

DOI: 10.7667/PSPC180491

## 考虑约束集混合筛选的预防安全约束鲁棒最优潮流

许超<sup>1</sup>, 陈昊<sup>2</sup>, 屠秉慧<sup>1</sup>

(1. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 随着大规模清洁能源接入电网, 其出力具有间歇性和随机性, 对电力系统实时经济调度产生较大影响。提出了基于约束集混合筛选的预防安全约束鲁棒最优潮流计算方法, 建立了仿射可调鲁棒优化模型。模型中考虑了预想事故的预防安全约束, 采用基于约束集混合筛选的方法降低规模。通过算例验证了所提出方法对考虑不确定性的鲁棒经济调度的适用性。

**关键词:** 预防安全约束; 鲁棒最优潮流; 仿射可调优化; 约束集筛选

### Preventive security constraint robust optimal power flow considering mixed constraints filtering

XU Chao<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>, TU Binghui<sup>1</sup>

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** With large scale clean energy integrated into power grid, the intermittency and randomness of output power exert obvious influences on real time economic dispatch. This paper proposes preventive security constraint robust optimal power flow method considering mixed constraints filtering. In this method, an affine adjustable robust optimal power flow model is proposed and the preventive security constraints are also considered. In the solution procedure, mixed constraints filtering technique is adopted to reduce problem scale. Several tests on different systems are conducted to prove the effectiveness in real time economic dispatch considering uncertainty.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507031) and Science and Technology Project of Jiangsu Electric Power Company (No. J2018064 and No. J2018069).

**Key words:** preventive security constraints; robust optimal power flow; affine adjustable optimization; constraints filtering

## 0 引言

当前风力和光伏电站广泛接入电网, 其出力的不确定性给系统调控运行带来挑战<sup>[1-5]</sup>。鲁棒最优潮流是鲁棒经济调度的基础, 是从鲁棒优化的角度考虑最优潮流问题<sup>[6]</sup>。鲁棒经济调度为含风力和光伏电站的电力系统经济调度提供了有效方案。

鲁棒经济调度已广泛出现于新能源并网运行的研究中。文献[7]提出了一种基于“鲁棒调度计划”+“鲁棒运行区域”的多时间尺度滚动调度模式, 应对大规模新能源并网下电力系统的多种随机因素。

文献[8]考虑了大量分布式能源接入主动配电系统, 采用基于场景的鲁棒优化方法构建了计及需求侧资源和快速启动机组的两阶段优化调度模型, 实现分布式可再生能源的消纳。文献[9]针对风电的预测距离运行点越近精度越高的特点, 结合随机优化和可调节鲁棒优化方法的优点, 提出了一种有需求响应参与随机和可调节鲁棒共同构成日前调度的风电消纳模型。模型通过确定最优转换时刻将随机优化和可调节鲁棒优化结合, 实现源荷互动。鲁棒实时经济调度研究领域, 文献[10]提出一种可以计及电网注入转移分布因子估计误差的电网实时鲁棒调度方法, 构建同时考虑节点注入功率扰动及估计误差的实时调度模型。文献[11]采用一种基于风电出力预测区间的调度模式来考虑风电出力的不确定性, 在

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51507031); 江苏省电力公司项目科技(J2018064, J2018069)

此基础上建立鲁棒优化调度模型, 考虑机组的自动发电控制响应来应对风电出力波动, 维持系统功率平衡。但是, 目前鲁棒经济调度的研究尚未考虑预想事故对于调度策略的影响, 即未考预防安全约束<sup>[12]</sup>对于调度结果的影响。

本文提出一种考虑约束集混合筛选的预防安全约束鲁棒最优潮流计算方法。计算模型中首先考虑了新能源机组不确定处理水平对调度策略的影响, 建立了仿射可调鲁棒优化模型。模型中考虑了预想事故, 建立了预防安全约束鲁棒模型。模型求解中, 采用了基于约束集混合筛选的方法降低预防安全约束鲁棒最优潮流模型的规模, 提升问题求解的可行性。最后, 通过多机系统在不同工况下的仿真, 验证了基于约束集混合筛选的预防安全约束鲁棒最优潮流计算方法的适用性和有效性。

