

考虑智能软开关接入的主动配电网扩展规划方法

张沈习¹, 王浩宇¹, 李然¹, 程浩忠¹, 方一晨², 李珂³, 王旭¹, 向月⁴

- (1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240;
2. 国网杭州供电公司, 浙江省 杭州市 310009; 3. 国家电网有限公司华东分部, 上海市 浦东新区 200120;
4. 四川大学电气工程学院, 四川省 成都市 610065)

Active Distribution Network Expansion Planning Method Considering the Integration of Soft Open Point

ZHANG Shenxi¹, WANG Haoyu¹, LI Ran¹, CHENG Haozhong¹, FANG Yichen²,
LI Ke³, WANG Xu¹, XIANG Yue⁴

- (1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. State Grid Hangzhou Electric Power Company, Hangzhou 310009, Zhejiang Province, China; 3. East China Branch of State Grid Corporation of China, Pudong New Area, Shanghai 200120, China; 4. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The wide application of flexible interconnection devices brings great challenges to the planning of active distribution network(ADN). This paper proposes a novel ADN expansion planning method considering the integration of soft open point(SOP), in which the investment of substation, transmission line construction, SOP, distributed generation, energy storage and reactive power compensation are planned coordinately. First, an improved Gaussian mixture model clustering method is adopted to deal with the uncertainties of the power of distributed generation and load demand. On this basis, an expansion planning model for ADN considering the integration of SOP is established, whose objective function is to minimize the annual comprehensive cost. Then, the original non-convex and nonlinear model is transformed to a mixed-integer second-order cone programming(MISOCP) model by linearization and convex relaxation techniques, and a successive contraction convex relaxation algorithm is developed to obtain the optimal solution of the original problem with a sufficiently small relaxation gap. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed planning model and solving strategy are verified on a 54-bus ADN.

KEY WORDS: active distribution network (ADN); expansion planning; soft open point (SOP); Gaussian mixture model; mixed-integer second-order cone programming (MISOCP);

基金项目: 国家自然科学基金项目(51907123, 52177099)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51907123, 52177099).

successive contraction convex relaxation algorithm

摘要: 柔性互联装置的广泛应用给主动配电网(active distribution network, ADN)规划带来巨大挑战。该文提出一种考虑智能软开关(soft open point, SOP)接入的ADN扩展规划方法,对变电站新建及扩容,线路新建,智能软开关、分布式电源、储能系统以及无功补偿等设备的选址定容进行协同规划。首先,考虑分布式电源出力及负荷功率不确定性,采用基于改进高斯混合模型的聚类方法构建典型日场景。在此基础上,以年综合费用最小为目标函数,建立了考虑SOP接入的ADN扩展规划模型。然后,通过线性化和二阶锥松弛技术,将原始非凸非线性规划模型转化为混合整数二阶锥规划(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)模型,并提出逐次收缩凸松弛算法以获得凸松弛间隙足够小的原问题最优解。最后,在54节点主动配电网算例上验证了所提规划模型和求解算法的可行性与有效性。

关键词: 主动配电网; 扩展规划; 智能软开关; 高斯混合模型; 混合整数二阶锥规划; 逐次收缩凸松弛算法

0 引言

主动配电网(active distribution network, ADN)是促进高比例分布式可再生能源消纳的重要载体^[1]。多样性负荷以及高渗透率分布式电源(distributed generation, DG)带来的随机性和不确定性对ADN的调控能力提出了更高的要求^[2]。智能

软开关(soft open point, SOP)作为一种替代传统联络开关的新型柔性配电装置,可实现对网络潮流的灵活快速调节^[3],使得 ADN 网络形态结构更加柔性^[4-5],因而逐渐被应用到实际工程中。为适应新形势下 SOP 广泛接入的需求,同时充分发挥其给 ADN 带来的好处,研究考虑 SOP 接入的 ADN 扩展规划具有重要意义。

ADN 扩展规划的目的在于通过确定最优网架结构和设备元件配置方案,在满足负荷需求的同时,增强 ADN 对可再生能源的接纳能力,提升资产利用率,减少和延缓投资以及提高供电质量和供电可靠性等。文献[6]采用场景分析法对不确定性进行处理,综合考虑变电站、配电线路和 DG 等资源,建立了以规划期内总投资费用最小为目标的 ADN 扩展规划模型,并采用遗传算法求解,但智能算法求解容易陷入局部最优解;文献[7]建立了考虑多种可靠性指标成本的 ADN 扩展规划模型,并将模型转化为混合整数线性规划问题进行求解,但损失了一定精确度;文献[8]以总的投资与运行费用最小为目标,建立了基于二阶锥松弛(second-order cone relaxation, SOCR)的 ADN 扩展规划模型,详细分析了多种主动管理策略对规划结果的影响;文献[9]在文献[8]的基础上,对网络扩展与 DG、储能(battery energy storage system, BESS)和静止无功发生器(static var generator, SVG)等设备的选址定容进行多阶段协同规划,并提出改进 Benders 分解方法求解该大规模混合整数二阶锥规划(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)模型。上述文献研究均表明,对 ADN 优化规划可以实现资源在安全、经济、可靠条件下的优化配置,支撑 ADN 高效运行。然而,在当前大力发展柔性互联技术并推广实用的背景下,鲜有文献在 ADN 扩展规划研究中协同考虑 SOP 的接入。

应用于 ADN 馈线柔性互联的 SOP 具有良好的发展前景,但其接入位置、接入容量将影响 ADN 的拓扑结构与运行方式。目前,已有文献针对 SOP 的选址与定容进行了研究。文献[10-11]考虑 DG 运行特性,基于 Wasserstein 距离构建典型场景,提出 SOP 的优化配置方法,采用基于模拟退火和锥规划的混合优化算法进行求解,研究结果表明通过对 SOP 的优化配置能够提高 ADN 的整体经济性;文献[12]在考虑有载调压变压器抽头(on-line tap

changer, OLTC)调节、无功补偿装置的基础上提出了 SOP 选址定容的 3 层规划模型;文献[13-14]则分别从改善系统电压和提升供电可靠性的角度建立 SOP 双层规划模型。但是上述研究都是基于确定的 ADN 网架结构和分布式能源配置,将 SOP 的规划作为唯一决策变量,没有同时进行 ADN 的扩展规划,无法全面考虑 SOP 接入对 ADN 中“源-网-荷-储”互动性的影响,未能充分挖掘 ADN 综合资源协调规划运行的潜力。

本文基于现有文献研究成果,针对多线供电、柔性互联的应用场景,提出考虑双端 SOP 接入的 ADN 扩展规划方法。首先,采用基于改进的高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)聚类方法处理 ADN 扩展规划中面临的 DG 出力和负荷不确定性,构建考虑时序特性的典型日场景。然后,以年综合费用最小为目标函数,考虑变电站的新建与扩容,线路的新建,以及双端 SOP、DG、BESS 和 SVG 的选址定容等规划措施,建立基于 SOCR 的 ADN 扩展规划模型;针对该大规模 MISOCP 模型,提出一种逐次收缩凸松弛算法,在可接受的计算时间内得到凸松弛间隙足够小的原问题最优解。最后,在 54 节点 ADN 算例上,对所提规划模型和求解算法的可行性与有效性进行分析和验证。

1 基于改进 GMM 聚类的典型日场景构建

为综合考虑 ADN 全年模拟运行情况,同时提高规划模型的求解效率,可以采用基于多场景分析的不确定性规划方法^[6]。传统聚类方法多以距离长短为衡量依据,存在“硬分配”的局限性,而且当面对海量数据集时,难以兼顾聚类效率与聚类精度的要求^[15]。考虑到以上不足,本节提出基于改进 GMM 聚类的典型日场景构建方法,针对负荷、光伏(photovoltaic generation, PVG)和风电(wind turbine generation, WTG)的全年时序数据集进行聚类分析和场景优选,构建能够较准确地表征全年风光功率变化特性的典型日场景。

1.1 改进 GMM 聚类

GMM 聚类是一种基于概率分布模型的聚类方法,通过判断输入样本属于某一类的概率大小来确定其最终的归属分组,能够较好地捕获数据属性之间的相关性和依赖性^[16],其模型如下:

$$\begin{cases} f_{\text{GMM}}(\boldsymbol{p}) = \sum_{u=1}^U \alpha_u N(\boldsymbol{p} | \boldsymbol{\mu}_u, \boldsymbol{\zeta}_u) \\ N(\boldsymbol{p} | \boldsymbol{\mu}_u, \boldsymbol{\zeta}_u) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\boldsymbol{\zeta}_u|^{1/2}} \times \\ \exp[-\frac{1}{2}(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{\mu}_u)^T \boldsymbol{\zeta}_u^{-1}(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{\mu}_u)] \\ \sum_{u=1}^U \alpha_u = 1, \forall \alpha_u \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $N(\boldsymbol{p} | \boldsymbol{\mu}_u, \boldsymbol{\zeta}_u)$ 为第 u 个高斯分布的概率密度函数; α_u 、 $\boldsymbol{\mu}_u$ 和 $\boldsymbol{\zeta}_u$ 分别为待估计的第 u 个高斯分布的权重、均值、协方差矩阵; $\boldsymbol{p} = [\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2, \dots, \boldsymbol{p}_y, \dots, \boldsymbol{p}_Y]^T$ 为输入样本数据集; Y 为输入样本总数; d 为 \boldsymbol{p}_y 的维数。考虑到负荷功率和 DG 出力时序匹配的相关性会影响规划结果^[17], 本文选取负荷、PVG 和 WTG 日功率曲线的均值和标准差共同作为单个典型日场景的表征, 即 $\boldsymbol{p}_y = [P_{y,\text{mean}}^L, P_{y,\text{std}}^L, P_{y,\text{mean}}^{\text{PVG}}, P_{y,\text{std}}^{\text{PVG}}, P_{y,\text{mean}}^{\text{WTG}}, P_{y,\text{std}}^{\text{WTG}}]^T$, $y=1, 2, \dots, Y$ 。

