

考虑可再生能源出力概率模型和预测负荷区间模型的 输电网规划方法

张立波¹, 高骞², 周勤勇¹, 韩奕¹, 申洪³, 贺庆³

(1. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192;
2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省 南京市 210000; 3. 全球能源互联网集团有限公司, 北京市 西城区 100031)

Transmission Network Expansion Planning Considering Probabilistic Model of Renewable Power and Interval Model of Predicted Load

ZHANG Libo¹, GAO Qian², ZHOU Qinyong¹, HAN Yi¹, SHEN Hong³, HE Qing³

(1. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute),
Haidian District, Beijing 100192, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu Province, China;
3. Global Energy Interconnection Group Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: The same type of uncertainty model is usually taken into account in the existing transmission network expansion planning (TNEP) methods considering uncertainties. But in the process of TNEP, mathematical characteristic of uncertain factors may be different. In order to solve this problem, a TNEP method considering probabilistic model of renewable energy and interval model of predicted load is put forward. Firstly, an expanded stochastic chance constrained programming model considering interval number is presented. Then, a TNEP model is constructed, which considers probabilistic model and interval model of uncertainties. This model minimizes the investment cost and subjects to the expanded stochastic chance constraint of branch power. The particle swarm optimization method is employed to optimize the planning schemes and the hybrid quasi Monte Carlo simulation and improved branch-and-bound method is adopted to check the security of the given planning schemes. The case analyses on the modified IEEE RTS-24 bus system and an actual power grid verify the effectiveness and validity of the proposed planning method.

Keywords: transmission system expansion planning; interval model; predicted load; probabilistic model; renewable energy

摘要: 针对电网规划过程中不确定因素的数学模型类型不

一致的情况, 提出了考虑可再生能源出力概率模型和预测负荷区间模型的输电网规划方法。首先给出了考虑区间数的扩展随机机会约束规划模型; 然后建立了以投资成本最小为目标函数, 以支路潮流的扩展随机机会测度作为约束条件, 同时考虑随机不确定因素和区间不确定因素的输电网规划模型; 采用粒子群优化算法优化规划方案, 采用准蒙特卡洛模拟和改进的分支定界相结合的方法对规划方案进行安全校验。IEEE RTS-24节点系统和某实际电网的案例结果证明了所提算法的有效性和正确性。

关键词: 输电网规划; 区间模型; 预测负荷; 概率模型; 可再生能源

0 引言

随着全球环境的不断恶化以及化石能源储量的逐步降低, 近年来风能和太阳能发电发展迅速。2001~2017年, 全球风电、光伏发电装机容量年均增长率分别达到22.4%^[1]、40.2%^[2], 非水可再生能源发电量占比从1.8%提高至8.4%^[3]。根据相关研究成果, 预计到2050年, 全球风能和太阳能发电装机占比可达53%~66%^[4]; 中国的风能和太阳能发电装机占比可达68%, 发电量占比达到48%^[5]。高比例的风能和太阳能发电并网将给电力系统带来高度不确定性, 其中集中式的风能和光伏发电将给电源侧带来间歇性和波动性, 分布式的风能和光伏发电将使负荷侧更加不可预

基金项目: 全球能源互联网集团有限公司科技项目(GEIC-E(2017) 028)。

Science and Technology Foundation of Global Energy Interconnection Group Co., Ltd. (GEIC-E(2017) 028).

测。高度的不确定性使电力系统的运行和规划面临十分严峻的挑战。

虽然近几年中国的风、光限电率和限电量呈下降趋势，但是部分省区的风、光限电率依然高企，根据国家能源局网站公布的数据，2018年上半年内蒙古、新疆和甘肃弃风率超过15%，新疆和甘肃弃光率超过10%。网架薄弱是引起弃风、弃光现象的重要原因之一。因此，在输电网规划过程中要充分考虑风能和太阳能发电，保证风、光发电的充分利用。对考虑风、光发电的输电网规划已有一定的研究成果，文献[6-9]提出了考虑可再生能源出力概率模型的输电网规划方法；文献[10-11]提出了考虑可再生能源出力区间模型的输电网鲁棒规划方法；文献[12]提出了考虑风电场出力上下限和期望值的输电网鲁棒规划方法，同时涵盖了风电场出力的区间特性和概率特性。上述规划方法中均将不确定因素以同一种不确定性数学模型描述，但是在实际电网规划过程中，可能出现由于基础信息获取不全等原因，不确定因素分别采用不同的不确定性模型表征，例如可再生能源出力采用概率模型表征的同时，预测负荷采用区间模型表征，或者可再生能源出力采用区间模型表征的同时，预测负荷采用模糊模型表征等。已有方法不能满足上述规划信息下的规划要求。

