

计及线损的交流输电网线路扩展鲁棒规划方法

武振宇¹, 刘永行², 刘源森², 张艺涵³, 郑永乐³, 祖文静³

(1. 国网河南省电力公司 科技部, 河南 郑州 450018;

2. 华中科技大学 强电磁技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 国网河南省电力公司经济技术研究院 能源互联网经济研究中心, 河南 郑州 450052)

摘要:随着“双碳”目标的提出和新型电力系统的发展,风光等可再生能源占比不断提高,负荷体量增大且波动性增强,源荷双侧不确定性对输电网线路扩展提出了更高要求。同时,输电网输电量的增加使得线损成为影响输电网线路规划方案经济性的关键因素。为此,提出了一种同时考虑线损和源荷不确定性的交流输电网线路扩展鲁棒规划方法。首先,建立考虑线损的交流潮流模型,以提升建模精度,确保规划方案的经济性;其次,采用典型场景集替代传统极限场景集,以降低决策保守性,构建基于典型场景集的 $N-1$ 预想故障约束集,以保障系统安全运行。所提模型为含大规模整数变量的混合整数二阶锥规划问题,计算复杂度高。为提高求解效率,采用列和约束生成(C&CG)算法将模型分解为主问题和多个典型场景子问题,通过迭代求解实现高效计算。最后,基于改进的IEEE-24节点系统以及IEEE-118节点系统进行仿真计算,验证了所提模型和方法的有效性。

关键词:线路损耗;交流潮流模型;鲁棒优化;C&CG算法;线路扩展规划

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26437

A Robust Planning Method for AC Grid Line Extension Considering Line Losses

WU Zhenyu¹, LIU Yonghang², LIU Yuansen², ZHANG Yihan³, ZHENG Yongle³, ZU Wenjing³

(1. *Science and Technology Department, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450018,*

Henan, China; 2. *State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong*

University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. *Energy*

Internet Economic Research Center, State Grid Henan Economic and

Technical Research Institute, Zhengzhou 450052, Henan, China)

Abstract: With the proposal of the “dual carbon” goals and the development of new power systems, the proportion of renewable energy sources such as wind and solar power continues to increase, and the load volume grows with enhanced volatility, posing higher demands on the expansion of transmission lines due to uncertainties on both the supply and demand sides. Meanwhile, the increase in transmission volume makes line losses a critical factor affecting the economic efficiency of transmission line planning schemes. To address this, a robust planning method for AC transmission line extension considering both line losses and supply-demand uncertainties was proposed. Firstly, an AC power flow model considering line losses was established to improve modeling accuracy and ensure the economic efficiency of the planning scheme. Secondly, typical scenario sets were used to replace traditional extreme scenario sets to reduce decision conservatism, and an $N-1$ contingency constraint set based on typical scenarios was constructed to ensure system safety. The proposed model was a mixed-integer second-order cone programming problem with large-scale integer variables, which has high computational complexity. To improve solving efficiency, the constraint-and-column generation (C&CG) algorithm was employed to decompose the model into a master problem and multiple typical scenario subproblems, achieving efficient computation through iterative solving. Finally, simulation calculations based on the modified IEEE-24 node system and the

基金项目: 国家电网河南省电力公司科技项目(5217L0240012)

作者简介: 武振宇(1971—),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统分析运行和电力系统智能技术,

Email:2839565475@qq.com

通讯作者: 刘源森(1998—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为电力系统分析规划,Email:438303843@qq.com

IEEE-118 node system verify the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: line losses; AC current model; robust optimization; constraint-and-column generation (C&CG) algorithm; line expansion planning

随着“双碳”目标的提出,建设新型电力系统成为推动新型能源体系发展的核心任务,而建立高比例新能源供给消纳体系是实现清洁低碳目标的关键。然而,新能源出力的不确定性给电力系统的安全与高效运行带来了巨大挑战。如何高效求解含新能源出力不确定性的输电网线路扩展规划问题,对实现高比例新能源并网目标具有重要意义^[1-2]。

目前,在电网规划领域,现有研究主要聚焦于输电线路^[3-4]和发电侧资源的扩展规划^[5]。文献[6]评估了现有协调优化工具的当前和潜在功能,讨论了开发高级协调优化模型的需求和挑战。文献[7]研究了分布式电源和新型负荷对主动配电网规划的影响。文献[8]研究了电网规划中的成本-效益分析问题。文献[9]针对大规模多阶段多目标电网规划问题,提出了多目标电网规划的分层最优化方法。文献[10]针对电网规划方案综合决策过程复杂的问题,建立了基于SE-DEA模型的多属性多目标电网规划方案综合决策体系。文献[11]针对城市配电网规划问题,研究了配电网规划的综合评价指标体系及方法。然而,上述文献均基于直流潮流模型,忽略了线路网损的影响。随着输电网负荷体量的增大和交流输电工程的增多,输电损耗日益显著,因此,有必要在输电网扩展规划问题中考虑输电线路损耗的影响,以提升规划决策的可靠性。

在线损计算与优化方面,文献[12]针对直流潮流模型忽略网损的问题,提出一种考虑网损的最优潮流模型。传统的交流潮流模型虽能保证计算精度,但含有难以求解的二次等式约束。传统二阶锥模型对交流等式约束进行松弛,但松弛精度较低。对此,文献[13]提出对松弛上限进行约束;文献[14]提出基于模糊集理论和改进二阶锥方法的调度模型;文献[15]提出添加紧密线性切割的方法;文献[16]利用多面体对锥面进行线性化处理;上述方法均用以提高松弛精度。

在输电网规划中,为应对新能源出力等不确定性因素,现有研究通常采用随机规划法或鲁棒优化处理。在基于随机优化的电网扩展规划研究方面,文献[17]针对不确定性的发电和输电协

调规划问题,提出了随机协调的发电和输电扩展规划模型。文献[18]针对节点注入功率不确定性的问题,提出了考虑“非预期性”约束条件的多阶段随机优化模型。文献[19]针对风力发电场景的生成问题,提出了基于风持续时间曲线及K-means聚类技术的场景生成方法。文献[20]为降低鲁棒优化机组组合方法的保守性,提出了一种数据驱动的含风电大规模电力系统机组组合自适应鲁棒优化方法。