通常采用最大期望法^[18]对 GMM 参数进行迭代估计, 然而该算法对初始聚类中心的取值比较敏感, 鲁棒性较差。为弥补不足, 本文提出采用基于 Mahalanobis 距离的 k-means 聚类^[19]为 U 个多元高斯分布参数 $\boldsymbol{\mu}_u$ 和 $\boldsymbol{\zeta}_u$ 的迭代求解提供初始值。限于篇幅, 最大期望法及 k-means 聚类算法计算过程分别参见文献[18-19], 不再赘述。

1.2 最佳聚类数确定

采用贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)对 GMM 聚类组数进行概率估计, 逐步确定最佳聚类数。以 BIC 值最低的模型更优^[15], 其对应的 U 值即为最佳聚类数。BIC 定义为

$$Z_{\text{BIC}} = -2\ln(L_U) + \eta \ln(Y) \quad (2)$$

式中: η 为模型参数个数; L_U 为 GMM 模型似然函数的极大值。

1.3 典型日场景构建

经过改进 GMM 聚类获得 U 个典型日场景分组后, 为了使所求典型日场景与组内所有日场景的相关性系数之和最大, 定义如式(3)所示的平均相关系数, 依次选取每个分组内具有平均相关系数值最大的日场景为典型日场景^[20]。

$$\rho_{X_a} = \frac{1}{N_u} \sum_{X_b \in C_u} \frac{C_{\text{ov}}(X_a, X_b)}{\sqrt{V_{\text{ar}}(X_a) \cdot V_{\text{ar}}(X_b)}} \quad (3)$$

式中: C_u 和 N_u 分别为第 u 组内包含的日场景集合和日场景个数; X_a 和 X_b 为第 u 组内的任意两个日

场景, 包含当天负荷、PVG 和 WTG 在每个时段的平均功率点; $C_{\text{ov}}(X_a, X_b)$ 为 X_a 和 X_b 的协方差; $V_{\text{ar}}(X_a)$ 和 $V_{\text{ar}}(X_b)$ 分别为 X_a 和 X_b 的方差。

2 规划模型

在上述通过基于改进 GMM 聚类方法构建的 ADN 典型日场景基础上, 本节建立考虑 SOP 接入的 ADN 扩展规划模型。该模型综合考虑了 ADN 源-网-荷-储的规划以及在典型日场景中的模拟运行。

2.1 目标函数

ADN 扩展规划模型以规划期内 ADN 年综合费用最小为目标函数, 包括折算到每年的规划投资费用 C^{INV} 和模拟运行费用 C^{OPE} 。其中, C^{OPE} 包括设备运行维护费用 C^{OM} 、向上级电网购电费用 $C_{u,t}^{\text{PU}}$ 、需求侧管理费用 $C_{u,t}^{\text{DSM}}$ 和弃光弃风惩罚费用 $C_{u,t}^{\text{CUR}}$ 。具体计算方法如下:

$$\min F = C^{\text{INV}} + C^{\text{OPE}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C^{\text{INV}} = & \tau^S \sum_{i \in \mathcal{Y}_S} c_i^S x_i^S + \tau^T \sum_{i \in \mathcal{Y}_{S0}} c_i^T x_i^T + \tau^L \sum_{ij \in \mathcal{Y}_L} c^L x_{ij}^L L_{ij} + \\ & \sum_{ij \in \mathcal{Y}_{\text{SOP}}} (\tau^{\text{TL}} c^{\text{TL}} x_{ij}^{\text{TL}} L_{ij} + \tau^{\text{SOP}} c^{\text{SOP}} z_{ij}^{\text{SOP}}) + \tau^{\text{PVG}} \\ & \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{PVG}}} c^{\text{PVG}} z_i^{\text{PVG}} + \tau^{\text{WTG}} \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{WTG}}} c^{\text{WTG}} z_i^{\text{WTG}} + \tau^{\text{SVG}} \\ & \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{SVG}}} c^{\text{SVG}} z_i^{\text{SVG}} + \tau^{\text{BESS}} \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{BESS}}} (c^{\text{BESS,P}} S_i^{\text{BESS}} + \\ & c^{\text{BESS,E}} E_i^{\text{BESS}}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$C^{\text{OPE}} = C^{\text{OM}} + C^{\text{PU}} + C^{\text{DSM}} + C^{\text{CUR}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C^{\text{OM}} = & \sum_{i \in \mathcal{Y}_S} c_i^{\text{S,OM}} x_i^S + \sum_{i \in \mathcal{Y}_{S0}} c_i^{\text{T,OM}} x_i^T + \sum_{ij \in \mathcal{Y}_L} c_{ij}^{\text{L,OM}} x_{ij}^L + \\ & \sum_{ij \in \mathcal{Y}_{\text{SOP}}} c_{ij}^{\text{TL,OM}} x_{ij}^{\text{TL}} + \sum_{ij \in \mathcal{Y}_{\text{SOP}}} c^{\text{SOP,OM}} z_{ij}^{\text{SOP}} + \\ & 365 \sum_{u \in \Omega_t} D_u \sum_{t \in \Omega_t} (\sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{PVG}}} c^{\text{PVG,OM}} P_{i,u,t}^{\text{PVG}} + \\ & \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{WTG}}} c^{\text{WTG,OM}} P_{i,u,t}^{\text{WTG}}) + \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{SVG}}} c^{\text{SVG,OM}} z_i^{\text{SVG}} + \\ & \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{BESS}}} c^{\text{BESS,OM}} E_i^{\text{BESS}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$C_{u,t}^{\text{PU}} = 365 \sum_{u \in \Omega_t} D_u \sum_{t \in \Omega_t} \sum_{i \in \mathcal{Y}_S \cup \mathcal{Y}_{S0}} c_{u,t}^{\text{P}} P_{i,u,t}^{\text{S}} \quad (8)$$

$$C_{u,t}^{\text{DSM}} = 365 \sum_{u \in \Omega_t} D_u \sum_{t \in \Omega_t} \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{DSM}}} c^{\text{DSM}} P_{i,u,t}^{\text{DSM}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} C_{u,t}^{\text{CUR}} = & 365 \sum_{u \in \Omega_t} D_u \sum_{t \in \Omega_t} (\sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{PVG}}} c^{\text{PVG,C}} P_{i,u,t}^{\text{PVG,C}} + \\ & \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{WTG}}} c^{\text{WTG,C}} P_{i,u,t}^{\text{WTG,C}}) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\tau^e = r(1+r)^{L_e^T} / [(1+r)^{L_e^T} - 1]$ 为设备 e 的现值转等年值系数; r 为贴现率; L_e^T 为设备 e 的经济使用

年限； Ω_u 和 Ω_t 分别为典型日场景和模拟运行时段集合； u 和 t 分别表示当前的典型日场景和时段； D_u 为第 u 个典型日场景的概率； Ψ_S 、 Ψ_{S_0} 、 Ψ_L 、 Ψ_N 、 Ψ_{SOP} 、 Ψ_{PVG} 、 Ψ_{WTG} 、 Ψ_{SVG} 、 Ψ_{BESS} 和 Ψ_{DSM} 分别为待新建变电站节点集合、待扩容变电站节点集合、线路集合、负荷节点集合、SOP 待选线路集合、PVG 待选节点集合、WTG 待选节点集合、SVG 待选节点集合、BESS 待选节点集合和参与需求管理的负荷节点集合； c_i^S 、 c_i^T 和 c^L 分别为变电站新建成本、变电站扩容成本、单位长度线路新建成本； c^{SOP} 和 c^{TL} 分别为 SOP 单位容量投资成本和配套联络线单位长度投资成本； c^{PVG} 、 c^{WTG} 和 c^{SVG} 分别为 PVG、WTG 和 SVG 单位容量投资成本； $c^{BESS,P}$ 和 $c^{BESS,E}$ 分别为 BESS 单位功率和容量投资成本； x_i^S 、 x_i^T 和 x_{ij}^L 分别为变电站新建、变电站扩容、线路新建的决策变量； z_{ij}^{SOP} 和 x_{ij}^{TL} 分别为 SOP 安装数量和配套联络线投建的决策变量； z_i^{PVG} 、 z_i^{WTG} 和 z_i^{SVG} 分别为 PVG、WTG 和 SVG 安装数量的决策变量； L_{ij} 为线路 ij 的长度；连续变量 S_i^{BESS} 和 E_i^{BESS} 分别为 BESS 安装功率和容量的决策变量； $P_{i,u,t}^S$ 为变电站输送有功功率； $P_{i,u,t}^{PVG}$ 和 $P_{i,u,t}^{WTG}$ 分别为 PVG 和 WTG 有功出力； $c_i^{T,OM}$ 和 $c_i^{S,OM}$ 分别为变电站的年运维成本； $c^{L,OM}$ 和 $c^{TL,OM}$ 分别为线路的年运维成本； $c^{SOP,OM}$ 、 $c^{SVG,OM}$ 和 $c^{BESS,OM}$ 分别为 SOP、SVG 和 BESS 单位安装容量的年运维成本； $c^{PVG,OM}$ 和 $c^{WTG,OM}$ 分别为 PVG 和 WTG 发出单位电量的运维成本； c^{DSM} 为可中断负荷中断单位电量的补偿成本； $P_{i,u,t}^{DSM}$ 为第 i 个可中断负荷的负荷中断量； $c_{u,t}^P$ 为变电站向上级电网购电价格； $c^{PVG,C}$ 和 $c^{WTG,C}$ 分别为 PVG 和 WTG 的单位弃光弃风惩罚成本； $P_{i,u,t}^{PVG,C}$ 和 $P_{i,u,t}^{WTG,C}$ 分别为弃光和弃风功率。

