

考虑多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法

卢子敬¹, 李子寿¹, 李辉², 邓丽², 王子彤²

(1. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430070;

2. 湖北安源安全环保科技有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 为了提高输电网可靠性与可持续性, 研究对考虑多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法。构建双层输电网扩展自动规划模型, 上层模型以输电网时的最小潮流越限风险度为目标, 同时设计潮流、弃风量等约束条件; 下层模型采用2m+1点估计法, 以最小切负荷为目标, 充分考虑多形态间歇性电源集中接入时的不确定性因素, 采用量子粒子群算法对方案进行寻优, 实现输电网扩展自动规划。经实验验证, 该方法规划后的年期望缺电量较小, 每线路上的切负荷、弃风量与网损均保持在较低水平, 可明显提升输电网的应用性。

关键词: 多形态; 间歇性电源; 集中接入; 输电网扩展; 自动规划; 弃风量

中图分类号: TP18; TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7241(2025)07-0018-05

Automatic Planning Method for Transmission Network Expansion Considering the Centralized Access of Multi-form Intermittent Power Sources

LU Zijing¹, LI Zishou¹, LI Hui², DENG Li², WANG Zitong²

(1. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430070, China;

2. Hubei Anyuan Safety and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: In order to improve the reliability and sustainability of transmission networks, this paper studies the automatic planning method for transmission network expansion considering centralized access of multimodal intermittent power sources. A two-level transmission network expansion automatic planning model is constructed. The upper level model aims at minimizing the risk of power flow exceeding the limit during transmission, while designing constraints such as power flow and waste air volume. The lower level model adopts the 2m+1 point estimation method, with the goal of minimum load shedding, fully considering the uncertainty factors during centralized access of multimodal intermittent power sources, and uses quantum particle swarm optimization algorithm to optimize the scheme to achieve automatic planning for transmission network expansion. The experimental verification shows that the planned annual expected power shortage of this method is small, and the load shedding, abandoned air volume, and network loss on each line are kept at a low level, which can significantly improve the applicability of the transmission network.

Keywords: multimodal; intermittent power supply; centralized access; transmission network expansion; automatic planning; air abandonment rate

0 引言

输电网是一种用于电能输送的系统, 它可以将发电厂产生的电能传输给用户。输电网主要由发电厂、输电线路、变电站和配电网构成^[1-3]。随着社会的发展, 用电用户数量急剧增加, 所需用电量也随之增加^[4]。因此, 需要采取合理的规划方法, 对输电网进行扩展, 以提高其经济性和可操作性^[5-6]。

目前有较多学者对扩展规划方法进行研究。例如肖楚飞等^[7]研究配电网扩容规划方法, 该方法充分考虑充电负荷价格对配电网的影响, 以负荷最低价格为目标进行

扩展规划, 使该方法的经济性更强, 但应用该方法后会致年期望缺电量增加, 忽略电力网络的安全性, 对电网造成严重影响。陈典等^[8]研究综合考虑输电结构优化的含可再生能源电网规划方法, 该方法在规划过程中充分考虑了输电线路的整体结构, 但该方法规划后的方案会导致网损率较大, 影响输电网整体效益。

多形态间歇性电源是指由多种不同形态的可再生能源构成的电源, 其中包括风能、太阳能等。这种电源具有可再生性和可持续性等优点, 可以有效地满足用户的电力需求, 并且可以有效地减少对环境的影响^[9-11]。因此, 目前输电网大量接入多形态间歇性电源。本文以此为基础, 研究考虑多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法, 使输电网扩展规划结果更为可靠。

*基金项目: 国家电网湖北省“十四五”电网规划项目(20220608)

收稿日期: 2023-10-09

1 输电网扩展自动规划方法

为实现多形态间歇性电源集中接入时的输电网扩展自动规划,本文构建双层优化模型,从不同角度实现输电网扩展规划,并有效利用优化算法,实现最优规划的求解。在双层优化模型中,上层模型以多形态间歇性电源集中接入输电网时的最小潮流越限风险度为目标,而下层模型以多形态间歇性电源集中接入输电网时的最小切负荷为目标,同时考虑电源集中接入时的多种不确定性因素,采用2m+1点估计法对上层规划模型进行静态安全性评估,之后通过双层模型的求解,实现输电网扩展自动规划。