在基于鲁棒优化的电网扩展规划研究方面,文献[21]综述了鲁棒优化在电力系统机组组合决策中的应用,对比分析了经典鲁棒优化和分布式鲁棒优化方法特点。文献[22]针对大规模新能源并网的输电网规划问题,提出了含随机变量的非线性优化模型,并基于鲁棒优化算法对模型进行求解。文献[23]考虑风光出力波动对微电网规划的影响,建立了以综合成本最小为目标的优化模型,并采用列和约束生成(column-and-constraint generation, C&CG)算法求解。文献[24]针对电力系统三层鲁棒优化求解问题,使用分块坐标下降法提高输电线路鲁棒扩展规划的计算效率。文献[25]在含混合整数的输电线路鲁棒协同规划问题中,使用改进的嵌套C&CG算法避免相关数值问题。文献[26]在微电网两阶段鲁棒优化方法中引入不确定性参数调节保守性,并采用C&CG算法求解。文献[27]提出了含多类型分布式能源的鲁棒优化调度模型。综上,鲁棒优化需要选择合适的确定集,但选择极限场景集降低了规划的经济性。

针对上述研究的不足及存在的问题,本文建立了以最小建线成本为目标并考虑线路网损以及新能源出力不确定性的输电线路扩展鲁棒规划模型。

针对所提的输电线路扩展鲁棒规划模型,本文提出基于典型场景集的 $N-1$ 预想故障约束集,以降低规划方案的保守性;采用C&CG算法将模型分解成一个主问题和多个子问题进行分解求解,以提高计算效率;针对主问题中支路功率约束的非凸特性,采用混合整数二阶锥规划(second-order cone programming, SOCP)对模型进

行化简,以保证算法的收敛性。最后通过实际算例验证所提模型和方法的有效性。

1 计及线损成本的交流输电网线路扩展鲁棒规划模型

降低损耗对于电网的经济运行和节能减排具有重要意义。在输电网的线路扩展规划中,考虑线损能进一步提高规划决策方案的可靠性。本节将最优潮流模型与考虑线损成本的规划目标结合,建立计及线损的交流输电网线路扩展鲁棒规划模型。

1.1 输电网支路潮流模型

交流输电网在运行时各个决策变量包括节点*i*上发电机输出有功/无功功率 P_{Gi}/Q_{Gi} 、节点*i*电压的平方 V_i 、线路*ij*送端有功功率 P_{ij}^S 、受端有功功率 P_{ij}^R 、送端无功功率 Q_{ij}^S 、受端无功功率 Q_{ij}^R 、受端视在功率 S_{ij}^R 、送端电压的平方 V_{ij}^S 、受端电压的平方 V_{ij}^R 、线路*ij*电流的平方 I_{ij} 、节点*j*电压的平方 V_j 、节点*j*的净注入有功/无功功率、从节点*j*流入节点*k*的有功功率 P_{jk} 、从节点*i*流入节点*j*的有功功率 P_{ij} 、从节点*j*流入节点*k*的无功功率 Q_{jk} 、从节点*i*流入节点*j*的无功功率 Q_{ij} 、节点*i*到节点*j*的电阻/电抗 r_{ij}/x_{ij} 、节点*j*的对地电导/电纳 g_j/b_j 、所有以节点*j*为首端节点的支路末端节点集合 $\delta(j)$ 、所有以节点*j*为末端节点的支路首端节点集合 $\pi(j)$ 、系统所有节点集合*B*。

基于二阶锥规划的支路潮流模型具体包括以下约束:

节点功率平衡方程为

$$P_j = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij} - I_{ij}r_{ij}) + g_j V_j \quad \forall j \in B \quad (1)$$

$$Q_j = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij} - I_{ij}x_{ij}) + b_j V_j \quad \forall j \in B \quad (2)$$

式中:*i, j, k*为节点编号。

支路潮流方程为

$$P_{ij}^S = P_{ij}^R + r_{ij} I_{ij} \quad (3)$$

$$Q_{ij}^S = Q_{ij}^R + x_{ij} I_{ij} \quad (4)$$

电压降方程为

$$V_{ij}^S - V_{ij}^R = 2r_{ij}P_{ij}^R + 2x_{ij}Q_{ij}^R + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij} \quad (5)$$

发电机有功/无功上、下限约束以及电压和视在功率上、下限约束为

$$P_{Gi.min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi.max} \quad (6)$$

$$Q_{Gi.min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi.max} \quad (7)$$

$$(V_{i.min})^2 \leq V_i \leq (V_{i.max})^2 \quad (8)$$

$$0 \leq S_{ij}^R \leq S_{ij.max} \quad (9)$$

凸松弛后的支路功率方程为

$$(P_{ij}^R)^2 + (Q_{ij}^R)^2 \leq (S_{ij}^R)^2 \quad (10)$$

$$(P_{ij}^S)^2 + (Q_{ij}^S)^2 \leq (S_{ij.max}^R)^2 \quad (11)$$

$$(S_{ij}^R)^2 + \left(\frac{V_{ij}^R - I_{ij}}{2}\right)^2 \leq \left(\frac{V_{ij}^R + I_{ij}}{2}\right)^2 \quad (12)$$

由于式(10)~式(12)符合二阶锥约束形式,因此考虑线路损耗的支路潮流模型是一个二阶锥规划问题。

1.2 交流输电网线路扩展鲁棒规划模型

1.2.1 计及线损成本的规划目标

综合含高比例新能源的电网交流潮流模型,并考虑*N*-1预想故障校验,进行全网线路扩容,得到全网建线成本最小对应的目标模型。

规划模型对应的目标函数为

$$f = LC + EC \quad (13)$$

其中

$$LC = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \times \left(\sum_{ij \in \Omega} \sum_{x=exi_{ij}+1}^{max_{ij}} cost_{ij} \alpha_{ij,x} \right) \quad (14)$$

$$EC = (C_{loss.max} + C_{loss.min}) \times 10^{-4} \quad (15)$$

$$C_{loss.max} = Price_{th} \times 24 \times 183 \times \sum_{i \in N_i} (I_{i,max} r_i) \times S_B \quad (16)$$

$$C_{loss.min} = Price_{th} \times 24 \times 183 \times \sum_{i \in N_i} (I_{i,min} r_i) \times S_B \quad (17)$$