本文基于扩展的随机机会约束规划，提出了同时考虑可再生能源出力概率模型和预测负荷区间模型的输电网规划方法，以解决多种不确定性数学模型同时存在的含可再生能源输电网规划问题。

1 不确定因素建模

1.1 预测负荷的区间模型

区间不确定模型建模简单，只需已知变量的范围即可。在电力系统规划过程中，负荷预测人员通常会给出负荷预测的高、低方案，因此可以采用这2种方案来建立负荷预测的区间模型，如式(1)所示。根据该模型，可获得支路潮流的上下限，有助于分析预测负荷的不确定性对规划方案安全性的影响。

$$\tilde{d} = [\underline{d}, \bar{d}] \quad (1)$$

式中： \underline{d} 和 \bar{d} 分别为预测负荷的低方案和高方案。

1.2 可再生能源出力的概率模型

可再生能源出力的概率建模从以下2个方面分别进行阐述：

1) 对于投运时间较长、已有大量历史运行数据的可再生能源场站，其概率模型可采用由大量运行数据估计得到的概率密度函数(probability density function, PDF)来表征，计算PDF的方法包括核密度估计^[13]、Johnson分布体系^[14]以及多项式正态变换^[15-16]等方法。考虑算法的精度和实现方便性，本文采用九阶多项式正态变换(ninth-order polynomial normal transformation, NPNT)计算可再生能源出力的概率密度函数。

2) 对于投运时间较短或尚未投运的可再生能源场站，首先通过历史资源(风速、光照强度)数据获得资源的概率模型，再根据历史资源数据与出力的关系模型得出力的概率模型。对于这种情况，本文首先采用NPNT获得风速和光照强度的概率模型，再分别采用如式(2)或式(3)所示的风速—出力模型和光照强度—出力模型^[17]获得可再生能源出力的概率模型。

$$g_w = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ 或 } v > v_{out} \\ \bar{g}_w \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_r^3 - v_{in}^3}, & v_{in} < v < v_r \\ -\bar{g}_w, & v_r < v < v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

式中： \bar{g}_w 表示风电场装机容量； v 表示风速； v_{in} 、 v_{out} 和 v_r 分别表示风机的切入风速、切出风速和额定风速。

$$P_p = \begin{cases} \bar{P}_p \frac{I}{I_r} & I \leq I_r \\ \bar{P}_p & I > I_r \end{cases} \quad (3)$$

式中： \bar{P}_p 表示光伏电站装机容量； I 表示光照强度； I_r 表示额定光照强度。

2 考虑可再生能源出力概率模型和预测负荷区间模型的输电网规划模型

2.1 扩展随机机会约束规划

假设 x 是一个决策向量， ξ 是一个随机向量， $f(x, \xi)$ 是目标函数， $g_j(x, \xi)$ ($j=1, 2, \dots, p$)是随机约束函数。由于随机约束 $g_j(x, \xi) \leq 0$ ($j=1, 2, \dots, p$)没有给出一个确定的可行集，所以希望随机约束以一定的置信度 α 成立，得到式(4)所示的机会约束规划模型。

$$\begin{aligned} \min & f(x, \xi) \\ \text{s.t.} & \Pr\{g_j(x, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, p\} \geq \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

当且仅当事件 $\{\xi | g_j(x, \xi) \leq 0 (j=1, 2, \dots, p)\}$ 的概率

测度大于等于 α , \mathbf{x} 是可行的。

本文不仅考虑随机不确定因素,还考虑了区间不确定因素,因此本文将随机机会约束规划的标准模型进行扩展,建立了式(5)所示的规划模型。

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\zeta}, \boldsymbol{\zeta}) \\ \text{s.t.} \quad & \Pr\{g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\zeta}, \boldsymbol{\zeta}) \leq 0, j=1, \dots, p\} \geq \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

