : 125-132.
- [18] 孙伟卿,黄福泉,张巍. 考虑需求响应的馈线可开放容量评估[J]. 电力自动化设备,2021,41(6):156-165.
SUN Weiqing, HUANG Fuquan, ZHANG Wei. Evaluation of feeder available capacity considering demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6) : 156-165.
- [19] 田梦瑶,汤波,杨秀,等. 综合考虑充电需求和配电网接纳能力的电动汽车充电站规划[J]. 电网技术,2021,45(2):498-509.
TIAN Mengyao, TANG Bo, YANG Xiu, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering charging demands and acceptance capacity of distribution network [J]. Power System Technology, 2021, 45(2) : 498-509.
- [20] 刘友波,王晴,曾琦,等. 能源互联网背景下5G网络能耗管控关键技术及展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(12):174-183.
LIU Youbo, WANG Qing, ZENG Qi, et al. Key technologies and prospects of energy consumption management for 5G network in background of energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12) : 174-183.
- [21] 武晓朦,时政,付子义,等. 基于密度峰值快速搜索聚类的多场景分布式电源规划[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(2):117-123.
WU Xiaomeng, SHI Zheng, FU Ziyi, et al. Multi-scene distributed generation planning based on clustering by fast search and find of density peak [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41(2) : 117-123.
- [22] 曾博,穆宏伟,董厚琦,等. 考虑5G基站低碳赋能的主动配电网优化运行[J]. 上海交通大学学报,2022,56(3):279-292.
ZENG Bo, MU Hongwei, DONG Houqi, et al. Optimization of active distribution network operation considering decarbonization endowment from 5G base stations [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(3) : 279-292.
- [23] 周孟戈,谢松,彭博,等. 计及5G基站负荷概率特性的配电网扩展规划方法[J]. 电工电能新技术,2022,41(1):60-68.
ZHOU Mengge, XIE Song, PENG Bo, et al. Expansion planning method of distribution network with 5G base stations considering probability characteristics of load [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(1) : 60-68.
- [24] 王晶,黄越辉,李驰,等. 考虑空间相关性和天气类型划分的多光伏电站时间序列建模方法[J]. 电网技术,2020,44(4):1376-1384.
WANG Jing, HUANG Yuehui, LI Chi, et al. Time series modeling method for multi-photovoltaic power stations considering spatial correlation and weather type classification [J]. Power System Technology, 2020, 44(4) : 1376-1384.
- [25] 薛世伟,贾清泉,张珂欣,等. 用电数据驱动的低压配电网负荷随机建模及不平衡评估[J]. 电力系统自动化,2022,46(8):143-153.
XUE Shiwei, JIA Qingquan, ZHANG Kexin, et al. Electricity-consumption-data-driven stochastic modeling and unbalance assessment of load in low voltage distribution network [J]. Auto-

- mation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 143-153.
- [26] 肖遥, 别朝红, 黄格超, 等. 基于二阶锥最优潮流的机会约束分布鲁棒优化研究[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1505-1518.
XIAO Yao, BIE Zhaohong, HUANG Gechao, et al. Chance-constrained distributional robust optimization based on second-order cone optimal power flow[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1505-1518.
- [27] 马草原, 孙展展, 尹志超, 等. 基于双重混合粒子群算法的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 120-128.
MA Caoyuan, SUN Zhanzhan, YIN Zhichao, et al. Reconfiguration of distribution network based on double hybrid particle swarm algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 120-128.
- [28] 陈东新, 武志刚. 配电自动化终端布点优化的动态规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 1-8.
CHEN Dongxin, WU Zhigang. Dynamic planning of distribution automation terminal units placement optimization [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 1-8.
- [29] 朱嘉麒, 董树锋, 徐成司, 等. 考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2275-2282.
ZHU Jiaqi, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Evaluation model of total supply capability of distribution network considering multiple transfers[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2275-2282.

作者简介:



郭勇

郭勇(1981),男,硕士,高级工程师,从事配电网规划技术和配电网可开放容量相关工作(E-mail:47301183@qq.com);

李秋燕(1985),女,硕士,高级工程师,从事配电网规划技术和配电网可开放容量相关工作;

马杰(1985),女,硕士,高级工程师,从事电网规划技术工作。

Evaluation and optimization of available capacity of distribution network under new infrastructure load and photovoltaic access

GUO Yong¹, LI Qiuyan¹, MA Jie¹, QUAN Shaoli¹, LI Zhengbo², LIU Youbo²

(1. State Grid Henan Electric Power Company Economic Research Institute, Zhengzhou 450000, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the proposal of the new infrastructure concept, new loads represented by 5G base stations and electric vehicles are connected to the urban distribution network on a large scale, which has a significant impact on the safety and economic operation of the distribution network. In order to evaluate the capacity of urban distribution network to accommodate the new infrastructure load, a method for evaluating the available capacity of distribution network based on load growth demand and distribution network carrying capacity is proposed. The total amount of increased load of each load node is calculated as the available capacity under the condition of new infrastructure load and distributed energy access. Considering the constraints of voltage and power flow, the second-order cone relaxation method is used to solve the model. In addition, considering the influence of the location and sequence of distributed photovoltaic access on the available capacity, the grid-connected position of distributed photovoltaic is optimized according to the dynamic programming method with the objective of maximising the available capacity. The simulation analysis is carried out in a regional distribution network grid, and the results show that the proposed method can effectively evaluate the available capacity level of the urban distribution network grid, and realize the dynamic optimization of available capacity through the orderly access of distributed photovoltaic.

Keywords: urban distribution network; new infrastructure load; available capacity evaluation; second-order cone relaxation; photovoltaic unit siting optimization; dynamic programming

(编辑 陆海霞)