式中:*LC*为电网扩建线路投资的等年值;*EC*为线路损耗成本;*r*为每年的折扣率;*n*为输电网线路寿命年限; $r(1+r)^n / [(1+r)^n - 1]$ 为等年值系数; exi_{ij} 为输电走廊*ij*内已有的线路数; max_{ij} 为输电走廊*ij*内最大可建支路数; $cost_{ij}$ 为在输电走廊*ij*建设新线路的总费用; $\alpha_{ij,x}$ 为走廊*ij*内第*x*条支路是否架设的二进制决策变量,若架设则 $\alpha_{ij,x} = 1$,否则 $\alpha_{ij,x} = 0$;*i, j*为走廊的首、末端节点; $C_{loss.max}$ 为夏季大负荷线损成本; $C_{loss.min}$ 为冬季小负荷线损成本; $Price_{th}$ 为上网电价成本; N_i 为线路数量; $I_{i,max}$ 为电网在夏季基态情况下规划得到的每条线路的电流变量的平方; r_i 为线路电阻; S_B 为基准容量。

为使电网扩建线路投资最小,系统中新建支路数量应该最小,初始已建支路总数为 n_{ij}^{min} ,扩建后支路总数为 n_{ij}^{max} 。

n_{ij}^{min} 和 n_{ij}^{max} 满足以下约束:

$$\alpha_{ij}^{(k)} = 1 \quad k = 1, \dots, n_{ij}^{min} \quad (18)$$

$$\alpha_{ij}^{(k)} \in \{0, 1\} \quad k = n_{ij}^{min} + 1, \dots, n_{ij}^{max} \quad (19)$$

$$n_{ij}^{\min} \leq \sum_{k=1}^{n_{ij}^{\max}} a_{ij}^{(k)} \leq n_{ij}^{\max} \quad (20)$$

式(18)表示走廊 ij 内已建支路的二进制决策变量约束,已建线路决策变量为1,走廊内编号为1至 n_{ij}^{\min} ;式(19)表示走廊 ij 内待建线路的二进制决策变量约束,若线路投建,则决策变量为1,否则为0,待建线路走廊内编号为 $n_{ij}^{\min} + 1$ 至 n_{ij}^{\max} ;式(20)为走廊内总线路数上、下限约束。

1.2.2 考虑新能源不确定性的线路扩展规划约束

传统的鲁棒优化主要采用盒式集合的极限场景来描述不确定性,但该方法具有较高的保守性,且极限场景在实际中难以发生。为降低决策的保守性,本文采用典型场景表征新能源出力的

不确定性,采用变分自编码器模型^[28]生成风电数据,采用标准化流模型^[29]生成光伏和负荷数据,并根据这些数据生成新能源出力的典型场景集。

变分自动编码器是一种生成模型,也是自动编码器的一种变体,它通过引入潜在变量来学习数据的分布,并生成与原始数据相似的新样本,通过解决难以表示的隐变量后验分布问题,使隐变量的表示服从正态分布^[30]。标准化流模型也是一种生成模型,用于对复杂的概率分布建模。在标准化流模型中,通过设计可逆变换层,将一个简单的分布模型通过一系列变换映射到目标分布的空间,从而实现目标分布的建模^[31]。相应模型生成数据示意图如图1、图2所示。

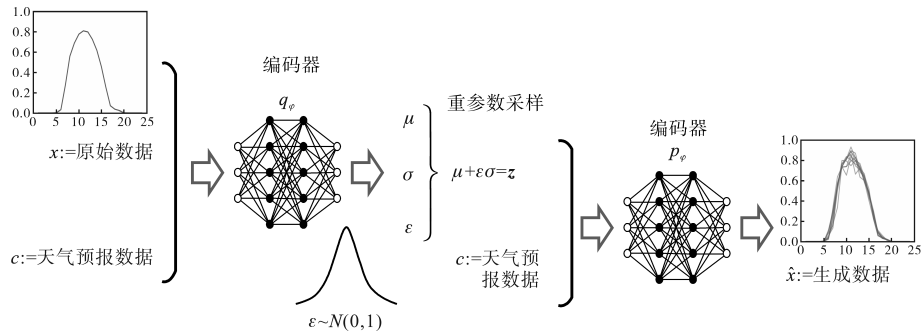


图1 变分自编码器生成数据示意图

Fig.1 Variational autoencoder generates a schematic diagram of the data

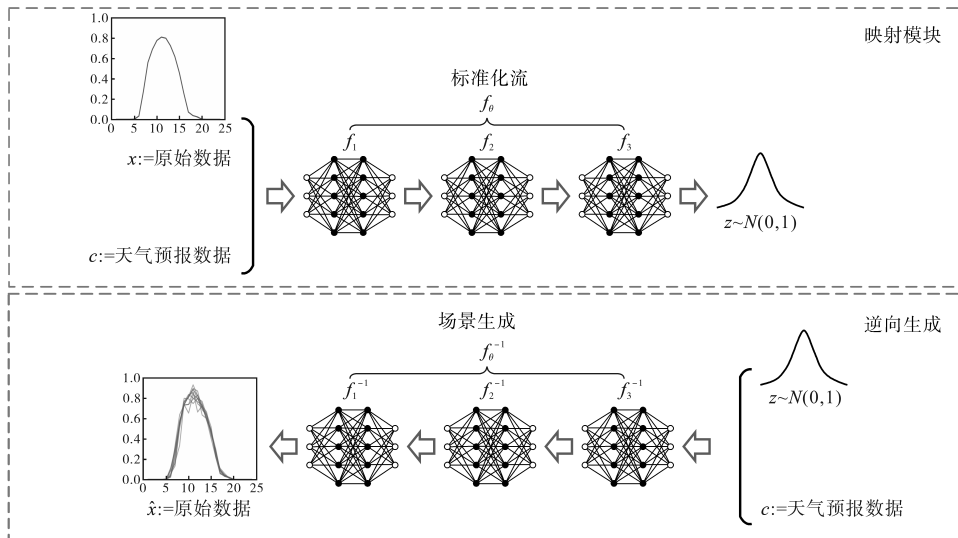


图2 标准化流模型生成数据示意图

Fig.2 Normalizing flow model generates a schematic diagram of the data

为保证支路潮流约束在新能源出力的各种不确定性场景下可行,将各典型场景下的新能源出力代入电网交流潮流模型,在不考虑故障时,可得正常状态下的约束,其中各参数、各约束的形式及具体含义与前一小节相似,只是下标多加s代表在各典型场景下的约束,在此具体公式不