1.1 基于潮流越限风险度最小化的上层规划模型

由于多形态间歇性电源在集中接入时不仅会出现电压、暂态稳定风险,还会出现潮流越限风险等问题,因此在规划多形态间接性电源集中接入输电网扩展规划数学模型时,规划方案需要充分考虑多形态间接性电源接入配电网后的潮流不确定性,因此需要对潮流越限情况进行约束。

1.1.1 上层自动规划模型目标函数

本文以潮流越限风险最小化为目标函数,构建输电网扩展自动规划上层模型,并通过公式(1)表示该目标函数:

$$b_l = \min F_l = \frac{1}{N_l} \sum_{(i,j) \in \Omega} Pr(E(P_{ij}) + \sigma(P_{ij}) > P_{ij\max}) \quad (1)$$

式中, F_l 表示潮流越限风险; Pr 表示潮流越线风险评估函数,输电网系统内全部线路数量由表示 N_l ; b_l 表示潮流越限风险最小化目标; l 为0-1的变量,当该值为1时,表示扩建线路,该值为0时,则为现有线路;线路两个节点 i 、 j 上的有功潮流为 P_{ij} ,而该条线路潮流的标准差与期望值分别为 $\sigma(P_{ij})$ 、 $E(P_{ij})$;该线路的有功容量为 $P_{ij\max}$ 。

1.1.2 上层自动规划模型约束条件

针对上层规划模型的目标函数,本文设计以下约束条件,具体如下。

(1) 已有线路与扩建线路潮流约束

通过式(2)、式(3)约束已有线路 l_0 与扩建线路 l 的潮流:

$$\begin{cases} P_{l_0}^{\min} \leq P_{l_0} \leq P_{l_0}^{\max} \\ (\theta_{i_0} - \theta_{j_0}) / X_{l_0} - P_{l_0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} b_l P_l^{\min} \leq P_l \leq b_l P_l^{\max} \\ (\theta_{i_l} - \theta_{j_l}) / X_l - P_l + (1 - b_l) K \geq 0 \\ (\theta_{i_l} - \theta_{j_l}) / X_l - P_l + (1 - b_l) K \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_{l_0} 表示已有线路 l_0 的潮流; $P_{l_0}^{\max}$ 、 $P_{l_0}^{\min}$ 分别表示已有线路潮流最大、最小范围值;线路 l_0 的电抗为 X_{l_0} ; θ_{i_0} 、 θ_{j_0} 依次表示线路 l_0 的第 i 、 j 个节点电压相角;公式(3)中,扩建

线路 l 的潮流为 P_l ; P_l^{\max} 、 P_l^{\min} 分别为扩建线路最大、最小潮流范围值; K 为足够大的正数; X_l 为扩建线路 l 的电抗;扩建线路 l 中节点 i 、 j 的电压相角分别为 θ_{i_l} 、 θ_{j_l} ; b_l 为扩建线路 l 潮流越限风险最小化值。

(2) 弃风容量约束

通过式(4)约束多形态间歇性电源接入输电网系统时的弃风容量:

$$0 \leq P_{w_i}^{\text{cut}} \leq \min(\mu_{w_i} P_{w_i}, \bar{P}_{w_i}^{\text{cut}}), i \in \Omega_w \quad (4)$$

式中,节点 i 允许弃风最大比例系数为 μ_{w_i} ,在该节点处,风电机组的有功出力为 P_{w_i} ;弃风容量期望值为 $P_{w_i}^{\text{cut}}$; $\bar{P}_{w_i}^{\text{cut}}$ 为当前接入状态下的弃风容量期望值。

(3) 电压约束

通过式(5)约束多形态间歇性电源接入时的电压,具体如下:

$$|V_i|^{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|^{\max} \quad (5)$$