## 1 仿射可调鲁棒最优潮流

电力系统实时经济调度与自动发电控制(AGC)紧密关联, 实时调度依据系统有功功率需求预测值将机组出力运行基点调整至合理值后, AGC 对预测功率与需求功率偏差造成的系统不平衡功率进行再次分配维持系统有功平衡。再分配时, 依据参与因子将不平衡量在 AGC 机组之间分配, 故 AGC 的矫正控制手段在实时调度中具有仿射函数关系。

依据功率再分配过程中的仿射关系, 仿射可调鲁棒最优潮流是应用于实时调度中的改进方案。首先优化基态运行点以平衡负荷预测值, 然后在出力调整的过程中引入发电参与因子平衡出力的预测偏差。以线性函数关系调整可调机组的出力, 响应负荷及不确定电源出力的预测偏差<sup>[13-14]</sup>。

仿射鲁棒最优潮流模型构建时: 不确定参数以不确定集的形式给出, 与传统鲁棒优化相同; 基态运行点(出力参考值)需在不确定变量观测到之前制定, 传统机组出力参考值作为控制指令首先下发。不确定量实现时, 根据预先设置的参与因子调整出力。控制变量中, 可调变量是不确定变量的仿射线性函数。

AGC 机组的补偿量与全网功率扰动量间仿射关系如式(1)。

$$\Delta P_i = \beta_i \sum_{j=1}^{N_d} \Delta d_j, \quad 0 \leq \beta_i \leq 1, \quad \sum \beta_i = 1 \quad (1)$$

式中:  $\Delta P_i$  为输出功率补偿量;  $\beta_i$  为参与因子;  $\Delta d_j$  为节点  $j$  处扰动量;  $N_d$  为系统节点总数。

考虑预想事故时, 认为特定的预想事故发生前

后网络拓扑结构的变化为确定性事件。因此本文在不确定性的分析建模时, 不考虑预想事故的不确定性信息, 仅考虑新能源机组出力的不确定性。将不确定出力用区间值表示如式(2)。以盒式不确定集表征含不确定性的出力水平。

$$P_j \in [P_j^f - P_j^e, P_j^f + P_j^e], \quad \forall j \in G_{cle} \quad (2)$$

式中:  $P_j^f$  表示清洁能源机组  $j$  的出力预测值;  $P_j^e$  表示出力的预测误差;  $G_{cle}$  为清洁能源机组集合。

传统机组出力包含两部分, 非可调部分对应于机组的计划出力  $P_i^{sch}$ , 在不确定量被观测到之前, 计划出力根据预测值制定; 可调部分为 AGC 出力  $\Delta P_i$ , 传统机组出力根据全系统不平衡量实施仿射调整, 保证了全网功率的实时平衡。

有功功率平衡等式中, 考虑 AGC 机组的调节效应, 有功偏差仅与新能源机组出力偏差相关, 用  $\varepsilon$  表示。

$$\varepsilon = \sum_{i \in G_{con}} P_i^{sch} + \sum_{j \in G_{cle}} P_j - \sum_{n \in N_d} D_n = \sum_{j \in G_{cle}} (P_j - P_j^f) \quad (3)$$

式中:  $G_{con}$  为传统机组集合;  $N_d$  为负荷节点集合;  $D_n$  为负荷值。传统机组出力修正为

$$P_i = P_i^{sch} + \beta_i \varepsilon \quad (4)$$

考虑到新能源机组出力的不确定性及预测误差<sup>[15]</sup>, 仿射可调鲁棒最优潮流的目标函数应为考虑预测误差的经济性指标。传统机组  $i$  的经济性函数为  $C_i = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$ ,  $i \in G_{con}$  及式(4), 则系统成本函数可表征为式(5)。

$$\sum_{i \in G_{con}} C_i = P_i^T A_{diag} P_i + b^T P_i + c^T e \quad (5)$$

式中:  $A_{diag}$  为对角线元素为  $a_i$  的矩阵;  $e$  为对应位置元素为 1 的向量。预测误差期望值  $E(\varepsilon) = 0$ , 系统成本函数的期望值为