式中: \mathbf{x} 、 $\boldsymbol{\zeta}$ 、 f 、 g_j 和 α 的含义与式(4)中的含义一致; $\boldsymbol{\zeta}$ 为区间参数向量。规划模型中约束条件表示无论 $\boldsymbol{\zeta}$ 取区间范围内任意值,随机机会约束条件均满足。

2.2 考虑可再生能源出力和预测负荷不确定性的输电网规划模型

输电网规划的目的是在保证规划方案安全性的前提下经济性达到最优。本文以投资成本最小化为目标、以不确定环境下支路潮流满足热稳定机会约束为安全约束条件,提出了考虑可再生能源出力概率模型和预测负荷区间模型的输电网规划模型,如式(6)~(13)所示。

$$\min \sum_{ij \in \Omega_L} c_{ij} n_{ij} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{B}\tilde{\boldsymbol{\theta}} - \tilde{\mathbf{g}} - \tilde{\mathbf{g}}_R = -\tilde{\mathbf{d}} \quad (7)$$

$$\tilde{f}_{ij} - \gamma_{ij}(n_{ij}^0 + n_{ij})(\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i - \tilde{\boldsymbol{\theta}}_j) = 0 \quad ij \in \Omega_L \quad (8)$$

$$\Pr\{|\tilde{f}_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{f}_{ij}\} \geq \alpha \quad ij \in \Omega_L \quad (9)$$

$$0 \leq \tilde{\mathbf{g}} \leq \bar{\mathbf{g}} \quad (10)$$

$$\text{Connectivity} \quad (11)$$

$$N-1 \quad (12)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad n_{ij} \text{是整数} \quad ij \in \Omega_L \quad (13)$$

式中: ij 表示连接节点 i 和节点 j 的支路; Ω_L 表示支路集合; c_{ij} 表示支路 ij 新增一条线路的投资成本; n_{ij} 表示支路 ij 新增线路数; \mathbf{B} 表示节点导纳矩阵的虚部; $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ 表示节点相角列向量; $\tilde{\mathbf{g}}$ 表示常规发电机出力列向量; $\tilde{\mathbf{g}}_R$ 表示可再生能源出力列向量; $\tilde{\mathbf{d}}$ 表示预测负荷列向量,其不确定性由1.1节所述的区间模型表征; \tilde{f}_{ij} 表示支路 ij 的潮流; γ_{ij} 表示支路 ij 的电抗; n_{ij}^0 表示支路 ij 原有线路数; \bar{f}_{ij} 表示支路 ij 单条线路的额定容量; α 表示支路潮流不越限的置信水平; $\bar{\mathbf{g}}$ 表示发电机出力上限列向量; \bar{n}_{ij} 表示支路 ij 新增线路数量的上限。

式(6)为目标函数,表示线路投资成本的最小化;式(7)表示节点功率平衡约束;式(8)表示支路潮流约束;式(9)表示支路潮流的扩展随机机会测度约束,物理意义为预测负荷在其区间内任意取

值,均可以满足支路潮流的随机机会测度值不小于 α ,体现了可再生能源出力的随机性以及预测负荷的区间特性对输电网规划方案的影响,通过调节置信水平 α ,可以实现规划方案经济性和安全性的协调, $\alpha=1$ 表示任意可再生能源出力和任意预测负荷的组合下线路潮流不越限,等价于预测负荷和可再生能源出力以区间模型表征的输电网鲁棒规划模型^[11];式(10)表示常规发电机组出力上下限约束;式(11)表示网络连通性约束;式(12)表示 $N-1$ 约束,包括了单一线路故障下的式(6)~(11);式(13)表示支路新增线路数量约束,并且支路新增数量变量限制为整数变量。

3 规划模型求解

3.1 规划方案安全校验

规划模型中同时含有随机不确定因素和区间不确定因素,考虑到基于Sobol序列的准蒙特卡洛模拟(quasi Monte Carlo simulation, QMCS)^[14]处理随机不确定因素的优越性以及改进分支定界法处理区间不确定因素的有效性,本文采用基于Sobol序列的QMCS嵌套改进分支定界法^[18]对规划方案的安全性进行校验。首先采用Sobol序列获得可再生能源出力的样本,对QMCS中任意一个可再生能源出力样本,采用改进分支定界法进行一次区间负荷下的弃可再生能源和切负荷计算,若弃可再生能源和切负荷量为零对应的样本数与总样本数之比大于等于预先规定的 α ,即认为机会约束成立。该方法具体流程如下:

1) 令样本计数器 $i=0$,系统安全状态计数器 $j=0$,Sobol序列的样本规模为 N 。通过Sobol序列发生器产生可再生能源出力样本向量 \mathbf{g}_R , $i++$ 。

2) 将 \mathbf{g}_R 代入如下的双层线性规划模型中,求模型最优解。若双层规划模型最优解大于0,认为当前条件下会出现支路潮流越限,且系统是不安全的;否则认为当前条件下系统是安全的, $j++$ 。

$$\max \quad \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{r} + \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{R} \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \quad \underline{\mathbf{d}} \leq \mathbf{d} \leq \bar{\mathbf{d}} \quad (15)$$

$$\min \quad \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{r} + \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{R} \quad (16)$$

$$\text{s.t.} \quad -\mathbf{B}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{g} + \mathbf{g}_R + \mathbf{r} = \mathbf{d} + \mathbf{R} \quad (17)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{B}_l \mathbf{A} \boldsymbol{\theta} \quad (18)$$

$$|\mathbf{f}| \leq \bar{\mathbf{f}} \quad (19)$$

$$\underline{\mathbf{g}} \leq \mathbf{g} \leq \bar{\mathbf{g}} \quad (20)$$

$$0 \leq r \leq d \quad (21)$$

$$0 \leq R \leq g_R \quad (22)$$

式中： e 表示所有元素均为1的列向量； r 表示切负荷列向量； R 表示切可再生能源出力列向量，其余变量与规划模型中代表的含义一致。

式(14)~(15)为上层规划模型，式(16)~(22)为下层规划模型，上层模型向下层模型传递负荷值，下层模型向上层模型返回最小弃可再生能源和切负荷值。式(14)为上层规划模型的目标函数，表示最大化切负荷与弃可再生能源出力之和；式(15)为上层模型的约束条件，表示预测负荷的区间上下限；式(16)为下层模型目标函数，表示最小化切负荷与弃可再生能源出力之和；式(17)~(22)为下层模型约束条件，分别表示节点功率平衡约束、支路潮流方程、支路潮流容量约束、发电机出力约束、节点切负荷量约束和节点切可再生能源出力约束。

上述模型为双层线型规划模型，根据双层线型规划定理可知，其最优解位于上下层约束形成的总约束域的极点上。对该模型分析可知，上层约束形成的可行域的极点为区间负荷的上下限，因此只需要将每个负荷的上下限分别代入到下层模型中，就可以得到该双层模型的最优解，但是该方法需要对下层规划模型优化 2^s （ s 表示负荷和可再生能源发电节点数）次，随着系统规模的增加，计算量以指数形式增长。文献[18]针对最小切负荷双层规划模型的上述特点，提出了改进分支定界法，仅需要对线性规划模型优化 $2(s+1)$ 次，随着系统规模的增加，计算量以线性形式增长。改进分支定界法的具体流程参见文献[18]。

3) 重复步骤1)和2)，直到对可再生能源出力完成规定次数的采样。若 $j/i \geq \alpha$ ，认为规划方案满足规划模型的约束条件，即满足式(9)的约束；否则，规划方案不满足约束条件。

3.2 粒子群优化算法

粒子群优化^[19] (particle swarm optimization, PSO)算法是基于种群的并行搜索算法，粒子根据现在的位置和速度以及其他粒子的位置向最优优点移动。粒子的位置和速度由以下公式进行更新：

$$V_i^{k+1} = \omega \cdot V_i^k + c_1 \cdot r_1 (Pb_i - X_i^k) + c_2 \cdot r_2 (Gb - X_i^k) \quad (23)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (24)$$

式中： V_i^k 和 X_i^k 分别是第 k 次迭代中第 i 个粒子的速度和

位置； ω 是惯性权重因子； c_1 和 c_2 是加速系数； r_1 和 r_2 是[0, 1]之间的随机数； Pb_i 和 Gb 分别为到目前为止的第 i 个粒子的个体最优解和粒子群体的最优解。

通常情况下，每一条输电通道中输电线路回数不超过4，取值范围较小，因此本文中粒子的速度仅可以取{-1, 0, 1}3个元素中的一个，即在相邻2次迭代过程中，每条输电通道内输电线路回数的变化不超过1。