式中,第 i 个节点的电压幅值为 $|V_i|$;电压上、下限依次为 $|V_i|^{\max}$ 、 $|V_i|^{\min}$ 。

(4) 电流约束

通过式(6)约束多形态间歇性电源接入时的输电网电流,具体如下:

$$|I_l| \leq |I_l|^{\max} \quad (6)$$

式中,第 l 条扩展线路的电流为 $|I_l|$;该线路上可实现的电流上限为 $|I_l|^{\max}$ 。

1.2 基于最小切负荷的下层静态安全性评估模型

本文构建的下层模型主要用于实现上层规划模型的安全性评估,充分考虑多形态间歇性电源集中接入时的多种不确定性因素,并以最小切负荷为目标,评估上层规划模型是否合理。

1.2.1 多形态间歇性电源集中接入时的不确定性因素

多形态间歇性电源集中接入时发生的不确定性因素会影响输电线的线路潮流分布与各机组出力情况,导致深度影响输电网扩展自动规划结果^[12],为此,本文构建的下层评估模型主要考虑以下三种关键的多形态间歇性电源集中接入时不确定性因素对输电网运行带来的影响:

(1) 大型风电场出力不确定。假设风速能够满足两参数 Weibull 分布特性,此时,结合风电场空间相关性,构建风电场风速相关系数矩阵,并通过奇异值分解方法对矩阵进行分解,得到风电场的风速误差,以获取风电场修正出力;

(2) 大型光伏电站出力不确定。假设当前光伏电站存在功率调节功能,而当前地区辐照深度满足 Beta 分布,结合太阳辐照度与光伏阵列出力的线性关系,获取光伏电站出力;

(3) 负荷不确定。若已知负荷特性,则按照负荷波动样本预测负荷值,如该特性为未知状态,则假设负荷波动满足正态分布。

1.2.2 安全性评估模型目标函数与约束条件

本文依据以上三种不确定因素的概率特征,通过2m+1点估计法,估算未知估计随机变量,以评估上层规划模型的静态安全性。在评估过程中,不仅考虑正常状态线路,同时考虑N-1故障状态下的线路。在每次评估时,均以输电系统最小切负荷为目标函数,如式(7)所示:

$$F_2 = \min \sum_i D_{i,n,s}^{LS} \quad (7)$$

式中, $D_{i,n,s}^{LS}$ 表示基于点估计法的第s次计算时,N-1条件下节点i的切负荷功率。

在该模型的静态安全性评估过程中,主要考虑线路处于正常状态与线路处于N-1状态下的运行约束条件,为此,本文构建如下约束条件:

(1) 功率平衡约束

采用式(8)表示输电网运行过程中的功率平衡约束:

$$\sum_{l|j=i} P_{l,n,s} - \sum_{l|i=i} P_{l,n,s} + \sum_{l_0|j=i} P_{l_0,n,s} - \sum_{l_0|i=i} P_{l_0,n,s} + \sum_{g|i} P_{g,n,s} + \sum_{k|i} P_{k,s} + \sum_{w|i} P_{w,s} = D_{i,s} - D_{i,n,s}^{LS} \quad (8)$$

式中,在点估计法第s次计算时的节点负荷、光伏出力与风电出力分别为 $D_{i,s}$ 、 $P_{k,s}$ 、 $P_{w,s}$;n表示线路处于N-1故障状态下的索引;在第s次计算得到在N-1状态下扩建线路l与已有线路 l_0 上的有功潮流为 $P_{l,n,s}$ 、 $P_{l_0,n,s}$,常规机组出力为 $P_{g,n,s}$;下标li与lj依次表示线路l的首段、末端节点。

(2) 节点电压相角约束

通过式(9)约束节点电压相角:

$$\theta^{\min} \leq \theta_{i,n,s} \leq \theta^{\max} \quad (9)$$

式中, θ 为节点电压相角,点估计法第s次计算得到第i个节点电压相角为 $\theta_{i,n,s}$; θ^{\min} 、 θ^{\max} 分别表示约束范围最小、最大电压相角。