$$E \left( \sum_{i \in G_{con}} C_i \right) = \sum_{i \in G_{con}} C_i (P_i^{sch}) + E \left\{ \varepsilon^T e \beta^T A_{diag} \beta e^T \varepsilon \right\} = \sum_{i \in G_{con}} C_i (P_i^{sch}) + \sum_{i \in G_{con}} a_i \beta_i^2 \left( \sum_{m=1}^{N_{cle}} \sum_{n=1}^{N_{cle}} A_{mn} \right) \quad (6)$$

式中:  $N_{cle}$  为系统中清洁能源机组数目;  $A_{mn}$  为清洁能源机组出力的协方差矩阵<sup>[16-17]</sup>, 可由历史数据统计计算获得<sup>[18-20]</sup>。

仿射可调鲁棒最优潮流模型如式(7)所示。

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{i \in G_{\text{con}}} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + a_i \beta_i^2 \left( \sum_{m=1}^{N_{\text{cle}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{cle}}} A_{mn} \right) \\
& \text{s.t.} \\
& \sum_{i \in G_{\text{con}}} P_i^{\text{sch}} + \sum_{j \in G_{\text{cle}}} P_j^f - \sum_{n \in N_d} D_n = 0 \\
& P_i^{\min} \leq P_i = P_i^{\text{sch}} + \beta_i \varepsilon \leq P_i^{\max} \\
& \underline{TL}_l \leq \sum_{i \in G_{\text{con}}} K_{li} \left( P_i^{\text{sch}} + \beta_i \sum_{j \in G_{\text{cle}}} (P_j - P_j^f) \right) + \\
& \sum_{j \in G_{\text{cle}}} K_{lj} P_j - \sum_{d \in N_d} K_{ld} D_d \leq \overline{TL}_l \\
& \forall P_j \in [P_j^f - P_j^e, P_j^f + P_j^e], \forall j \in G_{\text{cle}} \\
& 0 \leq \beta_i \leq 1, \sum \beta_i = 1
\end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $K_{li}$  表示传输断面  $l$  对传统机组  $i$  的出力的准稳态发电转移分布因子;  $K_{lj}$  表示传输断面  $l$  对清洁能源机组  $j$  的出力准稳态发电转移分布因子;  $\overline{TL}_l$  为线路传输断面功率正向最大值。

因约束含不确定量, 求解时式(8)需转化为对应的双层优化模型式(9)。

$$\begin{aligned}
& E_l(P_i^{\text{sch}}, P_j^f) + F_l P_j - \sum_{d \in N_d} K_{ld} D_d \geq \underline{TL}_l \\
& E_l(P_i^{\text{sch}}, P_j^f) + F_l P_j - \sum_{d \in N_d} K_{ld} D_d \leq \overline{TL}_l \\
& \forall P_j \in [P_j^f - P_j^e, P_j^f + P_j^e], \forall j \in G_{\text{cle}}
\end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $E_l$  为关于传统机组的计划出力和新能源机组预测出力的函数表达式;  $F_l$  为仅关于机组不确定机组出力的函数表达式。

$$\begin{aligned}
& \min \left\{ E_l(P_i^{\text{sch}}, P_j^f) + F_l P_j - \sum_{d \in N_d} K_{ld} D_d \right\} \geq \underline{TL}_l \\
& \max \left\{ E_l(P_i^{\text{sch}}, P_j^f) + F_l P_j - \sum_{d \in N_d} K_{ld} D_d \right\} \leq \overline{TL}_l \\
& \forall P_j \in [P_j^f - P_j^e, P_j^f + P_j^e], \forall j \in G_{\text{cle}}
\end{aligned} \quad (9)$$