2.2 约束条件

2.2.1 变电站新建与扩容状态约束

$$x_i^S \in \{0,1\}, \forall i \in \Psi_S \quad (11)$$

$$x_i^T \in \{0,1\}, \forall i \in \Psi_{S_0} \quad (12)$$

式中： x_i^S 取 1 表示新建变电站 i ，取 0 则表示不新建； x_i^T 取 1 表示变电站 i 扩容，取 0 则表示不扩容。

2.2.2 辐射网线路投建状态约束

$$x_{ij}^L \in \{0,1\}, \forall ij \in \Psi_L \quad (13)$$

式中 x_{ij}^L 取 1 表示投建线路 ij ，取 0 则表示线路 ij

不投建。

2.2.3 设备安装约束

1) SOP 安装位置与容量约束：

$$\begin{cases} 0 \leq z_{ij}^{SOP} \leq z_{\max,ij}^{SOP} x_{ij}^{TL}, & \forall ij \in \Psi_{SOP} \\ S_{ij}^{SOP} = z_{ij}^{SOP} S_{\text{rated}}^{SOP}, & \forall ij \in \Psi_{SOP} \end{cases} \quad (14)$$

式中： x_{ij}^{TL} 为 SOP 待安装位置处配套联络线是否新建，取 1 表示待选线路 ij 作为安装 SOP 的联络线投建，取 0 则表示线路 ij 将不会作为联络线投建；

$z_{\max,ij}^{SOP}$ 为线路 ij 上单位容量 SOP 的最大安装数量；

S_{rated}^{SOP} 为 SOP 的单位安装容量。

2) DG 安装容量约束：

$$\begin{cases} \sum_{i \in \Psi_{WTG}} z_i^{WTG} P_{\text{rated}}^{WTG} + \sum_{i \in \Psi_{PVG}} z_i^{PVG} P_{\text{rated}}^{PVG} \leq \xi \sum_{i \in \Psi_N} P_{\max,i}^L \\ 0 \leq z_i^{WTG} \leq z_{\max,i}^{WTG}, \forall i \in \Psi_{WTG} \\ 0 \leq z_i^{PVG} \leq z_{\max,i}^{PVG}, \forall i \in \Psi_{PVG} \end{cases} \quad (15)$$

式中： P_{rated}^{WTG} 和 P_{rated}^{PVG} 分别为 WTG 和 PVG 的单位安装容量； $P_{\max,i}^L$ 为节点 i 处的最大负荷； ξ 为 ADN 中 DG 最大渗透率； $z_{\max,i}^{WTG}$ 和 $z_{\max,i}^{PVG}$ 分别为待选安装节点 i 处的单位容量 WTG 和 PVG 最大允许安装数量。

3) SVG 安装容量约束：

$$\begin{cases} 0 \leq z_i^{SVG} \leq z_{\max,i}^{SVG}, \forall i \in \Psi_{SVG} \\ 0 \leq \sum_{i \in \Psi_{SVG}} z_i^{SVG} \leq z_{\max}^{SVG} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $z_{\max,i}^{SVG}$ 为节点 i 处最大安装 SVG 数量； z_{\max}^{SVG} 为 ADN 中 SVG 安装数量上限。

4) BESS 安装功率和容量约束：

$$\begin{cases} 0 \leq S_i^{BESS} \leq S_{\max,i}^{BESS}, \forall i \in \Psi_{BESS} \\ 0 \leq E_i^{BESS} \leq E_{\max,i}^{BESS}, \forall i \in \Psi_{BESS} \\ S_i^{BESS} \leq E_i^{BESS} \beta^{BESS}, \forall i \in \Psi_{BESS} \\ \sum_{i \in \Psi_{BESS}} S_i^{BESS} \leq S_{\max}^{BESS} \\ \sum_{i \in \Psi_{BESS}} E_i^{BESS} \leq E_{\max}^{BESS} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $S_{\max,i}^{BESS}$ 和 $E_{\max,i}^{BESS}$ 分别为节点 i 处 BESS 允许安装的最大额定功率和容量； β^{BESS} 为储能最大倍率系数； S_{\max}^{BESS} 和 E_{\max}^{BESS} 分别为 ADN 中安装 BESS 的最大额定功率和容量。

2.2.4 网络拓扑约束

由于本文选定 SOP 待选安装位置在联络开关处^[3,10]，于是所提 ADN 扩展规划需对辐射网络和联

络线路协同规划。因此,为保证用于安装 SOP 而配套建设的联络线避开辐射网已选线路,增加相关的逻辑约束如式(18)所示。

$$x_{ij}^{\text{TL}} + x_{ij}^{\text{L}} \leq 1, \forall ij \in \Psi_{\text{SOP}} \quad (18)$$

通过建立拓扑结构与 ADN 辐射状网络保持一致的虚拟网络来实现其开环性和连通性约束^[21],该虚拟网络假设变电站节点为源节点,负荷节点的虚拟负荷为 1。

$$\sum_{j \in \kappa(i)} F_{ij} - \sum_{n \in \rho(i)} F_{ni} = -1, \forall i \in \Psi_{\text{N}} \setminus (\Psi_{\text{S}} \cup \Psi_{\text{S0}}) \quad (19)$$

$$0 \leq \sum_{j \in \kappa(i)} F_{ij} \leq |\Psi_{\text{N}}| - |\Psi_{\text{S0}}|, \forall i \in \Psi_{\text{S0}} \quad (20)$$

$$-1 + x_i^{\text{S}} \leq \sum_{j \in \kappa(i)} F_{ij} \leq -1 + x_i^{\text{S}} (|\Psi_{\text{N}}| - |\Psi_{\text{S0}}|), \forall i \in \Psi_{\text{S}} \quad (21)$$

$$-x_{ij}^{\text{L}} (|\Psi_{\text{N}}| - |\Psi_{\text{S0}}|) \leq F_{ij} \leq x_{ij}^{\text{L}} (|\Psi_{\text{N}}| - |\Psi_{\text{S0}}|), \forall ij \in \Psi_{\text{L}} \quad (22)$$

式中: $\kappa(i)$ 和 $\rho(i)$ 分别为节点 i 的子节点集合和父节点集合; F_{ij} 为由节点 i 流向节点 j 的虚拟功率; $|\cdot|$ 为集合中元素的个数。

2.2.5 ADN 运行安全约束

1) 变电站节点功率约束:

$$\begin{cases} \sqrt{(P_{i,u,t}^{\text{S}})^2 + (Q_{i,u,t}^{\text{S}})^2} \leq x_i^{\text{S}} S_{\text{rated},i}^{\text{S}}, \forall i \in \Psi_{\text{S}} \\ \sqrt{(P_{i,u,t}^{\text{S}})^2 + (Q_{i,u,t}^{\text{S}})^2} \leq S_{\text{rated},i}^{\text{S0}} + x_i^{\text{T}} S_{\text{rated},i}^{\text{T}}, \forall i \in \Psi_{\text{S0}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $S_{\text{rated},i}^{\text{S}}$ 和 $S_{\text{rated},i}^{\text{S0}}$ 分别为节点 i 处待新建变电站和已有变电站的变压器额定容量; $S_{\text{rated},i}^{\text{T}}$ 为已有变电站待扩容变压器的额定容量。

2) OLTC 调节约束:

$$v_{i,u,t} = \sum_{k=0}^K (V_{\text{min},i} + \Delta V k)^2 b_{k,i,u,t}, \forall i \in \Psi_{\text{S}} \cup \Psi_{\text{S0}} \quad (24)$$

$$\sum_{k=0}^K b_{k,i,u,t} = 1, \forall i \in \Psi_{\text{S}} \cup \Psi_{\text{S0}} \quad (25)$$

式中: ΔV 为 OLTC 抽头每一档调节电压标么值; $b_{k,i,u,t}$ 为 0-1 标识变量,表示 OLTC 抽头位置; K 为 OLTC 抽头最大档位。