再列出。

当电网发生 $N-1$ 预想故障后,交流电网潮流约束中新增了故障支路和非故障支路的二进制决策变量约束:

$$a_{ij}^{(k)*} = 0 \quad K = n_{ij}^{\min} \quad (21)$$

$$a_{ij}^{(k)*} = 1 \quad k = 1, \dots, n_{ij}^{\min} - 1 \quad (22)$$

式(21)是故障支路的二进制决策变量约束,表示选定走廊*ij*编号最大的已建成支路作为走廊*ij*的故障支路,当电网发生*N-1*预想故障时,其值为0;式(22)是非故障支路的二进制决策变量约束,其值为1。故障后交流潮流电网参数的约束关系与非故障状态下相似^[32-33],只是在决策变量的上标添加*mn*表示故障状态决策变量,各支路的决策变量添加星号表示其为目标函数中传递过来的确定量。此外,为了将故障线路在交流潮流模型中等效为线路开断,在此故障状态下新增如下约束:

$$0 \leq S_{ij,s}^{R(mn)} \leq S_{i,\max} \cdot \alpha_{ij}^{(k)} \quad (23)$$

$$0 \leq I_{ij,s}^{mn} \leq I_{ij,s}^{mn} \cdot \alpha_{ij}^{(k)} \quad (24)$$

式(23)~式(24)用来约束故障线路的视在功率与电流,当 $\alpha_{ij}^{(k)} = 0$ 时,对应线路断开,线路不进行功率传输,当 $\alpha_{ij}^{(k)} = 1$ 时,对应线路正常工作。

2 交流输电网鲁棒优化模型求解

为提高模型求解效率,采用C&CG算法将模型分解成一个主问题和多个子问题进行分解求解。C&CG算法适用于求解两阶段鲁棒优化问题,其算法核心在于通过主-子问题的迭代实现全局最优解求解^[34-35]。针对本文所提模型,其原理可概括为三步:第一步,基于当前已知的最恶劣场景,对主问题进行求解,求解最坏情况下最小运行成本的最优方案;第二步,针对主问题给出的方案,带入子问题中,固定子问题的结构,寻找最大运行成本的极端场景;第三步,将新发现的极端场景加入到主问题中,对主问题进行迭代更新,重新优化直至收敛。

2.1 基于C&CG优化算法的求解步骤

求解步骤如下:

1)将原问题分解成一个主问题和多个子问题,在考虑原问题的部分场景下,求解电网规划主问题。

2)将主问题得到的规划方案添加到子问题中,固定子问题的电网结构,使子问题仅含有连续变量,得到一个简单的含二阶锥功率约束的交流潮流优化问题。

3)每个子问题的求解条件对应于主问题的一个场景,求解子问题后,将结果中的最坏场景添加到主问题中,进行下一次迭代。

4)当不再有最坏场景添加到主问题时,停止计算,输出得到原问题的最优解。上述算法求解

步骤如图3所示。

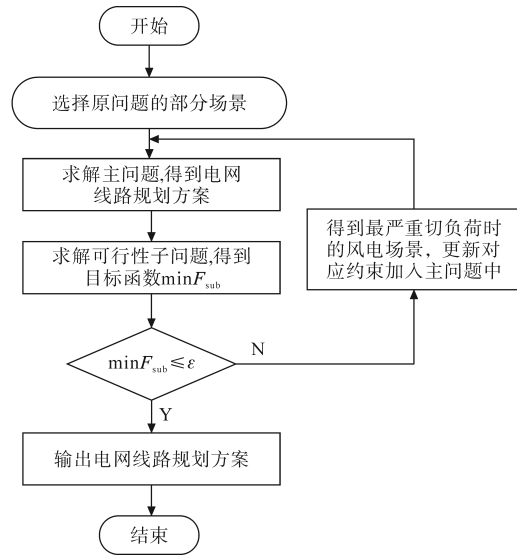


图3 C&CG算法流程图

Fig.3 C&CG algorithm flowchart

2.2 模型的主问题

鲁棒规划模型中的原问题表示如下:

$$\begin{cases} \min F = c(x) \\ \left. \begin{aligned} & f_1(x) = 0 \\ & f_2(x) \geq 0 \\ & g_1(p_{w,s}, p_{ph,s}, p_{d,s}, x, y^b) = 0 \\ & g_2(p_{w,s}, p_{ph,s}, p_{d,s}, x, y^b) \geq 0 \\ & h_1(p_{w,s}, p_{ph,s}, p_{d,s}, x, y^c) = 0 \\ & h_2(p_{w,s}, p_{ph,s}, p_{d,s}, x, y^c) \geq 0 \end{aligned} \right\} \text{s.t.} \end{cases} \quad (25)$$

式中: F 为目标函数,即输电网扩展线路投资建设成本,由二进制变量*x*决定; $p_{ph,s}$ 为在场景*s*下的光伏出力; $p_{w,s}$ 为在场景*s*下的风电出力; $p_{d,s}$ 为在场景*s*下的各节点负荷; x 由二进制决策变量 $\alpha_{ij}^{(k)}$ 决定; y^b, y^c 分别为在基态和故障后与系统运行相关的连续变量; $f_1(x) = 0, f_2(x) \geq 0$ 为与电网扩建相关的约束条件; $g_1(p_{w,s}, p_{ph,s}, p_{d,s}, x, y^b) = 0$ 和 $g_2(p_{w,s}, p_{ph,s}, p_{d,s}, x, y^b) \geq 0$ 为电网基态运行下的交流潮流约束条件; $h_1(p_{w,s}, p_{ph,s}, p_{d,s}, x, y^c) = 0$ 和 $h_2(p_{w,s}, p_{ph,s}, p_{d,s}, x, y^c) \geq 0$ 为电网故障后的交流潮流约束条件,由于支路功率约束中含有二阶锥约束,因此,模型为混合整数二阶锥模型。