3.3 基于PSO的规划模型求解流程

本文提出的规划模型采用粒子群优化算法、准蒙特卡洛模拟和改进的分支定界相结合的方法进行求解，具体流程如下：

1) 输入数据。

输入网架数据和算法数据，其中网架数据包括支路数据、节点区间负荷数据、节点发电数据等；算法数据包括种群大小 n 、最大迭代次数 N_{iter} 等。

2) 生成粒子的可行初始位置和初始速度。

随机产生粒子的初始速度和位置。采用深度优先算法对规划方案进行连通性校验，若满足连通性约束，则保留该方案；否则，放弃该方案，直到生成 n 个满足连通性约束的规划方案。

3) 规划方案的安全性校验。

根据3.1节的规划模型安全性校验方法对产生的规划方案进行“ N ”和“ $N-1$ ”情况下的安全性校验。

4) 计算规划方案适应度值。

规划方案的适应度值为两部分之和：式(6)所示的投资成本和违反式(9)所示的支路潮流机会约束的惩罚。每一个粒子作为初始个体最优解，并将初始最优解中适应度值最小的个体作为全局最优解。

5) 更新粒子速度和位置。

根据式(23)更新粒子的速度，采用式(24)更新粒子的位置。

6) 更新个体最优解和全局最优解。

如果 X_i^k 的适应度值小于 Pb 的适应度值，将 Pb 设置为 X_i^k ；否则， Pb 保持不变，将所有 Pb 中适应度值最小的个体作为 Gb 。

7) 迭代终止条件。

规划模型求解的迭代终止条件包括2个：①迭代次数达到了预先设定的最大值；②连续20次迭代的最优规划方案保持不变，上述2个条件同时达到则认为迭代终止，输出最优规划方法。