3) 节点电压约束:

$$U_{\text{min},i}^2 \leq v_{i,u,t} \leq U_{\text{max},i}^2, \forall i \in \Psi_{\text{N}} \quad (26)$$

式中: $v_{i,u,t}$ 为节点 i 处电压幅值的平方; $U_{\text{max},i}$ 和 $U_{\text{min},i}$ 分别为节点 i 处电压幅值的上限和下限。

4) 支路电流约束:

$$l_{ij,u,t} \leq x_{ij}^{\text{L}} I_{\text{max},ij}^2, \forall ij \in \Psi_{\text{L}} \quad (27)$$

式中: $l_{ij,u,t}$ 为支路 ij 电流幅值的平方; $I_{\text{max},ij}$ 为支路 ij

允许流过的电流幅值上限。

5) 功率平衡约束:

$$\sum_{j \in \kappa(i)} P_{ij,u,t} - \sum_{k \in \rho(i)} (P_{ki,u,t} - R_{ki} I_{ki,u,t}) = P_{i,u,t}^{\text{inj}}, \forall i \in \Psi_{\text{N}} \quad (28)$$

$$\sum_{j \in \kappa(i)} Q_{ij,u,t} - \sum_{k \in \rho(i)} (Q_{ki,u,t} - X_{ki} I_{ki,u,t}) = Q_{i,u,t}^{\text{inj}}, \forall i \in \Psi_{\text{N}} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} v_{i,u,t} - v_{j,u,t} &\geq 2(R_{ij} P_{ij,u,t} + X_{ij} Q_{ij,u,t}) - \\ &(R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,u,t} - M(1 - x_{ij}^{\text{L}}), \forall ij \in \Psi_{\text{L}} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} v_{i,u,t} - v_{j,u,t} &\leq 2(R_{ij} P_{ij,u,t} + X_{ij} Q_{ij,u,t}) - \\ &(R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,u,t} + M(1 - x_{ij}^{\text{L}}), \forall ij \in \Psi_{\text{L}} \end{aligned} \quad (31)$$

$$l_{ij,u,t} v_{i,u,t} - P_{ij,u,t}^2 - Q_{ij,u,t}^2 = 0, \forall ij \in \Psi_{\text{L}} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} P_{i,u,t}^{\text{inj}} &= P_{i,u,t}^{\text{S}} + P_{i,u,t}^{\text{SOP}} + P_{i,u,t}^{\text{PVG}} + P_{i,u,t}^{\text{WTG}} + \\ &P_{i,u,t}^{\text{BESS}} - P_{i,u,t}^{\text{L}} + P_{i,u,t}^{\text{DSM}} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} Q_{i,u,t}^{\text{inj}} &= Q_{i,u,t}^{\text{S}} + Q_{i,u,t}^{\text{SOP}} + Q_{i,u,t}^{\text{PVG}} + Q_{i,u,t}^{\text{WTG}} + Q_{i,u,t}^{\text{SVG}} + \\ &Q_{i,u,t}^{\text{BESS}} - Q_{i,u,t}^{\text{L}} + Q_{i,u,t}^{\text{DSM}} \end{aligned} \quad (34)$$

式中: $P_{ij,u,t}$ 和 $Q_{ij,u,t}$ 分别为支路 ij 上流过的有功功率和无功功率; R_{ij} 和 X_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗; $P_{i,u,t}^{\text{inj}}$ 和 $Q_{i,u,t}^{\text{inj}}$ 分别为从节点 i 注入的有功功率和无功功率,若节点 i 处未安装相应设备,则对应项取为 0; M 为充分大的正数; $P_{i,u,t}^{\text{SOP}}$ 、 $P_{i,u,t}^{\text{PVG}}$ 、 $P_{i,u,t}^{\text{WTG}}$ 和 $P_{i,u,t}^{\text{BESS}}$ 分别为节点 i 处 SOP、PVG、WTG 和 BESS 发出的有功功率; $Q_{i,u,t}^{\text{SOP}}$ 、 $Q_{i,u,t}^{\text{PVG}}$ 、 $Q_{i,u,t}^{\text{WTG}}$ 、 $Q_{i,u,t}^{\text{SVG}}$ 和 $Q_{i,u,t}^{\text{BESS}}$ 分别为节点 i 处 SOP、PVG、WTG、SVG 和 BESS 发出的无功功率。

6) SOP 运行约束:

本文以背靠背电压源型变流器为例,选取 $PQ-V_{\text{dc}}Q$ 作为 SOP 的稳态控制模式,一个变流器实现对直流电压的稳定控制,另一个变流器实现对传输功率的灵活控制,其两端的有功功率约束和容量约束如下^[3]。

$$P_{i,u,t}^{\text{SOP}} + P_{j,u,t}^{\text{SOP}} + P_{i,u,t}^{\text{SOP,L}} + P_{j,u,t}^{\text{SOP,L}} = 0 \quad (35)$$

$$\begin{cases} P_{i,u,t}^{\text{SOP,L}} = A_i^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{i,u,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,u,t}^{\text{SOP}})^2} \\ P_{j,u,t}^{\text{SOP,L}} = A_j^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{j,u,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,u,t}^{\text{SOP}})^2} \end{cases} \quad (36)$$

$$\begin{cases} \sqrt{(P_{i,u,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,u,t}^{\text{SOP}})^2} \leq S_{ij}^{\text{SOP}} \\ \sqrt{(P_{j,u,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,u,t}^{\text{SOP}})^2} \leq S_{ij}^{\text{SOP}} \end{cases} \quad (37)$$

式中: A_i^{SOP} 和 A_j^{SOP} 分别为节点 i 和节点 j 处 SOP 变流器的损耗系数; $P_{i,u,t}^{\text{SOP,L}}$ 和 $P_{j,u,t}^{\text{SOP,L}}$ 为节点 i 和节点 j 处 SOP 变流器的有功损耗。

7) DG 运行与调节约束:

$$\begin{cases} P_{\min,i}^{\text{DG}} \leq P_{i,u,t}^{\text{DG}} \leq P_{\max,i}^{\text{DG}} \\ \sqrt{(P_{i,u,t}^{\text{DG}})^2 + (Q_{i,u,t}^{\text{DG}})^2} \leq z_i^{\text{DG}} P_{\text{rated}}^{\text{DG}} \\ \frac{P_{i,u,t}^{\text{DG}} \sqrt{1 - (\varphi_{i,\min}^{\text{DG}})^2}}{\varphi_{i,\min}^{\text{DG}}} \leq Q_{i,u,t}^{\text{DG}} \leq \frac{P_{i,u,t}^{\text{DG}} \sqrt{1 - (\varphi_{i,\max}^{\text{DG}})^2}}{\varphi_{i,\max}^{\text{DG}}} \\ 0 \leq P_{i,u,t}^{\text{DG,C}} \leq \alpha_i^{\text{DG}} P_{\max,i,u,t}^{\text{DG}} \end{cases} \quad (38)$$

式中：DG ∈ {WTG, PVG}； $P_{\max,i}^{\text{DG}}$ 和 $P_{\min,i}^{\text{DG}}$ 分别为节点 i 处 DG 有功功率上限和下限； $\varphi_{\max}^{\text{DG}}$ 和 $\varphi_{\min}^{\text{DG}}$ 分别为节点 i 处 DG 功率因数角的最大值和最小值； α^{DG} 为节点 i 处 DG 的最大有功出力切除比例； $P_{\max,i,u,t}^{\text{DG}}$ 为节点 i 处 DG 最大可用容量。

8) SVG 功率调节约束：

$$-z_i^{\text{SVG}} Q_{\text{rated}}^{\text{SVG}} \leq Q_{i,u,t}^{\text{SVG}} \leq z_i^{\text{SVG}} Q_{\text{rated}}^{\text{SVG}}, \forall i \in \Psi_{\text{SVG}} \quad (39)$$

式中 $Q_{\text{rated}}^{\text{SVG}}$ 为 SVG 单位安装容量。

9) BESS 运行约束。

为准确描述 BESS 对 ADN 的有功功率和无功功率的支撑能力^[22]，BESS 的模型可表示为：

$$-S_i^{\text{BESS}} \leq P_{i,u,t}^{\text{BESS}} \leq S_i^{\text{BESS}} \quad (40)$$

$$\sqrt{(P_{i,u,t}^{\text{BESS}})^2 + (Q_{i,u,t}^{\text{BESS}})^2} \leq S_i^{\text{BESS}} \quad (41)$$

$$P_{i,u,t}^{\text{BESS,L}} = A_i^{\text{BESS}} [(P_{i,u,t}^{\text{BESS}})^2 + (Q_{i,u,t}^{\text{BESS}})^2] \quad (42)$$

$$\eta_{\min}^{\text{SOC}} E_i^{\text{BESS}} \leq \sum_{t=1}^t (P_{i,u,t}^{\text{BESS}} + P_{i,u,t}^{\text{BESS,L}}) \leq \eta_{\max}^{\text{SOC}} E_i^{\text{BESS}} \quad (43)$$

$$\sum_{t=1}^T (P_{i,u,t}^{\text{BESS}} + P_{i,u,t}^{\text{BESS,L}}) = E_{i,t=0}^{\text{BESS}} \quad (44)$$