主问题以全网建设投资成本最小为目标函数,同时考虑在预测值基态和不同添加场景下的交流潮流约束。因此,求解线路规划方案的主问题可表示如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F_{\max} = c(x) \\ f_1(x) = 0 \\ f_2(x) \geq 0 \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_1(p_{w,s^*}, p_{ph,s^*}, p_{d,s^*}, x, y_s^b) = 0 \\ g_2(p_{w,s^*}, p_{ph,s^*}, p_{d,s^*}, x, y_s^b) \geq 0 \\ h_1(p_{w,s^*}, p_{ph,s^*}, p_{d,s^*}, x, y_s^c) = 0 \\ h_2(p_{w,s^*}, p_{ph,s^*}, p_{d,s^*}, x, y_s^c) \geq 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (26)$$

式中: s^* 为各典型场景下,基态和不同故障态下产生最大切负荷的最坏场景,由下文的子问题计算比较得出。

在该最坏场景下,进行电网规划计算,并将主问题的求解结果用 $\alpha_{ij}^{(k)}$ 表示,并将结果作为子问题的条件。子问题求解完毕后,得到电网切负荷最大时的情况,并将此情况添加到主问题中进行下一次迭代,所得规划方案再作为子问题的新条件 $\alpha_{ij}^{(k)}$,循环迭代。

2.3 模型的子问题

在2.2节中,主问题求解得到的结果作为条件添加到子问题里。但考虑到电网中因部分节点风光出力不足或用电需求大导致电网供电不足,以及出现 $N-1$ 预想故障时无法满足节点负荷需求,从而导致该模型无解,因此,在基态和故障态下的潮流公式中添加非松弛变量 $P_{1,i}^{(k)}, Q_{1,i}^{(k)}, P_{2,i}^{(k)}, Q_{2,i}^{(k)}$,具体如下:

$$P_{gi,s} + P_{Ri} - P_{di} + P_{1,i}^{(k)} \geq \sum_{i \in \delta^S(ij)} P_{ij,s}^S - \sum_{i \in \delta^R(ij)} P_{ij,s}^R \quad (27)$$

$$Q_{gi,s} - Q_{di} + Q_{1,i}^{(k)} \geq \sum_{i \in \delta^S(ij)} Q_{ij,s}^S - \sum_{i \in \delta^R(ij)} Q_{ij,s}^R \quad (28)$$

$$P_{gi,s}^{mn} + P_{Ri} - P_{di} + P_{2,i}^{(k)} \geq \sum_{i \in \delta^S(ij)} P_{ij,s}^{S,mn} - \sum_{i \in \delta^R(ij)} P_{ij,s}^{R,mn} \quad (29)$$

$$Q_{gi,s}^{mn} - Q_{di} + Q_{2,i}^{(k)} \geq \sum_{i \in \delta^S(ij)} Q_{ij,s}^{S,mn} - \sum_{i \in \delta^R(ij)} Q_{ij,s}^{R,mn} \quad (30)$$

子问题以各松弛变量总和最小为目标函数,同时考虑电网运行基态和故障后的交流潮流约束。因此,子问题可由下式表示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F_{\text{sub}} = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{k=1}^{n_{ij}^{\max}} (P_{1,i}^{(k)} + Q_{1,i}^{(k)} + P_{2,i}^{(k)} + Q_{2,i}^{(k)}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_1(P_{w,s}, P_{ph,s}, P_{d,s}, \alpha_{ij}^{(k)}, y_s^b) = 0 \quad s = 1, \dots, N_s \\ g_2(P_{w,s}, P_{ph,s}, P_{d,s}, \alpha_{ij}^{(k)}, y_s^b, P_{1,i}^{(k)}, Q_{1,i}^{(k)}) \geq 0 \quad s = 1, \dots, N_s \\ h_1(P_{w,s}, P_{ph,s}, P_{d,s}, \alpha_{ij}^{(k)}, y_s^c) = 0 \quad s = 1, \dots, N_s \\ h_2(P_{w,s}, P_{ph,s}, P_{d,s}, \alpha_{ij}^{(k)}, y_s^c, P_{2,i}^{(k)}, Q_{2,i}^{(k)}) \geq 0 \quad s = 1, \dots, N_s \end{cases} \end{array} \right. \quad (31)$$