求解此双层模型时, 需寻找对应最差场景。定义表征  $\mathbf{F}$  矩阵中元素下标集合  $I_i^+ = \{j | F_{i,j} \geq 0\}$  和  $I_i^- = \{j | F_{i,j} \leq 0\}$ , 式(9)双层模型的鲁棒对等式转化为显式约束式(10)。

$$\begin{aligned}
& E_l(P_i^{\text{sch}}, P_j^f) + \sum_{j \in I_i^+} F_{l,j} (P_j^f + P_j^e) + \dots \\
& \sum_{j \in I_i^+} F_{l,j} (P_j^f - P_j^e) - \sum_{d \in N_d} K_{ld} D_d \geq \underline{TL}_l \\
& E_l(P_i^{\text{sch}}, P_j^f) + \sum_{j \in I_i^-} F_{l,j} (P_j^f + P_j^e) + \dots \\
& \sum_{j \in I_i^-} F_{l,j} (P_j^f - P_j^e) - \sum_{d \in N_d} K_{ld} D_d \leq \overline{TL}_l
\end{aligned} \quad (10)$$

仿射可调鲁棒最优潮流模型为显式模型式(11)。

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{i \in G_{\text{con}}} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + a_i \beta_i^2 \left( \sum_{m=1}^{N_{\text{cle}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{cle}}} A_{mn} \right) \\
& \text{s.t.} \\
& \sum_{i \in G_{\text{con}}} P_i^{\text{sch}} + \sum_{j \in G_{\text{cle}}} P_j^f - \sum_{n \in N_d} D_n = 0 \\
& P_i^{\min} \leq P_i = P_i^{\text{sch}} + \beta_i \varepsilon \leq P_i^{\max} \\
& E_l(P_i^{\text{sch}}, P_j^f) + \sum_{j \in I_i^-} F_{l,j} (P_j^f + P_j^e) + \dots \\
& \sum_{j \in I_i^+} F_{l,j} (P_j^f - P_j^e) - \sum_{d \in N_d} K_{ld} D_d \geq \underline{TL}_l \\
& E_l(P_i^{\text{sch}}, P_j^f) + \sum_{j \in I_i^+} F_{l,j} (P_j^f + P_j^e) + \dots \\
& \sum_{j \in I_i^-} F_{l,j} (P_j^f - P_j^e) - \sum_{d \in N_d} K_{ld} D_d \leq \overline{TL}_l \\
& \forall P_j \in [P_j^f - P_j^e, P_j^f + P_j^e], \forall j \in G_{\text{cle}} \\
& 0 \leq \beta_i \leq 1, \sum \beta_i = 1
\end{aligned} \quad (11)$$

## 2 基于约束集混合筛选的预防安全约束最优潮流计算

预防安全约束模型与安全约束最优潮流区别在于模型中加入了预想事故的安全约束<sup>[21]</sup>。模型表征如式(12)所示。

$$\begin{aligned}
& \min_{x_0, \dots, x_c, U_0} f_0(x_0, U_0) \\
& \text{s.t.} \quad g_k(x_k, U_0) = 0, \quad k = 0, \dots, c \\
& \quad \quad h_k(x_k, U_0) \leq 0, \quad k = 0, \dots, c
\end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $f_0(x_0, U_0)$  为非故障状态下系统运行经济函数;  $g_k$  为系统为第  $k$  个结构下运行状态的等式约束;  $h_k$  为系统在第  $k$  个结构下运行的不等式约束;  $x_k$  为系统在第  $k$  个结构下运行的状态参数,  $U_0$  为系统在所设基态运行点处的控制变量;  $c$  为模型所考虑的预想事故数目。

考虑到存在风力及光伏电站时, 系统控制变量中机组出力水平将含有不确定性。预防约束最优潮流模型需变为含不确定性的最优潮流模型式(13)。

$$\begin{aligned}
& \min_{x_0, \dots, x_c, \tilde{U}_0} f_0(x_0, \tilde{U}_0) \\
& \text{s.t.} \quad g_k(x_k, \tilde{U}_0) = 0, \quad k = 0, \dots, c \\
& \quad \quad h_k(x_k, \tilde{U}_0) \leq 0, \quad k = 0, \dots, c
\end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $\tilde{U}_0$  为含不确定性的机组出力水平。将系统控制变量分为可调变量  $\tilde{u}_0$  和非可调变量  $\tilde{v}_0$  即  $\tilde{U}_0 = (\tilde{u}_0, \tilde{v}_0)$ 。可调控制变量  $\tilde{v}_0$  表示不确定参数的仿