式中： $E_{i,t=0}^{\text{BESS}}$ 为节点 i 处安装 BESS 的初始容量； A_i^{BESS} 为损耗系数； $P_{i,u,t}^{\text{BESS,L}}$ 为节点 i 处 BESS 有功损耗； η_{\min}^{SOC} 和 η_{\max}^{SOC} 分别为节点 i 处 BESS 的荷电状态下限和上限系数。

10) 需求侧管理约束

需求侧管理(demand side management, DSM)包含许多措施，本文考虑常见的可中断负荷措施，该措施对用户系统在系统峰荷、紧急状态下中断或者切除部分负荷。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,u,t}^{\text{DSM}} \leq P_{\max,i,u,t}^{\text{DSM}}, \forall i \in \Psi_{\text{DSM}} \\ Q_{i,u,t}^{\text{DSM}} = P_{i,u,t}^{\text{DSM}} \tan \varphi^{\text{L}}, \forall i \in \Psi_{\text{DSM}} \end{cases} \quad (45)$$

式中： $P_{\max,i,u,t}^{\text{DSM}}$ 为在 t 时刻节点 i 处负荷最大允许中断量； φ^{L} 为负荷节点额定功率因数角。

3 模型求解

考虑到上述 ADN 扩展规划模型为混合整数非凸非线性模型，难以直接有效求解。本节首先采用

SOCR 技术将原模型转化为 MISOCP 形式，然后研究 SOCR 过程中引入的凸松弛间隙，并提出逐次收缩凸松弛算法，在可接受时间内通过循环迭代得到凸松弛间隙足够小的原问题最优解。

3.1 模型转化

将约束式(32)、(36)和(42)进行凸松弛，得到下列 SOCR 形式约束：

$$\| [2P_{ij,u,t} \quad 2Q_{ij,u,t} \quad l_{ij,u,t} - v_{i,u,t}]^T \|_2 \leq l_{ij,u,t} + v_{i,u,t} \quad (46)$$

$$\begin{cases} \| [P_{i,u,t}^{\text{SOP}} \quad Q_{i,u,t}^{\text{SOP}}]^T \|_2 \leq 2 \frac{P_{i,u,t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2A_i^{\text{SOP}}}} \frac{P_{i,u,t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2A_i^{\text{SOP}}}} \\ \| [P_{j,u,t}^{\text{SOP}} \quad Q_{j,u,t}^{\text{SOP}}]^T \|_2 \leq 2 \frac{P_{j,u,t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2A_j^{\text{SOP}}}} \frac{P_{j,u,t}^{\text{SOP,L}}}{\sqrt{2A_j^{\text{SOP}}}} \end{cases} \quad (47)$$

$$\| [2\sqrt{A_i^{\text{BESS}}} P_{i,u,t}^{\text{BESS}} \quad 2\sqrt{A_i^{\text{BESS}}} Q_{i,u,t}^{\text{BESS}} \quad 1 - P_{i,u,t}^{\text{BESS,L}}]^T \|_2 \leq 1 + P_{i,u,t}^{\text{BESS,L}} \quad (48)$$

至此，考虑 SOP 接入的 ADN 扩展规划模型由原始混合整数非凸非线性问题转化为式(49)所示的 MISOCP 问题。由于上述约束(46)–(48)在所提规划模型中是自然成立的，因此模型转化前后不会造成原问题解的变化，在保证松弛精确度的条件下，可以利用数学优化工具实现高效求解。

$$\begin{cases} \min F = C^{\text{INV}} + C^{\text{OPE}} \\ \text{s.t. 式(11)—(31), 式(33)—(35),} \\ \text{式(37)—(41), 式(43)—(48)} \end{cases} \quad (49)$$

3.2 逐次收缩凸松弛算法

SOCR 转化后模型的最优解能否恢复为原始模型的可行解，这与 SOCR 是否精确是等价的^[4,23]。因此，有必要分析 SOCR 引入的凸松弛间隙，并将其降低到可接受的水平。本文所提规划模型在 SOCR 转化后引入的松弛间隙如式(50)–(52)所示。

$$g_{u,t}^{\text{flow}} = \left\| 1 - \frac{(P_{ij,u,t})^2 + (Q_{ij,u,t})^2}{l_{ij,u,t} v_{i,u,t}} \right\|_{\infty} \quad (50)$$

$$g_{u,t}^{\text{SOP}} = \left\| 1 - \frac{A_i^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{i,u,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,u,t}^{\text{SOP}})^2}}{P_{i,u,t}^{\text{SOP,L}}} \right\|_{\infty} \quad (51)$$

$$g_{u,t}^{\text{BESS}} = \left\| 1 - \frac{A_i^{\text{BESS}} [(P_{i,u,t}^{\text{BESS}})^2 + (Q_{i,u,t}^{\text{BESS}})^2]}{P_{i,u,t}^{\text{BESS,L}}} \right\|_{\infty} \quad (52)$$

文献[24]证明了在考虑 DG 高渗透率的 ADN 最优潮流问题中，通过添加割平面的方法可以收紧 SOCR 间隙，得到满足运行要求的最优解。在此基础上，本节提出一种逐次收缩凸松弛算法，对规划

模型中 SOCR 的紧性进行改善。该算法一方面对模型的目标函数进行扩展,以驱使 SOCR 逐渐收紧;另一方面基于前次优化结果,在模型中迭代添加逐渐收紧的线性切平面,将凸松弛间隙逐渐收缩到给定阈值内。从目标函数和约束条件两方面“加强”凸松弛紧性,以使松弛后的解对原问题具有可行性。算法具体步骤如下文所述。

步骤 1: 给定算法残差阈值 ε_g ; 给定权重系数初始值 χ_0 、权重系数增长因子 ω 、权重系数最大值 χ_m ; 在规划模型(式(49))的目标函数中添加惩罚项 $\chi_0 F_\chi$, 即扩展为式(53), 其中 F_χ 如式(54)所示。

$$\min F' = F + \chi_0 F_\chi \quad (53)$$

$$F_\chi = \sum_{u \in \Omega_0} D_u \sum_{t \in \Omega_t} \left(\sum_{ij \in \mathcal{Y}_L} l_{ij,u,t} r_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{Y}_{SOP}} P_{i,u,t}^{\text{SOP,L}} + \sum_{i \in \mathcal{Y}_{\text{BESS}}} P_{i,u,t}^{\text{BESS,L}} \right) \quad (54)$$

步骤 2: 求解目标函数扩展为 F' 的规划模型(式(49)), 置迭代次数 $n=1$ 。

步骤 3: 更新并添加式(55)、(56)和(57)所示的线性切平面约束, 求解模型(58)。

$$l_{ij,u,t} - \frac{P_{ij,u,t,n}^2 + Q_{ij,u,t,n}^2}{v_{i,u,t,n}} \leq 0 \quad (55)$$

$$P_{i,u,t}^{\text{SOP,L}} - A_i^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{i,u,t,n}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,u,t,n}^{\text{SOP}})^2} \leq 0 \quad (56)$$

$$P_{i,u,t}^{\text{BESS,L}} - A_i^{\text{BESS}} ((P_{i,u,t,n}^{\text{BESS}})^2 + (Q_{i,u,t,n}^{\text{BESS}})^2) \leq 0 \quad (57)$$

式中: $P_{ij,u,t,n}$ 和 $Q_{ij,u,t,n}$ 分别为第 n 次迭代后, 场景 u 下时刻 t 支路 ij 传输的有功功率和无功功率最优解; $P_{i,u,t,n}^{\text{SOP}}$ 、 $Q_{i,u,t,n}^{\text{SOP}}$ 和 $P_{i,u,t,n}^{\text{BESS}}$ 、 $Q_{i,u,t,n}^{\text{BESS}}$ 分别为第 n 次迭代后, SOP 和 BESS 在场景 u 下时刻 t 注入节点 i 的有功功率和无功功率最优解; $v_{i,u,t,n}$ 为第 n 次迭代后, 场景 u 时刻 t 节点 i 的电压幅值平方最优解。

$$\begin{cases} \min F' = F + \chi_n F_\chi \\ \text{s.t. 式(11)—(31), 式(33)—(35), 式(37)—(41),} \\ \text{式(43)—(48), 式(55)—(57)} \end{cases} \quad (58)$$

步骤 4: 计算第 n 次迭代求解后优化结果的凸松弛间隙 $g_{u,n}$:

$$g_{u,n} = \max_{i \in \Omega_t} (g_{u,t,n}^{\text{flow}}, g_{u,t,n}^{\text{SOP}}, g_{u,t,n}^{\text{BESS}}) \quad (59)$$

步骤 5: 若 $\max_{u \in \Omega_0} g_{u,n} \leq \varepsilon_g$, 说明松弛间隙足够小, 终止迭代; 否则, 令 $\chi_{n+1} = \min\{\omega \chi_n, \chi_m\}$, 重复步骤 3 和步骤 4, 直到满足收敛条件为止。

4 算例分析

本文采用 54 节点 ADN 作为算例, 算例测试使用的计算机处理器为 i7-12700K, 主频 3.6GHz, 内存为 32GB, 利用内嵌 YALMIP 的 MATLAB R2020a 开发上述 ADN 扩展规划程序, 并调用 GUROBI 9.1.1 软件包求解。