(3) 通过式(10)约束多形态间歇性电源集中接入常规机组出力

$$P_g^{\min} \leq P_{g,n,s} \leq P_g^{\max} \quad (10)$$

式中, $P_{g,n,s}$ 表示点估计法第s次计算得到的常规机组出力; P_g^{\min} 、 P_g^{\max} 分别表示最小、最大出力范围。

(4) 节点失负荷约束

采用式(11)约束节点失负荷范围:

$$0 \leq D_{i,n,s}^{LS} \leq D_{i,s} \quad (11)$$

式中, $D_{i,n,s}^{LS}$ 表示第s次计算得到的第i个节点失负荷。

(5) 已有线路与扩展线路潮流约束

本文通过如下方式构建已有、扩展线路的两种约束,

具体如式(12)、式(13)所示:

$$\begin{cases} (1-b_{l_0,n})P_{l_0}^{\min} \leq P_{l_0,n,s} \leq (1-b_{l_0,n})P_{l_0}^{\max} \\ (\theta_{l_0i,n,s} - \theta_{l_0j,n,s}) / X_{l_0} - P_{l_0,n,s} + b_{l_0,n}K \geq 0 \\ (\theta_{l_0i,n,s} - \theta_{l_0j,n,s}) / X_{l_0} - P_{l_0,n,s} + b_{l_0,n}K \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} b'_l(1-b_{l,n})P_l^{\min} \leq P_{l,n,s} \leq b'_l(1-b_{l,n})P_l^{\max} \\ (\theta_{li,n,s} - \theta_{lj,n,s}) / X_l - P_{l,n,s} + (1-b'_l + b_{l,n})K \geq 0 \\ (\theta_{li,n,s} - \theta_{lj,n,s}) / X_l - P_{l,n,s} - (1-b'_l + b_{l,n})K \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, b'_l 表示线路l在上层规划方案中的扩建情况; $b_{l,n}$ 、 $b_{l_0,n}$ 表示线路l与线路 l_0 是否在N-1条件,当两者的值为1时,说明线路l与线路 l_0 处于N-1条件,当两者值为0时,则说明不处于N-1条件,即两者为0时,说明两线路处于正常运行状态。

通过式(12)与式(13)的计算可知,当线路 l_0 在N-1状态下,该线路的有功潮流为0,其他线路的潮流变化能够满足潮流越限风险度最小化目标,因此扩建线路l可以在N-1条件下实现线路输送能力。通过下层安全性评估模型的计算,可以分析上层模型设计的扩展线路是否能够实现最小切负荷,同时有利于双层规划模型的联合求解。

1.3 输电网扩展双层自动规划模型求解

1.3.1 改进粒子群优化算法研究

本文通过改进粒子群优化算法实现双层自动规划模型求解。传统粒子群优化算法在全局寻优过程中会出现局部最优解问题,因此在粒子群优化算法中引入量子力学相关概念,构建量子粒子群算法。该算法可以提升粒子群算法的收敛速度,增强其寻优能力。该算法具体计算公式如下:

$$h_c = \varphi \times h_{ci} + (1-\varphi) \times g_c \quad (14)$$

$$m_c = \frac{\sum_{i=1}^M h_{ci}}{M} \quad (15)$$

$$r(t) = \begin{cases} 1, rand > 0.5 \\ -1, rand \leq 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

$$x(t+1) = h_i + r(t) \cdot \beta |m_c - x(t)| \times \ln\left(\frac{1}{u}\right) \quad (17)$$

式中,个体平均最优值为 m_c ;0-1之间的随机数为 φ ;u;每一粒子的局部吸引子为 h_i ;粒子寻优过程中获取的局部最优值为 h_{ci} ;历史种群最优值为 g_c ;种群数量为 M ;收缩扩张系数为 β ;当通过线性缩小 β 的值可以增强算法收敛速度。

1.3.2 优化规划流程

本文通过以下流程实现输电网扩展自动规划,具体内容如下:

(1) 输入规划所需参数,同时确定粒子维数 m 与种群中的粒子数量 z ;

(2) 采用二进制编码方法,对规划线路与多形态间歇性电源集中接入的不确定性因素进行编码,生成满足约束条件的初始种群;

(3) 更新量子粒子位置,生成子种群;

(4) 通过 $2m+1$ 点估计法求解下层最小切负荷,并将下层安全性评估结果带入到上层规划模型中,计算种群个体的适应度,同时进行排序,获取最优适应度值;