式中: $g_1 = 0/g_2 \geq 0$ 为子问题基态电网运行的交流潮流约束; $h_1 = 0/h_2 \geq 0$ 为子问题故障后电网运行

交流潮流约束。

3 算例分析

本节利用改进的IEEE-24节点以及IEEE-118节点进行仿真验证,并将本文所提方法与传统鲁棒优化方法进行对比,论证本文所提模型和方法的有效性。

3.1 基于改进IEEE-24节点系统的验证分析

本文首先基于改进的IEEE-24节点系统进行仿真验证,改进后的拓扑结构如图4所示。

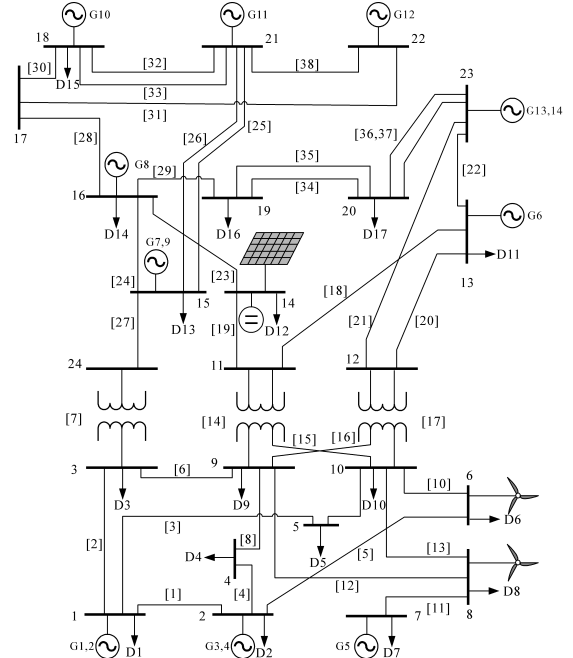


图4 IEEE-24节点系统拓扑结构图

Fig.4 IEEE-24 node system topology diagram

3.1.1 算例介绍

考虑高比例新能源接入电网,在6号、8号节点增设两台额定功率为300 MW的风电机组,在19号节点增设一台额定功率为200 MW的光伏电站。在本算例中,利用变分自编码器模型生成风电数据,利用标准化流模型生成光伏和负荷数据。将生成的数据做平均值处理后,得到风光荷曲线。根据IEEE-24节点系统内负荷和风光额定功率以及相应的风光荷曲线,可以计算出规划系统运行的24 h运行条件。根据生成的24个风光荷场景进行鲁棒优化规划。重要线路开断会造成电网潮流越限,分析拓扑结构图可知,火电机组和风电机组外送相关线路的开断造成潮流越限几率较大,如线路[5]、线路[10]、线路[11]、线路[12]、线路[13],这说明算例所给系统电网发电侧的输电资源不足,需要扩建相关线路。

3.1.2 改进 IEEE-24 节点系统规划结果分析

本算例以建线成本最小为目标函数,利用 C&CG 算法对鲁棒规划模型进行求解,最终计算结果显示,该算例结构拓扑图需扩建六条线路,如图 5 虚线所示,这样才能在建线成本最小的条件下满足电网在 24 h 内任意场景下,任意线路出现故障后仍能保持线路潮流不超限。根据计算结果,规划线路建设所需总成本约 19 054.9 万元。算例模型计算结果与前文分析基本吻合。

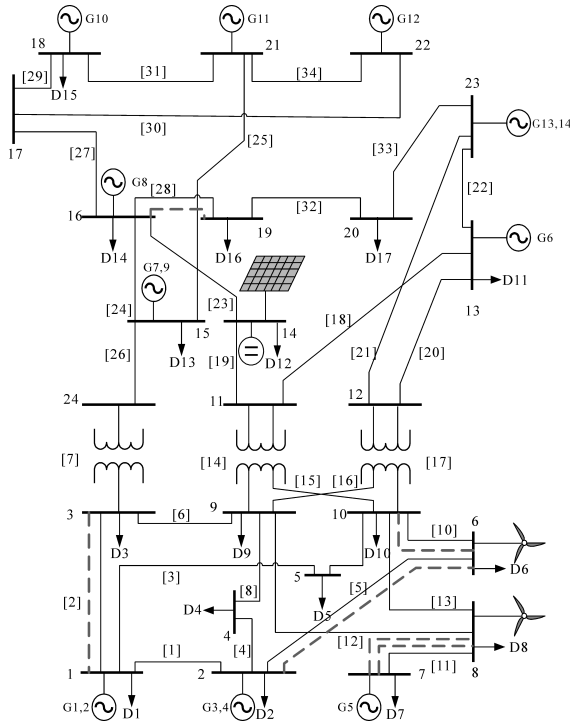


图 5 IEEE-24 节点系统规划方案新建线路示意图

Fig.5 Schematic diagram of the new line of the IEEE-24 node system planning scheme

另外,在规划结果中可计算得到全网线路年损耗为 405 325.2 MW·h,增加电网运行成本约为 15 037.6 万元。若在目标函数中不考虑线损,仅考虑煤耗成本,计算此时年损耗为 446 902.4 MW·h,增加电网运行成本约 16 580.1 万元。对比可知本文所提模型可将系统内线损成本降低约 9.3%,可节约成本约 1 542.5 万元。

3.1.3 本文方法与传统鲁棒优化对比

传统鲁棒优化规划模型采用极限场景集进行计算,相应风光荷极限场景集如表 1 所示。

经计算,在传统鲁棒优化模型下,得到电网规划成本约 22 142.7 万元,对比可知,本文模型的规划成本可节省约 3 087.8 万元,占原规划成本的 13.9%,本文所提模型更具经济性。同时,传统鲁棒优化模型计算时间为 2 073 s,而本文所提的利

用风光荷场景集的鲁棒规划模型对 IEEE-24 节点系统进行规划时,计算时间仅为 549 s,在计算速度方面,本文所提模型将计算速度提高了约 3.77 倍。

表 1 传统鲁棒模型中的极限场景集

Tab.1 A set of extreme scenes in a traditional robust model

场景数	风电场 1/ MW	风电场 2/ MW	光伏电站/ WM	负荷比例
1	300	300	200	0.2
2	300	50	200	0.2
3	50	300	200	0.2
4	50	50	200	0.2
5	300	300	0	0.2
6	300	50	0	0.2
7	50	300	0	0.2
8	50	50	0	0.2
9	300	300	200	0.6
10	300	50	200	0.6
11	50	300	200	0.6
12	50	50	200	0.6
13	300	300	0	0.6
14	300	50	0	0.6
15	50	300	0	0.6
16	50	50	0	0.6

3.2 基于改进 IEEE-118 节点系统的验证分析

本小节基于改进 IEEE-118 节点系统进行仿真验证,改进的 IEEE-118 节点系统的拓扑结构如图 6 所示。

3.2.1 算例介绍

考虑高比例新能源接入电网,分别在 10, 27, 71 节点设置风电场,在 19 节点设置一个光伏电站。

3.2.2 改进 IEEE-118 节点系统规划结果分析

按照本文所提的计及线损的电网规划方案,可得扩建方案如表 2 所示。经计算,所需线路扩建成本约为 12 886.9 万元。

3.2.3 本模型与传统鲁棒优化对比

由于所提方法可能不满足所有的极限场景,因此在算例中选用负荷为峰值且风光出力均为 0 的极限场景,使用本文所提模型计算可得规划总成本约 24 507.5 万元,而当使用极限场景集进行传统鲁棒优化时,所需规划成本约 28 259 万元,本模型的规划成本可节省约 3 751.5 万元,占原规划成本的 15.3%,本文所提模型更具经济性。同时传统鲁棒优化模型计算时间为 28 946 s,而本文所提的利用风光荷场景集的鲁棒规划模型对 IEEE-118 节点系统进行规划时,计算时间仅为 7 551 s,在计算速度方面,本文所提模型将计算速度提高了约 3.83 倍。