4.1 算例设置

54 节点 ADN 的网络拓扑结构、节点负荷与线路参数详见文献[25], 相关规划参数设置如下文所述^[8-9]。

1) 变电站数据: 待新建和扩容的变电站相关参数和成本见表 1; 变电站主变 OLTC 共有 9 个调节挡位, 调节范围为 0.95pu 至 1.05pu; 变电站向上级电网购电价格为 0.5 元/(kW·h)。

表 1 变电站参数

变电站节点	初始容量/(MV·A)	新增容量/(MV·A)	投资成本/万元	维护成本/(万元/年)
S1	16.7	16.7	800	1.5
S2	16.7	13.3	760	1.5
S3	0	22.2	1200	2
S4	0	22.2	1200	2

2) 线路数据: 单位长度电阻和电抗分别为 0.307Ω/km 和 0.380Ω/km, 线路容量为 6.12MV·A, 线路投资成本为 245210 元/km, 年运维成本为 3000 元/条。

3) SOP 数据: SOP 待选安装线路为 22-23、6-28、30-43、33-39、46-47、2-8、10-15, 单位安装容量为 100kV·A, 投资费用为 1000 元/(kV·A), 损耗系数为 0.02, 年运行维护费用系数为 0.01, 每条待选线路允许安装容量上限为 5000 kV·A。

4) 待安装 DG 数据: PVG 待选安装节点为 5、8、10、26、30、33 和 37, 单位容量投资成本为 4300 元/kW, 单位电量运维成本为 0.03 元/(kW·h); WTG 待选安装节点为 12、14、17、24、39 和 47, 单位容量投资成本为 5600 元/kW, 单位电量运维成本为 0.03 元/(kW·h); 单台 DG 额定容量为 100kW, DG 的功率因数可调范围为滞相 0.95 至进相 0.95, 弃风弃光惩罚成本为 0.35 元/(kW·h), DG 最大渗透率为 50%。

5) SVG 数据: 待选安装节点为 26、32、38 和 50, 单位安装容量为 100kV·A, 建设成本为 7700 元/(kV·A), 每个节点安装个数上限为 2, ADN

中 SVG 安装个数上限为 6。

6) BESS 数据：待选安装节点为 8、9、13、16、17、32 和 50，单位容量建设成本为 1000 元/(kW·h)，单位功率建设成本为 1500 元/kW，单位容量年运行维护成本为 0.35 元/(kW·h)，ADN 中 BESS 总容量最大为 6000kW·h，总功率最大为 2000kW，一个典型日场景内初始荷电状态为 0.5，荷电状态上限和下限分别为 1 和 0.2。

7) 其他参数：规划期为 15 年，贴现率为 5%，节点电压幅值约束为 0.95~1.05pu，负荷功率因数为 0.9，可中断负荷的单位电量切除成本为 7 元/(kW·h)。

4.2 典型日场景构建结果

以西北地区某配电网全年历史数据为基础，利用改进 GMM 聚类方法进行典型日场景构建。经计算可知，当聚类场景数等于 8 时，BIC 指标最小。8 个典型日场景如图 1 所示。为说明本文典型日场景构建方法的优势，选取广泛应用的 k-means 聚类方法同步进行典型日场景构建，得到图 2 所示结果。各典型日场景概率如表 2 所示。对比典型日场景构建结果可见，基于改进 GMM 聚类的典型日场景构建方法结果具有更好的分层特性，DG 和负荷从小到大各个层级几乎均匀涵盖，同时有效保留了某些极端场景，对原始数据的表征更加准确。

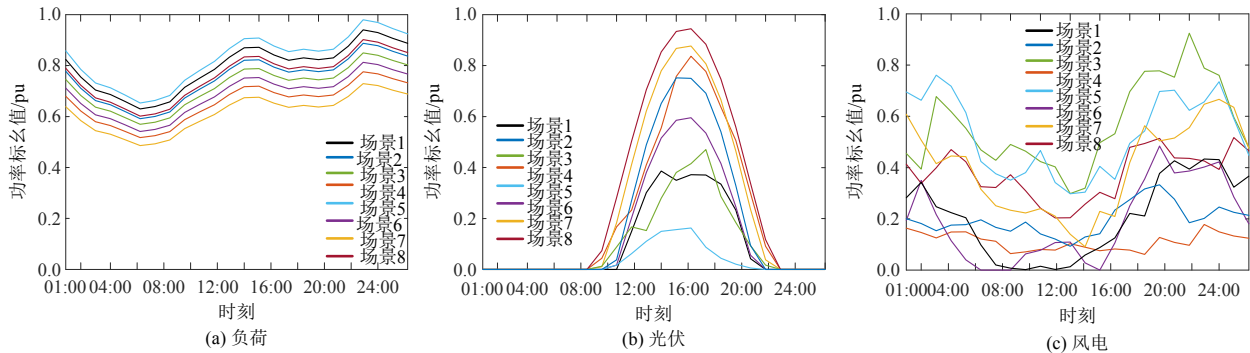


图 1 基于改进 GMM 聚类的典型日场景构建结果

Fig. 1 Selection results of typical days based on improved GMM clustering

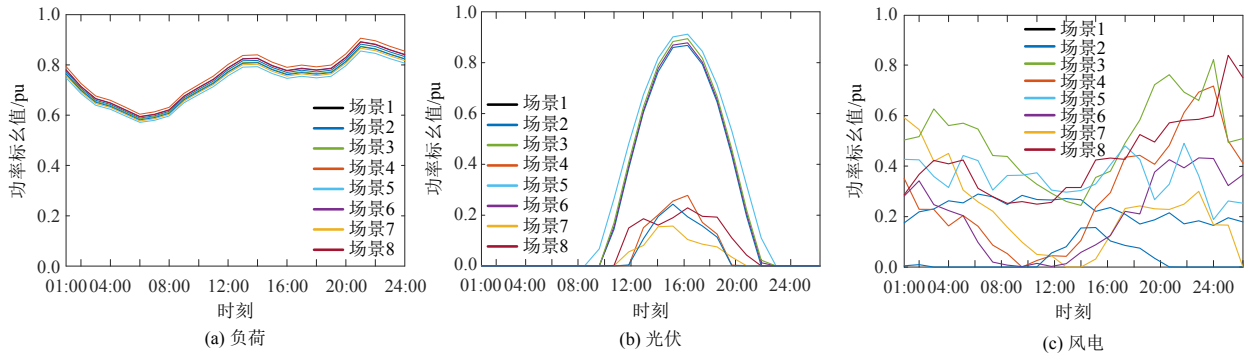


图 2 基于 k-means 聚类典型日场景构建结果

Fig. 2 Selection results of typical days based on k-means clustering

表 2 典型日场景概率

典型日场景	概率	典型日场景	概率
1	0.0603	5	0.0986
2	0.2630	6	0.1781
3	0.0932	7	0.1342
4	0.0685	8	0.1041

表 3 不同方法下 ADN 扩展规划费用

年费用	方法		10 ⁶ 元
	方法 I	方法 II	
年综合费用	159.27	151.28	
线路投资费用	2.18	2.70	
变电站投资费用	3.08	2.31	
SOP 投资费用	0	0.72	
PVG 投资费用	7.04	7.87	
WTG 投资费用	3.77	4.86	
SVG 投资费用	0.45	0	
BESS 投资费用	0.51	0.66	
向上级购电费用	136.74	129.17	
设备运维费用	2.19	3.01	
DSM 费用	3.17	0	
弃风弃光惩罚费用	0.14	0	

4.3 规划结果与分析

设定 2 种规划方法进行比较。

方法 I：不考虑 SOP 接入的 ADN 扩展规划；

方法 II：考虑 SOP 接入的 ADN 扩展规划。

经优化计算，方法 I 和方法 II 中规划方案各项费用如表 3 所示，得到的规划方案见表 4，整体规

表4 不同方法下ADN扩展规划方案

Table 4 ADN expansion planning schemes under different methods

规划方法	变电站新建/扩容(容量/(MV·A))	线路新建		PVG位置(容量/kW)	WTG位置(容量/kW)	SOP位置(容量/(kV·A))	SVG位置(容量/(kV·A))	BESS位置(容量/(kW·h), 功率/kW)
		相同	相异					
方法 I	S1(16.7)	14-46, 12-45, 44-45,		5(1200), 8(1500),	12(0), 14(1300),		26(200),	13(502,168),
	S3(22.2)	38-44, 33-39, 32-39,	9-22, 31-37	10(3100), 26(400),	17(1000), 24(900),	—	32(200), 38(0),	16(820,271),
	S4(22.2)	13-43, 37-43, 30-43,		30(2000), 33(3800),	39(2000), 47(1800)		50(200)	17(475,116),
		S3-28, 27-28, 26-27,		37(5000)				32(893,301),
方法 II		8-25, S3-36, 35-36,				22-23(0),		50(815,342)
		34-35, 33-34, S3-41,	10-31,			6-28(500),	26(0),	9(938,254),
		40-41, 41-42, 42-48,	2-8, 6-28,	5(2000), 8(3700),	12(1000), 14(1100),	30-43(2400),	32(0),	13(780,271),
	S3(22.2)	42-47, 48-49, 49-50,	10-15,	10(4700), 26(0), 30(0),	17(1000), 24(300),	33-39(2100),	38(0),	17(694,310),
	S4(22.2)	S4-22, 22-23, 23-24,	46-47,	33(3400), 37(4600)	39(3400), 47(2200)	46-47(500),	50(0)	32(1000,500)50(
		S4-21, 18-21, 17-18,	38-39,			2-8(1100),		849,415)
		18-19, 19-20, S4-30,	8-27			10-15(900)		
		29-30						