射函数  $\tilde{v}_0 = w + W\xi$  时, 此模型即为预防安全约束仿射可调鲁棒最优潮流。

$$\begin{aligned} & \min_{x_0, \dots, x_c, \tilde{u}_0, \tilde{v}_0} f_0(x_0, \tilde{u}_0, \tilde{v}_0) \\ \text{s.t.} \quad & g_k(x_k, \tilde{u}_0, \tilde{v}_0) = 0, \quad k = 0, \dots, c \\ & h_k(x_k, \tilde{u}_0, \tilde{v}_0) \leq 0, \quad k = 0, \dots, c \end{aligned} \quad (14)$$

式中, 等式约束考虑基态及预想事故下系统的含不确定性的系统潮流约束。不等式约束既包含正常运行点物理约束, 亦包含预想事故下各控制变量设定在基态运行点时, 紧急运行状态下控制变量的物理约束。主要指系统中各机组出力约束及传输线功率约束。若  $c=0$ , 模型等同于传统安全约束最优潮流, 若  $c \geq 1$ , 模型规模为传统模型的  $c+1$  倍。易见, 考虑预想事故极大地增加了模型的规模。

预防安全约束最优潮流中, 若系统规模较大且预想事故较多, 则迭代计算消耗资源大。若不采用迭代校验的方法, 即约束全部加入优化模型中, 则除需考虑大量线路传输功率约束外, 传输功率灵敏度矩阵在每次预想事故模拟时均需重新更新, 需存储线路节点灵敏度矩阵, 并由此计算线路发电机灵敏度系数。预想事故集数目随系统规模增大, 模型需存取数量庞大的矩阵并加以处理, 带来巨大的计算负担, 极大影响了方法的可行性。

### 3 基于混合筛选方法的有效约束集甄别

由于规划中考虑了运行的安全裕度, 绝大多数的安全约束实际并未起作用。为降低计算消耗, 考虑优化计算前进行约束集筛选, 降低问题约束数目。

预防安全约束鲁棒最优潮流模型为含大量线性约束的模型, 对于大规模线性约束问题, 研究采用线性规划相关理论及方法甄别约束条件中约束的有效约束及冗余集合并处理。

预防安全约束鲁棒最优潮流形式如(15)所示。

$$\begin{aligned} & \min f(p) \\ \text{s.t.} \quad & Ap \leq b \\ & Cp = d \end{aligned} \quad (15)$$

式中:  $f(p)$  为关于传统机组出力  $p$  的经济性函数;  $Ap \leq b$  为系统传输线断面功率约束, 此约束由正常运行状态及预想事故下约束组成;  $Cp = d$  为系统功率平衡约束, 在正常运行及预想事故下均需满足。功率平衡约束由  $\sum_{i \in G_{\text{con}}} P_i^{\text{sch}} + \sum_{i \in G_{\text{cle}}} P_i^f - \sum_{i \in N_d} D_n = 0$  满足, 有功平衡仅需以正常运行时的有功平衡替代。总约束可缩减为一个等式约束和大量不等式约束构成。

将约束甄别与筛选分解为两部分进行, 一是筛选仅含有不等式约束的预想事故约束; 二是筛选含有

一个等式约束和不等式约束的正常运行状态约束集。

#### 3.1 预想事故状态下不等式约束筛选

引入以下各概念<sup>[22]</sup>: 考虑约束总数为  $J$  的集合中, 第  $j$  行约束。

伞式约束(Umbrella Constraint): 当且仅当移除此约束时, 原问题可行域发生变化, 则为伞式约束。

伞式约束集(Umbrella Set): 总约束集中包含原问题可行域的最少约束集合。

以上两定义表征约束中具有“包含”属性的约束, 仅需求解含有伞式约束集的优化问题, 即可得与原优化问题一致的可行域与最优解。

依定义可得识别的原理: 在以线性约束构建的可行空间中, 若某线性约束超平面上至少有一可行点满足其余所有约束, 则此对应约束为伞式约束。若无任意点能满足其余约束, 则此约束为非伞式约束。