上述求解流程可以总结为图1所示的流程图。

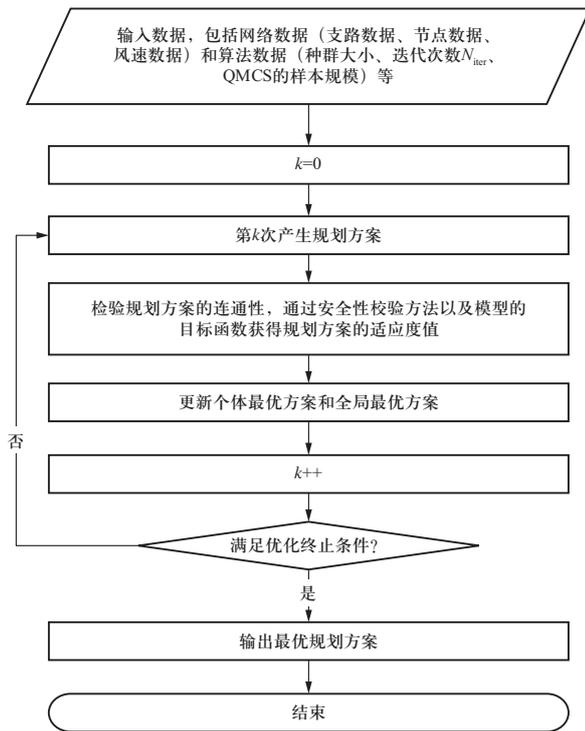


图1 规划模型的求解流程

Fig. 1 Process of solving the planning model

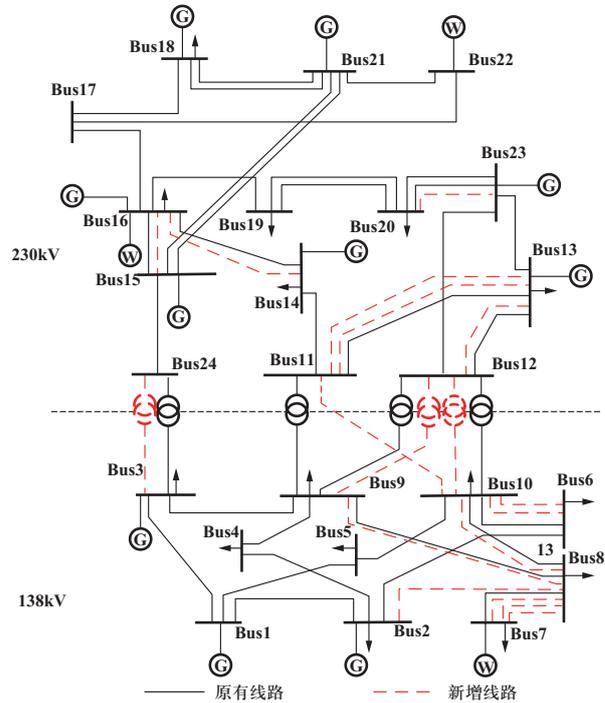


图2 IEEE RTS-24节点系统规划方案网架图

Fig. 2 Planning scheme of IEEE 24-bus system

4 算例分析

将提出的输电网规划方法分别应用于修改的IEEE RTS-24节点系统和中国某区域电网, 以验证本文所提规划方法的有效性和正确性。

4.1 修改的IEEE RTS-24节点系统

修改的IEEE RTS-24节点系统^[20]如图2中实线所示。在该系统中, 共有34条现有输电走廊, 41条候选支路, 每条候选支路最多可添加3条支路。3座风电场分别接入节点7、节点16和节点22, 风电场容量分别为300、900 MW和900 MW, 风电场风速数据采用甘肃某风电场实测数据, 风速累积分布函数 $F(v)$ 的曲线如图3所示, 风电场中风机的切入风速、切出风速和额定风速分别为4、20 m/s和11.1 m/s^[21]。预测负荷区间数据如表1所示, 常规发电机组数据和网架数据参见文献[22]。本测试算例中, PSO算法的种群规模为50, 迭代次数为100, QMCS的样本规模为100, 分别计算了支路潮流不越限的置信水平 α 为0.8、0.9和1的规划方案, 分别记为方案1、方案2和方案3, 同时给出了考虑预测负荷和可再生能源出力区间模型的输电网鲁棒规划^[11]方法得到的方案, 记为方案4。具体规划方案如表2所示, 其中方案2的示意图如图2所示。

表1 24节点预测负荷区间数据

Table 1 Predicted interval load of IEEE 24-bus system

节点编号	负荷区间上限	负荷区间下限
1	304.56	343.44
2	273.54	308.46
3	507.6	572.4
4	208.68	235.32
5	200.33	225.78
6	383.52	432.48
7	352.5	397.5
8	482.22	543.78
9	493.5	556.5
10	549.9	620.1
13	747.3	842.7
14	547.08	616.92
15	893.54	1008.06
16	282	318
18	939.06	1068.94
19	510.42	575.58
20	360.96	407.04

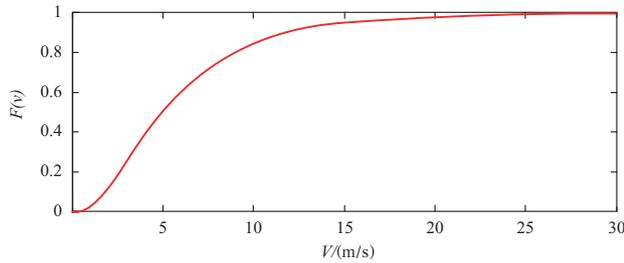


图3 风速累积分布曲线

Fig. 3 Cumulative distribution curve of wind speed

表2 24节点系统规划方案

Table 2 Planning schemes of IEEE 24-bus system

方案编号	规划前提	规划方案	投资成本/万元
1	$\alpha=0.8$	6-10(2), 7-8(3), 8-9, 8-10, 9-12, 10-11, 10-12, 11-13(2), 12-13, 15-16, 20-23, 2-8, 3-24	4557
2	$\alpha=0.9$	6-10(2), 7-8(3), 8-9, 8-10, 9-12, 10-11, 10-12, 11-13(2), 12-13, 14-16, 15-16, 20-23, 2-8, 3-24	4935
3	$\alpha=1$	1-5, 3-24, 6-10(2), 7-8(3), 8-9(2), 9-12, 10-11, 10-12, 12-13, 15-24, 16-17, 20-23, 2-8, 13-14(2)	5243
4	鲁棒规划	1-5, 3-24, 6-10(2), 7-8(3), 8-9(2), 9-12, 10-11, 10-12, 12-13, 15-24, 16-17, 20-23, 2-8, 13-14(2)	5243