划结果如图3和图4所示。从表3可以看出,方法II中考虑SOP接入得到的ADN扩展规划方案(方案II)在整体上比方法I得到的规划方案(方案I)具有更好的经济性。方案II中ADN年综合费用相比方案I减少了799万元,降幅为5.01%。

对比方案II,方案I为满足ADN负荷需求,除投资新建变电站S3和S4外,还需对变电站S1扩容。在网架扩建方面,由于方案II需增加投建联络线路,所以在新建线路投资成本上相比方案I来说投资费用有所增加,但是,由后文分析可知,SOP可以针对每个时段实时调整运行控制策略,均衡馈线间负荷,作为网络重构的有效补充,为不同变

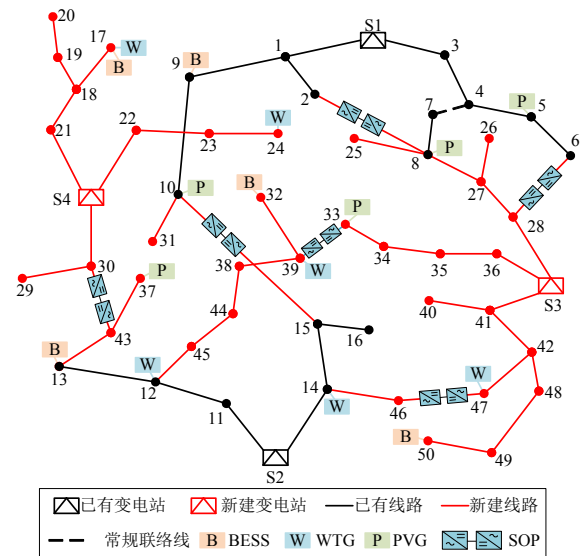


图4 考虑SOP接入的ADN扩展规划结果

Fig. 4 ADN expansion planning results considering the integration of SOP

站供电区域间互联互通提供了支撑,提升了整个ADN的柔性互济能力。此外,由表3计算可得:方案I中SOP、PVG、WTG、SVG和BESS等各类设备的年投资费用为1177万元,方案II中各类设备的年投资费用为1411万元。虽然方案II中各类设备的年投资费用相较方案I更高,但是不难发现,在模拟运行阶段,方案II的经济性更好:方案II中各典型日场景的DG出力均全部消纳,全年向上级电网购电费用相比方案I减少了557万元,降幅为4.13%,而方案I在某些典型运行场景中出现了弃风弃光的现象,相应的弃风弃光惩罚费用为14万元;方案I中全年DSM费用达317万元,而

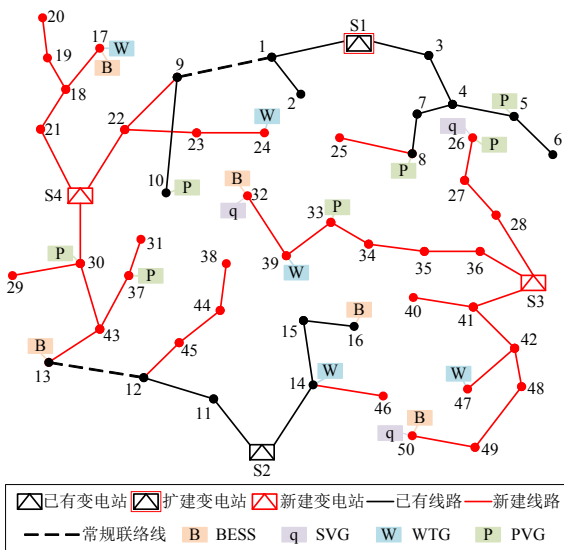


图3 不考虑SOP接入的ADN扩展规划结果

Fig. 3 ADN expansion planning results without considering the integration of SOP

方案 II 没有切负荷现象发生,可以满足所有典型日场景不同负荷水平下各节点的电能需求。

为进一步分析考虑 SOP 接入的 ADN 扩展规划方案的优势,从规划方案年均网络损耗、DG 消纳率、OLTC 抽头调节次数、线路平均负载率以及平均电压偏差 5 个指标出发,对 2 种规划方法下得到的不同规划方案进行评估和比较,结果如图 5 所示。

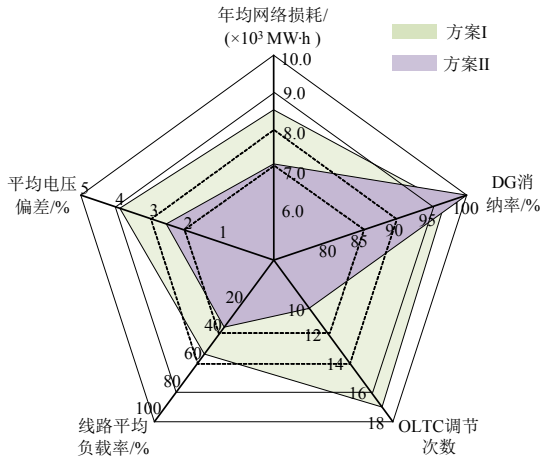


图 5 不同规划方案对应系统运行指标对比图

Fig. 5 Comparison of system operating indicators under different planning schemes

方案 II 中 SOP 的应用使得网络功率分布得到改善,年均网络损耗为 7049.15MW·h,比方案 I 减少 17.63%;方案 I 的 DG 消纳率为 97.12%,而方案 II 完全消纳 DG 出力,这是由于 SOP 能均衡线路间负荷,转供线路间 DG 注入功率,因此考虑 SOP 接入的 ADN 规划方案能够更好地接纳 DG;方案 II 平均电压偏差为 2.51%,相比方案 I 有效抑制了电压波动,使得电压分布更加趋向平缓,改善了 ADN 电压质量;方案 II 相比方案 I 线路平均负载率从 54.43%降为 36.89%,方案 II 改善了支路负载分布,提升了线路转供能力,兼顾了可靠性和经济性的要求;方案 I 中需要依靠多次 OLTC 抽头调节来满足电压质量,这将导致方案 I 需要付出更多的开关变动成本,而方案 II 可以通过 SOP 灵活平滑调节,避免了频繁的 OLTC 抽头调节操作,有效降低了运行风险,提高了系统的调节能力和运行潜力。

4.4 SOP 成本对规划结果的影响

随着未来高性能电力电子器件日趋成熟, SOP 单位容量建设成本将逐渐下降,同时伴随智能配电技术的深入推广,必将推动 SOP 在 ADN 中的广泛应用^[14]。为了研究 SOP 投资成本对规划结果的影响,设计 10 个 Case (Case 1 至 Case 10),相应 SOP 的单位容量投资成本从 1000 元/(kV·A)逐步递减至

100 元/(kV·A)(间隔为 100 元/(kV·A)),其余参数保持不变,对考虑 SOP 接入的 ADN 扩展规划模型进行求解,得到的规划成本费用如图 6 所示。

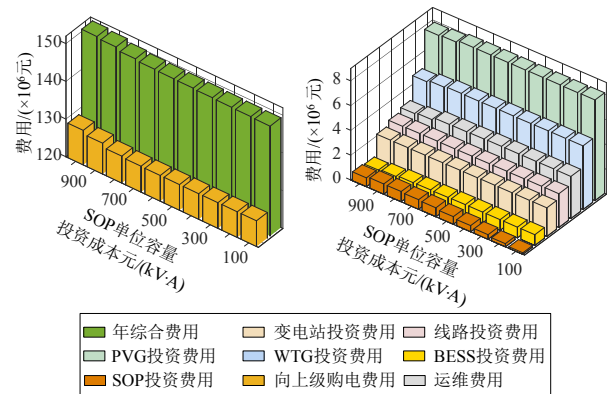


图 6 SOP 单位容量投资成本对规划成本费用的影响

Fig. 6 Influence of unit capacity cost of SOP on the planning costs

从图 6 可知:随着 SOP 单位容量投资成本的降低,规划期内年综合费用逐渐减少,但存在明显的边际递减效应;变电站规划方案不变,因而投资费用没有发生变化;线路投建费用差异不大;SOP 投资费用先增后减,这是因为当 SOP 单位容量投资成本大于 600 元/(kV·A)时,SOP 安装容量主要受投资成本的影响,虽然投资成本降低,但安装容量增加,从而投资费用增加,但在低于 600 元/(kV·A)之后,SOP 安装容量变化不大,即不受投资成本的显著影响,投资费用随着投资成本下降而下降;PVG 和 WTG 的投资和运维费用均增加,表明相应的安装容量逐渐增加,但由于 DG 渗透率的限制,当 SOP 单位容量投资成本降为 700 元时, DG 安装容量达到最大值,此后 DG 投资费用基本不变;BESS 投资费用逐渐增加,表明安装容量及功率也逐渐增大,在 SOP 单位容量投资成本降至 600 元时达到最大值;向上级电网购电费用逐渐减小,这是因为 DG 以及 SOP、BESS 安装容量增加,ADN 通过优化调度各类设备运行,可以充分利用经济性更好的 DG 出力满足更多负荷需求。