(5) 判断排序结果是否满足收敛条件,若不满足,返回步骤(3)继续计算;若满足,输入最优解,实现输电网扩展自动规划。

2 实验分析

通过 Garver18 节点系统对本文规划方法进行仿真模拟,以验证该方法的可用性。该仿真模型按照国内某区域 18 节点 750 kV 实际规划系统进行构建,其中每两点之间可任意架设线路,扩建线路上限为三条。通过该仿真模型,获取本文规划方案。

选取文献[7]计及充电负荷价格响应方法、文献[8]考虑输电结构方法与多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法进行对比,分析不同方法生成的规划方案所产生的年期期望缺电量,以此验证不同规划方案的应用效果,分析结果如表1所示。

表1 不同输电网扩展规划方案对比

规划方案	扩展线路与回路数	年期期望缺电量/MWh
多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法	1-10(1),2-3(1),3-4(1),4-11(1),5-12(2),5-7(1),6-13(2),7-9(1),7-12(3),8-14(2),9-16(2),10-17(3),11-18(2),12-15(1),13-16(2),14-18(1),15-17(2),16-17(1),17-18(2)	6 432.46
考虑解列控制规划法	1-4(1),2-7(2),3-8(1),4-9(2),6-15(2),8-15(1),9-14(2),12-16(2),13-18(1),14-17(1),17-18(2)	482 857.45
有效输电成本规划法	1-2(1),2-6(2),3-5(1),4-7(2),6-12(3),7-14(1),8-15(1),9-13(1),12-14(12),13-17(2),16-17(2),17-18(1)	38 294.46

表1中,在()内的数字为该回路内扩建线路,通过上述方法对比可知,考虑解列控制规划法在规划后依然保持较高的年期期望缺电量,而有效输电成本规划法与多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法后得到的扩展方案明显低于考虑解列控制规划法。同时,多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法扩展线路更清晰,且年期期望缺电量达到 6 432.46 MWh。在三种方法中保持最低水平,因此多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法具有较高的自动规划能力。

分析应用多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法进行输电网扩展规划后,部分线路在接入多形态间歇性电源时的运行效率、弃负荷率以及网损率变化,分析结果如表2所示。

表2 线路规划后应用状态

线路编号	运行效率/%	弃负荷率/%	网损率/%
1-10(1)	84.45	0.78	1.45
2-3(1)	86.43	0.79	1.75
3-4(1)	88.21	0.74	1.64
4-11(1)	85.57	0.72	1.57
5-12(2)	84.46	0.65	1.86
5-7(1)	87.53	0.85	1.87
6-13(2)	87.52	0.82	1.46
7-9(1)	89.66	0.68	1.85
7-12(3)	93.69	0.77	1.47
8-14(2)	85.79	0.73	1.64
9-16(2)	90.75	0.71	1.35
10-17(3)	91.43	0.68	1.66
11-18(2)	89.68	0.84	1.78
12-15(1)	88.46	0.81	1.75
13-16(2)	86.48	0.74	1.64

根据表2可知,当应用多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法进行输电网扩展自动规划后,每条线路之间的运行效率均达到 80% 以上,甚至部分线路的运行效率达到 90% 以上。而线路之间的弃负荷率均保持较低水平,每两条线路之间的弃负荷率均未超过 1%。同时线路之间网损率也均保持在 2% 以下,说明应用多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法进行规划后,可以使线路保持较高水平的输送能力。

分析应用本文规划方法后,输电网在运行过程中,部分线路经过扩展后的弃风量情况,分析结果如图1所示。

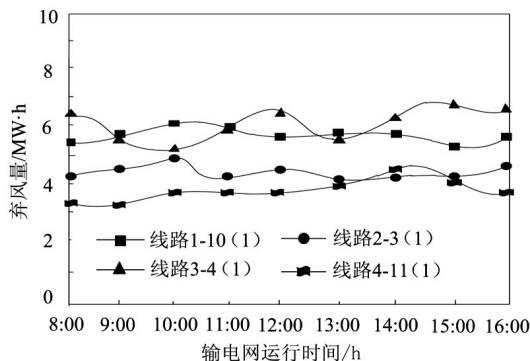


图1 线路弃风量分析

根据图1可知,在输电网运行过程中,线路扩展后的弃风量最低保持在 3.0 ~ 4.5 MW·h 之间波动,而线路弃风量最高未超过 7 MW·h,由此可以看出,经过多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法规划后,可以明