由以上分析可得伞式约束集的基本判别方法: 构建一系列线性规划问题如式(16)。对于所有  $j=1, \dots, J$ , 若优化结果中第  $j$  个松弛变量  $\psi_j = 0$ , 则此对应的第  $j$  个线性约束为伞式约束。

$$\begin{aligned} & \min_{\omega, \psi \geq 0} \sum_{j=1}^J \psi_j \\ \text{s.t.} \quad & a_j^T \omega_j \leq b_j, \quad j' = 1, \dots, J \\ & a_j^T \omega_j + \psi_j \geq b_j \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $a_j^T$  为第  $j$  个约束的行向量的转置;  $b_j$  为右端向量中第  $j$  个元素。

由所设计的求松弛变量的模型: 需优化  $j$  个自由向量  $\omega_j$  值, 以寻找超平面上的点逐个满足每个约束。考虑到每一预想事故均有等量约束需要判断, 模型的规模依然过于庞大, 无法直接求解。研究模型的分解及预想事故的分类及合并以解决此问题。

求解某一约束对应松弛变量  $\psi_j$  时, 将优化模型分解为仅关于此约束  $j$  的线性规划子模型式(17)。对于某一预想事故下每个约束判别, 模型可独立求解。

$$\begin{aligned} & \min_{\omega, \psi_j \geq 0} \psi_j \\ \text{s.t.} \quad & a_j^T \omega_j \leq b_j, \quad j' = 1, \dots, J \\ & a_j^T \omega_j + \psi_j \geq b_j \end{aligned} \quad (17)$$

针对庞大预想事故数下约束集的筛选, 按照具体事故或线路身份进行分类。将线路潮流约束按照同一预想事故分在一个子集中进行判定, 或将不同预想事故下同一条线路约束划分为子集。子集的划分和判定基于如下引理<sup>[22]</sup>。

引理 1: 非伞式约束推论。若约束  $j \in \tilde{J}$  为非伞式约束, 且满足  $\tilde{J} \subseteq J$ , 则约束  $j$  不仅为优化问题

关于子集  $\tilde{J}$  的非伞式约束, 亦为优化问题关于全集  $J$  的非伞式约束。

伞式约束集的构建可按以下步骤进行: (1) 将全约束集按照选定的标准(同一线路或同一预想事故)分成各子集, 在每一细分约束子集中进行伞式约束判定。(2) 将所筛选出的伞式约束组合成新集合, 再次进行约束判定。(3) 重复以上过程直到约束集中约束数目不再减少。为控制约束筛选及判定流程循环次数, 可采用一次分区和合并的步骤进行处理。

### 3.2 正常运行状态下考虑等式约束的筛选

由于(16)中, 约束条件均为不等式约束, 无法考虑等式约束。预防安全约束鲁棒最优潮流模型中, 系统有功平衡约束条件采用正常工况下平衡约束, 因此约束集中仅含一个等式约束。可将等式约束分至正常运行工况对应的约束集进行筛选<sup>[23]</sup>。

考虑以下线性规划问题(18), 式中  $a_{j,i}$  为模型(15)中约束矩阵  $A$  的第  $j$  行的第  $i$  个元素;  $A^{-\{j\}}$  表示去掉第  $j$  行约束后的矩阵表达式;  $b^{-\{j\}}$  表示右端向量  $b$  去掉第  $j$  个元素所剩向量;  $p_i$  为所需优化机组出力  $n$  维向量  $p$  中第  $i$  个元素。

$$\begin{aligned} \max_p \quad & \sum_{i=1}^n a_{j,i} p_i \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^n p_i = D \\ & A^{-\{j\}} p \leq b^{-\{j\}} \\ & 0 \leq p_i \leq P_i^{\max}, i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (18)$$