4.5 算法有效性分析

利用本文提出的逐次收缩凸松弛算法,求解考虑 SOP 接入的 ADN 扩展规划模型的迭代收敛过程如图 7 所示。经过 3 次迭代求解,凸松弛间隙缩小至 10⁻⁵ 数量级,满足计算精度要求,说明凸松弛是紧的,即利用逐次收缩凸松弛算法求解扩展规划模型可获得全局最优解。

为进一步验证逐次收缩凸松弛算法的有效性

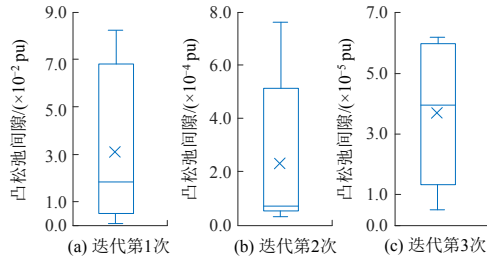


图7 算法迭代过程

Fig. 7 Iteration process of the algorithm

与可行性, 针对 4.3 节的 Case 1 至 Case 10, 分别使用本文提出的逐次收缩凸松弛算法(算法 1)和文

献[4]采用的凸差规划算法(算法 2)对规划模型进行求解, 对比结果如表 5 所示。从表 5 可知: 算法 1 对所有 Case 都能有效求解, 而且算法稳定性和效率都较高; 算法 2 在对 Case 8 到 Case 10 进行求解时, 在有限时间里无法收敛, 这是因为采用算法 2 在对上述 Case 初次求解时往往会得到一个误差较大的初始解甚至为不可行解, 在迭代过程中该误差会逐渐累积, 最终导致算例求解无法收敛, 同时由于该算法在每一次迭代中引入具有二次凸函数形式的不等式约束, 求解效率比本文所提算法低。

表 5 不同算法求解效果对比

Table 5 Solution comparison between different algorithms

Case	年综合费用/(10 ⁶ 元)		迭代次数/次		计算耗时/h		凸松弛间隙/(10 ⁻⁵ pu)	
	算法 1	算法 2	算法 1	算法 2	算法 1	算法 2	算法 1	算法 2
Case 1	151.26	151.26	3	7	3.27	7.13	6.21	6.85
Case 2	150.88	150.88	3	7	3.21	7.38	6.34	7.04
Case3	150.13	150.13	3	7	4.11	7.52	6.82	6.87
Case4	149.79	149.79	3	8	4.25	8.26	6.74	6.91
Case5	149.67	149.67	4	8	4.81	8.35	6.81	6.84
Case6	149.58	149.58	4	8	6.34	9.12	6.79	7.01
Case7	149.45	149.45	5	10	6.38	10.53	7.14	8.37
Case8	149.31	—	5	—	6.67	—	7.09	—
Case9	149.21	—	5	—	6.83	—	7.28	—
Case10	149.03	—	5	—	7.23	—	7.19	—

注: —表示采用该算法在有限时间里对 Case 求解无法收敛。

5 结论

1) 基于改进 GMM 聚类的典型日场景构建方法得到的典型日场景剪代表性, 能够较好地描述风光-荷的时序特性和不确定性。在根据 BIC 指标有效判定典型日场景构建数量的同时, 可以给出各个典型日场景的概率。

2) 本文提出的考虑 SOP 接入的 ADN 扩展规划方法能够实现 ADN 综合资源的协调优化配置, 得到的扩展规划方案整体更优, 在降低 ADN 扩展规划综合成本的同时, 提高了 ADN 的运行灵活性和安全性。

3) 本文提出的逐次收缩凸松弛算法可有效缩小 ADN 扩展规划模型 SOCR 转化后引入的凸松弛间隙, 获得原问题的最优解, 同时实现了较高的计算效率。

4) 考虑到规划应用场景和规划模型复杂度, 本文在 ADN 扩展规划研究中仅协同考虑双端 SOP 的接入, 用以代替传统联络开关, 对馈线进行柔性互联。随着新型柔性配电技术的进一步发展, 面向

未来多电压等级供电、变电站柔性互联、交直流混联等复杂应用场景, 建立同时考虑双端 SOP 和多端 SOP 接入的 ADN 扩展规划模型, 并寻求高效求解算法, 值得进一步研究。

参考文献

- [1] 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): 2385-2395.
WANG Chengshan, WANG Rui, YU Hao, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2395(in Chinese).
- [2] 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 Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298(in Chinese).
- [3] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学

- 报, 2016, 36(9): 2315-2321.
- WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. A hybrid optimization method for distribution network operation with SNOP and tie switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2315-2321(in Chinese).
- [4] JI Haoran, WANG Chengshan, LI Peng, et al. Quantified flexibility evaluation of soft open points to improve distributed generator penetration in active distribution networks based on difference-of-convex programming[J]. Applied Energy, 2018, 218: 338-348.
- [5] 宋毅, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4390-4398.
- SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4390-4398(in Chinese).
- [6] KOUTSOUKIS C, GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. Multistage coordinated planning of active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 32-44.
- [7] JOOSHAKI M, ABBASPOUR A, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. MILP model of electricity distribution system expansion planning considering incentive reliability regulations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4300-4316.
- [8] 邢海军, 程浩忠, 杨镜非, 等. 考虑多种主动管理策略的配电网扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 70-76, 167.
- XING Haijun, CHENG Haozhong, YANG Jingfei, et al. Distribution network expansion planning considering multiple active management strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 70-76, 167(in Chinese).
- [9] 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.
- WU Zhi, LIU Yafei, GU Wei, 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(in Chinese).
- [10] WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Optimal siting and sizing of soft open points in active electrical distribution networks[J]. Applied Energy, 2017, 189: 301-309.
- [11] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1889-1896.
- WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1896(in Chinese).
- [12] 陈焱煜, 耿光超, 江全元, 等. 考虑传统调控手段的配电网 SOP 选址定容方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1181-1188.
- CHEN Yaoyu, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Optimal siting and sizing method of soft open point in distribution network combined with traditional regulations[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1181-1188(in Chinese).
- [13] 熊正勇, 陈天华, 杜磊, 等. 基于改进灵敏度分析的有源配电网智能软开关优化配置[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 129-137.
- XIONG Zhengyong, CHEN Tianhua, DU Lei, et al. Optimal allocation of soft open point in active distribution network based on improved sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 129-137(in Chinese).
- [14] 赵金利, 陈昊, 宋关羽, 等. 考虑可靠性收益的配电网智能软开关规划方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 22-31.
- ZHAO Jinli, CHEN Hao, SONG Guanyu, et al. Planning method of soft open point in distribution network considering reliability benefits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 22-31(in Chinese).
- [15] LI Kehua, MA Zhenjun, ROBINSON D, et al. Identification of typical building daily electricity usage profiles using Gaussian mixture model-based clustering and hierarchical clustering[J]. Applied Energy, 2018, 231: 331-342.
- [16] NOWAKOWSKA E, KORONACKI J, LIPOVETSKY S. Clusterability assessment for Gaussian mixture models[J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 256: 591-601.
- [17] 贾清泉, 赵美超, 孙玲玲, 等. 主动配电网中计及时序性与相关性的分布式光伏并网规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1719-1728.
- JIA Qingquan, ZHAO Meichao, SUN Lingling, et al. Planning for grid-connection of distributed PVs considering the sequential feature and correlation in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1719-1728(in Chinese).

- [18] YANG M S, LAI C Y, LIN C Y. A robust EM clustering algorithm for Gaussian mixture models[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(11): 3950-3961.
- [19] CHOKNIWAL A, SINGH M. Faster Mahalanobis K-means clustering for Gaussian distributions[C]//2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics. Jaipur, India: IEEE, 2016: 947-952.
- [20] HU Jinxing, LI Hongru. A new clustering approach for scenario reduction in multi-stochastic variable programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3813-3825.
- [21] DING Tao, LIN Yanling, LI Gengfeng, et al. A new model for resilient distribution systems by microgrids formation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4145-4147.
- [22] 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.
- [23] 林哲, 胡泽春, 宋永华. 最优潮流问题的凸松弛技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3717-3727. LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Convex relaxation for optimal power flow problem: a recent review[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3717-3727(in Chinese).
- [24] GAO Hongjun, LIU Junyong, WANG Lingfeng, et al. Cutting planes based relaxed optimal power flow in active distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 272-280.
- [25] MIRANDA V, RANITO JV, PROENCA LM. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(4): 1927-1933.



张沈习

在线出版日期: 2022-06-02。

收稿日期: 2021-10-13。

作者简介:

张沈习(1988), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划、综合能源系统规划, willzsx@sjtu.edu.cn;

王浩宇(1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为主动配电网规划, wanghaoyu0906@sjtu.edu.cn;

李然(1988), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与规划、电力市场与能源经济, rl272@sjtu.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)