通过对比方案1、方案2和方案3，可知随着支路潮流不越限置信水平的增加，规划方案的投资成本是增加的，这是由于置信水平的增加相当于提高了系统的安全性；潮流不越限置信水平每增加0.1，投资成本增加300万~400万元，占总投资成本的比例为0.06~0.08，这是由于该系统中可再生能源发电占比较低，对规划方案影响较小。方案3和方案4的规划结果是一致的，这是由于当支路潮流不越限的置信水平为1时，本文提出的同时考虑可再生能源出力概率模型和预测负荷区间模型的输电网规划模型等价于考虑可再生能源出力和预测负荷区间模型的输电网鲁棒规划。相比于输电网鲁棒规划模型，本文提出的模型可以灵活调节规划方案的安全性水平，以达到安全性和经济性的协调，避免规划方案过于保守。

为了说明风电场出力的分布对规划方案的影响，本文计算了1.2倍甘肃风电场实际风速（风电场装机容量不变、每台风机参数不变）下、潮流不越限的置信水平为0.9的规划方案，记为方案5，具体新增线路情况见表3。

表3 不同风速下规划方案的比较

Table 3 Comparison between planning schemes under different wind speeds

方案编号	风速	规划方案	投资成本/万元
2	实际风速	6-10(2), 7-8(3), 8-9, 8-10, 9-12, 10-11, 10-12, 11-13(2), 12-13, 14-16, 15-16, 20-23, 2-8, 3-24	4935
5	1.2倍实际风速	6-10(2), 7-8(3), 8-9, 8-10, 9-12, 10-11, 10-12, 11-13, 12-13, 14-16, 15-16, 15-24, 20-23, 2-8, 3-24	4977

通过对比表3中的方案2和方案5可以看出，风电场总体出力水平的提高，导致规划方案的投资成本增加。这说明本文提出的规划模型可以反映不同可再生能源出力的概率分布对输电网规划方案的影响。由于输电网鲁棒规划方案仅考虑可再生能源的出力区间，因此无法反映不同的可再生能源出力分布对规划方案的影响。

4.2 选取某实际区域电网验证

本算例选取了中国某区域电网中500 kV及以上电压等级网架，共有231个节点，总负荷约110 GW，总装机约126 GW。该系统500 kV及以上电压等级并没有风电场，为了分析风电场接入对规划方案的影响，在3个节点分别接入额定容量为3000 MW的风电场，风速数据和风机参数同4.1节。本算例中，PSO算法的种群规模为100，迭代次数为300，准蒙特卡洛模拟的样本规模为100，支路潮流不越限的置信水平 α 分别为0.95（方案6）和1（方案7），同时给出了考虑预测负荷区间模型和可再生能源出力区间模型的输电网鲁棒规划方法^[11]得到的规划方案（方案8），规划结果的比较如表4所示。

表4 某实际系统规划方案比较

Table 4 Comparison of the planning schemes of an actual power grid

比较内容	方案6	方案7	方案8
新建线路条数	184	187	187
架线走廊个数	137	139	139
投资成本/亿元	553.18	568.81	568.81

由表4可知，方案7的新增线路数和新增架线走廊个数大于方案6，进而方案7的投资成本也大于方案6，这是由于方案7支路潮流不越限的置信度要大于方案6，即方案7的安全性要大于方案6。方案7和方案6的

投资成本差别较小,原因有以下2点:①该规划电网中新增负荷节点较多,由于需要满足“ N ”和“ $N-1$ ”情况下的连通性约束,2个规划方案在大多数支路上的新增线路是一致的。②该实际系统中风力发电占总发电容量的比例较小,而支路潮流不越限概率的置信度衡量的是风电场出力的波动对输电网规划的影响,因此2个方案的投资成本相差不大。

通过对比方案7和方案8可知,两者的架线方案是一致的,因此投资成本也是一致的,由2.2节可知,当 $\alpha=1$ 时,本文提出的考虑预测负荷区间模型和可再生能源出力概率模型的规划模型等价于考虑预测负荷和可再生能源出力区间模型的输电网鲁棒规划模型。

通过该算例可知,本文提出的考虑预测负荷区间模型和可再生能源出力概率模型的规划方法可以应用于大规模系统的输电网规划工作中。

5 结论

本文在考虑预测负荷的区间模型和可再生能源出力的概率模型基础上,提出了融合区间不确定因素和随机不确定因素的输电网规划方法,通过24节点系统和某区域231节点系统的算例分析,得到了以下结论:

1) 相比于预测负荷和可再生能源出力均采用区间模型的输电网鲁棒规划模型,本文提出的规划模型可以通过支路潮流不越限置信水平的改变来灵活调节规划方案的经济性和安全性,避免了鲁棒规划方法的保守性;此外,本文提出的规划方法还可以反映可再生能源出力的概率分布对规划方案的影响。

2) 本文提出的规划方法针对的是考虑可再生能源出力概率模型和预测负荷区间模型的输电网规划,但是从规划方法来看,适用于融合任意随机不确定因素和区间不确定因素的输电网规划。

参考文献

[1] Global Wind Energy Council. Global wind report (annual market update 2017) [R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2018.

[2] SolarPower Europe. Global market outlook for solar power/2018-2022[R]. Brussels: SolarPower Europe, 2018.

[3] 英国石油公司. BP世界能源统计年鉴(2018) [R]. 伦敦: 英国石油公司, 2018.

[4] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网骨干网

架研究(2018) [R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2018.

[5] 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.
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(in Chinese).

[6] Moeini A M, Abbaspour A, Fotuhi F M. Incorporating large-scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning—part I: theory and algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1585-1593.

[7] Moeini A M, Abbaspour A, Fotuhi F M. Incorporating large-scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning—part II: case studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1594-601.

[8] 黄裕春, 杨甲甲, 文福拴, 等. 计及接纳间歇性电源能力的输电系统规划方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 28-35.
Huang Yuchun, Yang Jiajia, Wen Fushuan, et al. Transmission system planning considering capability of accommodating intermittent generation source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 28-35(in Chinese).

[9] Park H, Baldick R, Morton D P. A Stochastic transmission planning model with dependent load and wind forecasts[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3003-3011.

[10] Yu H, Chung C Y, Wong K P. Robust transmission network expansion planning method with Taguchi's orthogonal array testing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1573-1580.

[11] Jabr R A. Robust transmission network expansion planning with uncertain renewable generation and loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4558-4567.

[12] 陈雁, 文劲宇, 程时杰. 电网规划中考虑风电场影响的最小切负荷量研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 31(34): 20-27.
Chen Yan, Wen Jinyu, Cheng Shijie. Minimum load-curtailement in transmission network planning considering integrated wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 31(34): 20-27(in Chinese).

[13] Qin Z, Li W, Xiong X. Estimating wind speed probability distribution using kernel density method[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(12): 2139-2146.

[14] Zhang L, Cheng H, Zhang S, et al. Probabilistic power flow calculation using the Johnson system and Sobol's quasi-random numbers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 3050-3059.

[15] Chen X, Tung Y. Investigation of polynomial normal transform[J]. Structural Safety, 2003, 25(4): 423-445.

[16] Zou B, Xiao Q. Solving probabilistic optimal power flow

- problem using quasi Monte Carlo method and ninth-order polynomial normal transformation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 300-306.
- [17] Zhang S, Cheng H, Wan D, et al. Distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration[J]. Applied Energy, 2018, 228: 1921-1936.
- [18] Wu P, Cheng H, Xing J. The interval minimum load cutting problem in the process of transmission expansion planning considering uncertainty in demand[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1497-1506.
- [19] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks. New York: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [20] Subcommittee P M. IEEE Reliability Test System[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.
- [21] 秦志龙, 李文沅, 熊小伏. 含具有风速相关性风电场的发输电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 27-33.
Qin Zhilong, Li Wenyuan, Xiong Xiaofu. Reliability assessment of composite generation and transmission systems with wind farms considering wind speed correlations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 27-33(in Chinese).
- [22] 陈雁. 含大规模风电场电力系统的运行与规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
Chen Yan. Study on the operation and planning of power system with large-scale wind farms[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

收稿日期：2018-09-03；修回日期：2018-11-02。

作者简介：



张立波

张立波（1988），男，博士，工程师，主要研究方向为电力系统规划与安全稳定分析，E-mail: zhanglibo@epri.sgcc.com.cn。

高骞（1980），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为电网工程设计和电网规划，E-mail: gaoqian_an_1980@163.com。

周勤勇（1977），男，博士，教授级高级工程师，主要研究方向为电力系统规划与安全稳定分析，E-mail: qyzhou@epri.sgcc.com.cn。

（责任编辑 赵杨）