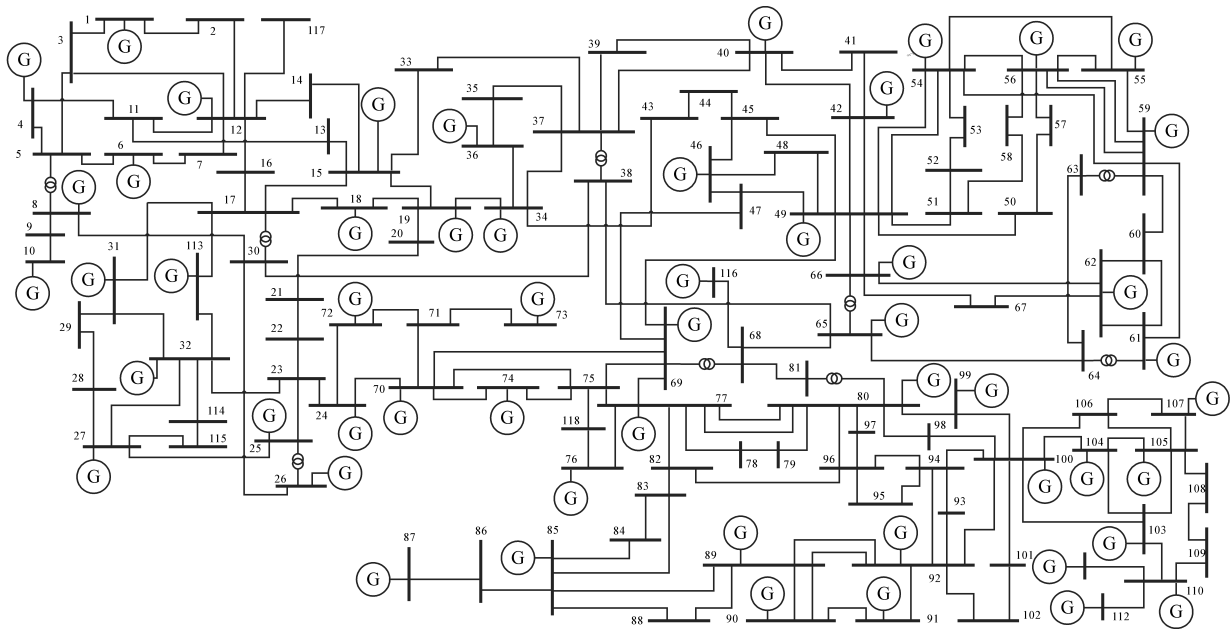


图6 IEEE-118节点系统接线图

Fig.6 IEEE-118 node system wiring diagram

表2 IEEE-118节点系统扩建线路表

Tab.2 IEEE-118 node system expansion line table

线路编号	首末端节点	增加线路数
1	1—2	1
12	8—9	1
14	9—10	1
18	12—117	1
66	42—49	1
79	49—66	1
93	56—59	1
114	69—77	1
118	71—73	1
124	77—78	1
125	77—80	1
144	89—90	1
145	89—92	1

根据对比可知,传统鲁棒优化计算所使用的规划场景较为保守,即按照风光出力的最大值和最小值进行极限场景集的构建,但在日常运行中,该极限场景情况难以出现,因此传统鲁棒优化计算存在一定的缺点,由此计算得到的电网规划经济性较差。

4 结论

本文提出一种同时考虑线损和源荷不确定性的输电线路扩展鲁棒规划模型,以全网建线成本最小为目标函数,并考虑各典型场景下 $N-1$ 预想故障约束。对所提混合整数二阶锥规划模型,采用C&CG算法进行分解求解。通过改进的

IEEE-24节点和IEEE-118节点系统进行验证,得到如下结论:

相比传统的基于直流潮流约束的输电网扩展规划模型,本文所提的基于交流潮流约束的输电网扩展规划模型计及了输电网线损,计算偏差更小,能得到安全性、经济性更高的规划方案;相比考虑极限场景的传统鲁棒规划方法,本文所提模型采用典型场景集作为运行条件,可以兼顾电网规划方案的经济性和可靠性。