若优化函数值  $\max_p \sum_{i=1}^n a_{j,i} p_i \leq b_j$ , 则原问题中第  $j$  个约束  $A_j p \leq b_j$  甄别为非伞式约束, 因为此约束极值小于向量在方向  $j$  的边界值。考虑式(18)中不等约束依然较多, 模型求解仍困难, 故将此模型松弛为式(19)所示的松弛模型<sup>[24]</sup>。

$$\begin{aligned} \max_p \quad & \sum_{i=1}^n a_{j,i} p_i \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^n p_i = D \\ & 0 \leq p_i \leq P_i^{\max}, i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)中, 等式约束为严格约束, 采用如下算法求解目标函数值。

设  $i_1, i_2, \dots, i_n$  是使约束中系数满足条件  $a_{j,i_1} \geq a_{j,i_2} \geq \dots \geq a_{j,i_n}$  的排列, 寻找整数  $k$  使等式约束右端值满足  $\sum_{m=1}^{k-1} P_i^{\max} \leq D \leq \sum_{m=1}^k P_i^{\max}$ , 虽问题难点转

化为求  $k$ , 但算法为基本排列法, 算法复杂度相对于求解优化模型已显著减小<sup>[25]</sup>。

式(11)中线路传输断面功率约束中, 其余变量在鲁棒原理选择最差场景时已经设定为给定值, 线路潮流约束可转化为式(20)。

$$\sum_{i \in G_{\text{con}}} S_{l,i} P_i^{\text{sch}} + D_{\text{equal}} \leq \overline{TL}_l \quad (20)$$

式中:  $S_{l,i}$  为合并变量后线路关于机组出力的灵敏度系数;  $D_{\text{equal}}$  为等值参数以合并其余附加项;  $P_i^{\text{sch}}$  所满足边界条件并非为给定的  $0 \leq p_i \leq P_i^{\max}$  形式而为  $P_i^{\min} \leq P_i^{\text{sch}} \leq P_i^{\max}$ , 需构建如式(21)。

$$\begin{aligned} LP^* = \max_{P_i^{\text{sch}}} \quad & \sum_{i=1}^{N_g} S_{l,i} P_i^{\text{sch}} = \max_{\Delta P_i} \sum_{i=1}^{N_g} S_{l,i} (P_i^{\min} + \Delta P_i) = \\ & S_{l,i} P_i^{\text{sch}} + \max_{\Delta P_i} \sum_{i=1}^{N_g} S_{l,i} \Delta P \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^{N_g} P_i^{\min} + \sum_{i=1}^{N_g} \Delta P_i = D - \sum_{i=1}^{N_w} P_i^f \\ & 0 \leq \Delta P \leq P_i^{\max} - P_i^{\min}, i = 1, \dots, N_g \end{aligned} \quad (21)$$

将所需优化的传统机组出力值用最低出力和出力增量表示如式(21)。式中目标函数值  $LP^*$  和附加参数  $D_{\text{equal}}$  之和构成了线路约束判断依据, 形式与式(19)一致。算法流程如图1所示。