显降低线路的弃风量,可以避免线路出现大规模损耗。

分析经过多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法扩展规划后,多形态间歇性电源集中接入1~9线路时的切负荷量变化以及潮流越限概率,分析结果如图2所示。

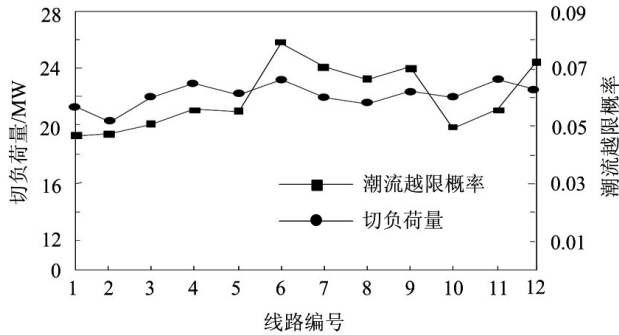


图2 切负荷与潮流越限概率分析

通过图2可以清晰看出经过多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法规划后输电网每条线路上的切负荷量与潮流越限概率,由图2可知,不同线路之间的切负荷量差距不大,均处于20 MW~24 MW之间,始终保持较低水平;而不同线路之间的潮流越限概率差距较大,但总体来看均未超过0.09,说明线路的潮流越限概率不高,可以保持输电网稳定运行。

3 结束语

本文研究考虑多形态间歇性电源集中接入的输电网扩展自动规划方法,充分考虑多种优化目标与不确定因素,构建有效的输电网扩展自动规划方法,并通过实验生成规划方案,验证规划方案的应用效果。在未来研究阶段,可以现有设计为基础,继续深化输电网扩展规划方法,使输电网运行更加安全。

参考文献:

- [1] 但扬清,孙可,黄亦昕,等. 计及输电线路利用率的阻塞场景筛选及输电网扩展规划[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(3): 80-91.
- [2] 王富阳,刘友波,胥威汀,等. 计及市场化电价信号导向的含高比例水电输电网扩展规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 190-198.
- [3] 刘志豪,粟时平,唐谟懿,等. 基于混成自动机理论的间歇性电源并网多逆变器并联环流抑制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 128-135.
- [4] 周景,张衡,刘盾盾,等. 考虑连锁故障的输电网扩展规划方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 136-142.
- [5] 李露露,李永培,周新月,等. 10 kV交联聚乙烯电缆内部多形态间歇性电弧故障建模[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23):

6104-6115.

- [6] 唐谟懿,朱涛波,罗雪莲,等. 计及电压稳定性评估的间歇性分布式电源接入配电网定容选址研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 100-108.
- [7] 肖楚飞,唐飞,刘涤尘,等. 考虑解列控制的输电网扩展规划研究[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2204-2213.
- [8] 陈典,钟海旺,夏清,等. 基于有效输电成本的输电网扩展规划[J]. 中国电机工程学报, 2020(1): 30-38, 371.
- [9] 李玲芳,陈占鹏,胡炎,等. 基于灵活性和经济性的可再生能源电力系统扩展规划[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(7): 791-801.
- [10] 陈栋. 多间歇能源消纳下主动电网调度数据动态生成方法[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(9): 176-179, 182.
- [11] 李傲伟,柳璐,程浩忠,等. 高比例可再生能源接入下考虑输配协同的输电网规划测试系统[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 19-27.
- [12] 胥威汀,杨宇玄,周笑言,等. 考虑输电阻塞盈余的输电网双层扩展规划模型[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 113-120.

作者简介: 卢子敬(1979—),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向:电力系统及其自动化。

通信作者: 邓丽(1985—),女,硕士研究生,高级工程师,研究方向:环境工程。