参考文献

- [1] 张衡,程浩忠,曾平良,等.基于随机优化理论的输电网规划研究综述[J].电网技术,2017,41(10):3121-3129.
ZHANG Heng, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Overview of transmission network expansion planning based on stochastic optimization[J]. Power System Technology, 2017, 41(10):3121-3129.
- [2] 袁杨,张衡,程浩忠,等.发输电系统鲁棒优化规划研究综述与展望[J].电力自动化设备,2022,42(1):10-19,85.
YUAN Yang, ZHANG Heng, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect of robust optimization and planning research on generation and transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1):10-19, 85.
- [3] 付蓉,魏萍,万秋兰,等.市场环境基于最优潮流的输电网规划[J].电力系统自动化,2005,29(16):42-47.
FU Rong, WEI Ping, WAN Qiulan, et al. Optimal power flow based transmission expansion under marker environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16):42-47.
- [4] 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, 40(1): 30-38.
- CHEN Dian, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Transmission expansion planning model based on effective transmission cost [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 30-38.
- [5] 邓俊, 韦化, 黎静华, 等. 一种含四类0-1变量的机组组合混合整数线性规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2770-2778.
- DENG Jun, WEI Hua, LI Jinghua, et al. A mixed-integer linear programming model using four sets of binary variables for the unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2770-2778.
- [6] KRISHNAN V, HO J, HOBBS B F, et al. Co-optimization of electricity transmission and generation resources for planning and policy analysis: review of concepts and modeling approaches[J]. Energy Systems, 2016, 7(2): 297-332.
- [7] 邓媛, 魏国旺, 谢振. 主动配电网规划中的负荷预测与发电预测[J]. 电气传动自动化, 2020, 42(4): 37-39.
- DENG Yuan, WEI Guowang, XIE Zhen. Load forecasting and generation forecasting in active distribution network planning [J]. Electric Drive Automation, 2020, 42(4): 37-39.
- [8] 张焰. 电网规划中的可靠性成本-效益分析研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 33-36.
- ZHANG Yan. Research on cost-benefit analysis of electric power network reliability planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15): 33-36.
- [9] 程浩忠, 高赐威, 马则良, 等. 多目标电网规划的分层最优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 11-16.
- CHENG Haozhong, GAO Ciwei, MA Zeliang, et al. The lexicographically stratified method for multi-object optimal electric power network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 11-16.
- [10] 韦钢, 吴伟力, 刘佳, 等. 基于SE-DEA模型的电网规划方案综合决策体系[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 12-16, 27.
- WEI Gang, WU Weili, LIU Jia, et al. Comprehensive judgment for power system planning alternatives based on SE-DEA model [J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 12-16, 27.
- [11] 肖峻, 崔艳妍, 王建民, 等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 36-40.
- XIAO Jun, CUI Yanyan, WANG Jianmin, et al. A hierarchical performance assessment method on the distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 36-40.
- [12] 张长行. 可再生能源并网的电网线损计算与分析[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- ZHANG Changxing. Network loss calculation and analysis of power grid contains renewable energy[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [13] 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.
- [14] 陈瑞捷, 鲁宗相, 乔颖. 基于多场景模糊集和改进二阶锥方法的配电网优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4621-4629.
- CHEN Ruijie, LU Zongxiang, QIAO Ying. Optimal dispatch based on multi-scene ambiguity set and modified second-order cone algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4621-4629.
- [15] ABDELOUADOUD S Y, GIRARD R, NEIRAC F, et al. Optimal power flow of a distribution system based on increasingly tight cutting planes added to a second order cone relaxation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 69(Jul.): 9-17.
- [16] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. On polyhedral approximations of the second-order cone[J]. Mathematics of Operations Research, 2001, 26(2): 193-205.
- [17] ROH J H, SHAHIDEHPOUR M, LEI W. Market-based generation and transmission planning with uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1587-1598.
- [18] 丁涛, 李澄, 胡源, 等. 考虑非预期条件的电力系统多阶段随机规划建模理论与方法[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3566-3572.
- DING Tao, LI Cheng, HU Yuan, et al. Multi-stage stochastic programming for power system planning considering nonanticipative constraints[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3566-3572.
- [19] CONEJO A J. Correlated wind-power production and electric load scenarios for investment decisions[J]. Applied energy, 2013, 101(Jan.): 475-482.
- [20] ZHANG Yumin, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Adaptive robust unit commitment considering distributional uncertainty [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 104(Jan.): 635-644.
- [21] 宫成, 宋靓云, 王卫, 等. 鲁棒优化在电力系统机组组合中的应用综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4687-4695.
- GONG Cheng, SONG Liangyun, WANG Wei, et al. An overview of robust optimization used for power system unit commitment[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4687-4695.
- [22] 赵亮. 含新能源电力系统输电鲁棒优化规划方法及其应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- ZHAO Liang. Application of robust optimization for transmission network expansion planning with renewable energy resources integrated[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [23] 孙可, 张全明, 王蕾, 等. 考虑安全裕度的微电网两阶段鲁棒规划[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4617-4625.
- SUN Ke, ZHANG Quanming, WANG Lei, et al. Two-stage robust planning for microgrid considering security margin[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4617-4625.
- [24] MINGUEZ R, GARCIA-BERTRAND R, ARROYO J M, et al. On the solution of large-scale robust transmission network ex-

- pansion planning under uncertain demand and generation capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1242-1251.
- [25] WANG Siyuan, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Robust co-planning of energy storage and transmission line with mixed integer recourse[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 2019, 34(6): 4728-4738.
- [26] 马跃, 孟润泉, 李婷婷. 考虑柔性负荷和阶梯式碳交易的微电网鲁棒优化调度[J]. 现代电力, 2024, 41(2): 258-268.
MA Yue, MENG Runquan, LI Tingting. Robust optimal dispatch of microgrid considering flexible loads and step carbon trading[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(2): 258-268.
- [27] 黄海. 基于概率盒的考虑配电网源荷双侧不确定性多场景鲁棒优化调度方法[J]. 供用电, 2020, 37(11): 48-55.
HUANG Hai. A multi-scenario robust optimal scheduling method of distribution network considering source-side and load-side uncertainty based on the probability-box[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(11): 48-55.
- [28] KINGMA D P, WELLING M. Auto-encoding variational bayes [EB/OL]. arXiv: 1312.6114[2025-01-25]. <https://arxiv.org/abs/1312.6114>.
- [29] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial networks[J]. Communications of the ACM, 2020, 63(11): 139-144.
- [30] GONG L, ZHOU Y. A review: generative adversarial networks [C]//2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Piscataway: IEEE, 2019: 505-510.
- [31] PRENGER R, VALLE R, CATANZARO B. Waveglow: a flow-based generative network for speech synthesis[C]//2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Piscataway: IEEE, 2019: 3617-3621.
- [32] 赵博石, 胡泽春, 宋永华. 考虑 $N-1$ 安全约束的含可再生能源输电网络结构鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 16-24.
ZHAO Boshi, HU Zechun, SONG Yonghua. Robust optimization of transmission topology with renewable energy sources considering $N-1$ security constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 16-24.
- [33] 翟鹤峰, 赵利刚, 戴仲覆, 等. 计及 $N-k$ 网络安全约束的二阶段鲁棒机组组合[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 75-85.
ZHAI Hefeng, ZHAO Ligang, DAI Zhongfu, et al. Two-stage robust unit commitment considering $N-k$ network security constraints[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 75-85.
- [34] 舒康安. 考虑天然气动态过程的气-电联合系统运行与价格机制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
SHU Kang'an. Operation and pricing mechanism research for the integrated power and gas systems considering dynamic gas flow[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [35] 唐君毅, 董雪涛, 秦艳辉. 基于两阶段鲁棒优化的电力系统运行灵活性容量评估模型[J]. 电气传动, 2023, 53(9): 56-62.
TANG Junyi, DONG Xuetao, QIN Yanhui. Power system operation flexibility capacity evaluation model based on two-stage robust optimization[J]. Electric Drive, 2023, 53(9): 56-62.
- [36] ZENG B, ZHAO L. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method[J]. Operations Research Letters: A Journal of the Operations Research Society of America, 2013, 41(5): 457-461.

收稿日期: 2025-01-25

修改稿日期: 2025-03-24