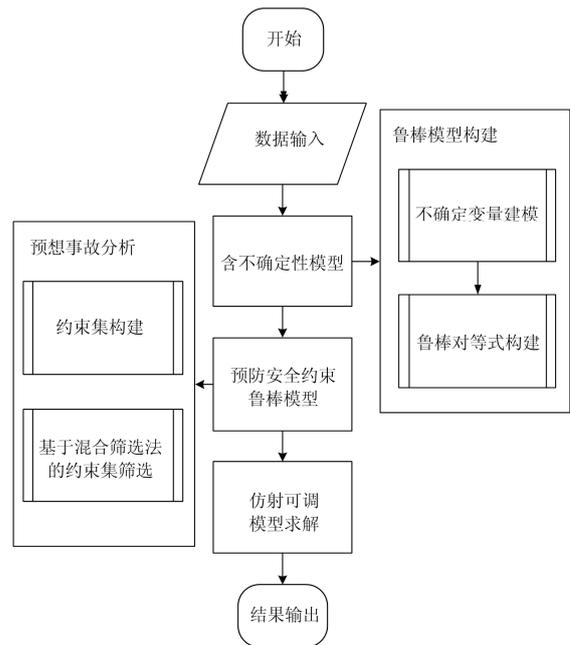


图1 计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart

## 4 算例分析

选用 IEEE-39 节点新英格兰系统及 IEEE-118

节点系统作为主要测试系统，算例分析中清洁能源出力采用有名值代替期望值进行分析。在 Matlab 环境中编写了仿射可调鲁棒最优潮流程序和考虑预想事故的预防安全约束鲁棒最优潮流程序，使用 CPLEX 优化软件包求解最优潮流模型中的二次规划问题。算例仿真采用安装主频为 3.2 GHz 的 Intel Core i7 处理器和 16 GB 内存的微机。

IEEE-39 节点系统如图 2 所示，在 30、32、38 和 39 号节点分别装有容量为 200 MW、100 MW、100 MW 和 200 MW 的风机，风电渗透率接近 10%。

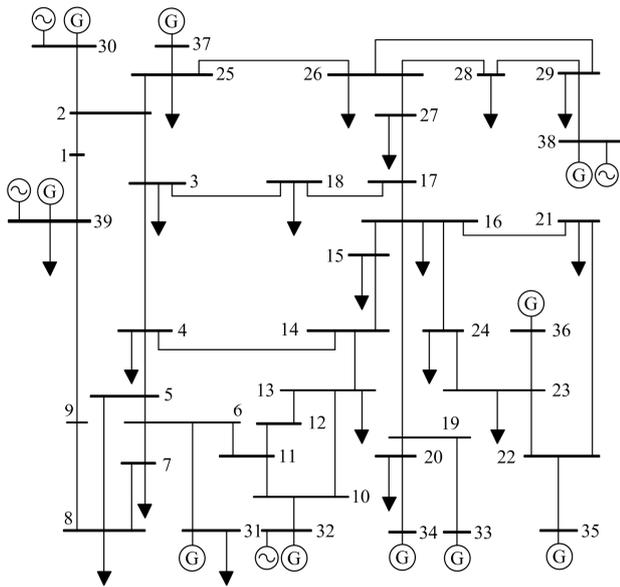


图 2 修改后的 IEEE-39 节点系统图  
Fig. 2 Modified IEEE-39 bus diagram

#### 4.1 仿射可调鲁棒最优潮流算例

算例 1 为各风机预测出力为各装机容量的 80% 时，波动范围分别为容量的 5% 至 20% 时，鲁棒最优潮流计算。图 3 展示了不同波动范围，火电机组出力的参考值及部分线路的有功功率参考值。

图 3(a) 为风机出力波动区间变化时火电机组出力参考值变化的趋势图，G 表示发电机编号。波动范围达到 25% 时，由于风机的最大可能出力已经超越了风机的容量，火电机组不需留有与风电波动超越额定容量对应的旋转备用以抵御风机的不确定出力，即旋转备用只需满足  $\min\{25\% \text{波动范围, 风电额定容量} - \text{预测出力}\}$  的需求即可。图 3(b) 为风机出力波动区间变化时，部分线路在鲁棒运行点的有功功率值。由于火电机组需留有足够备用抵御风电不确定性，线路潮流随不确定区间变化趋势各异。在变化范围达到 25% 时，线路潮流值亦不发生显著变化。

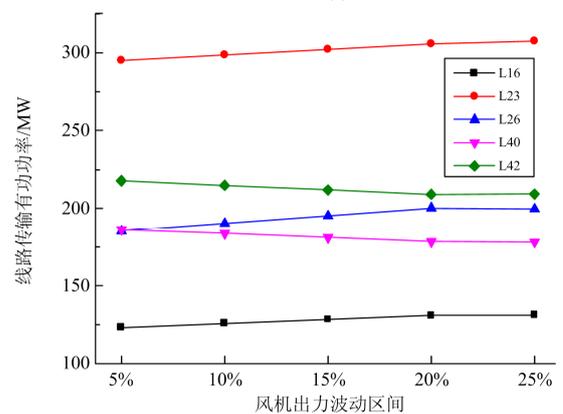
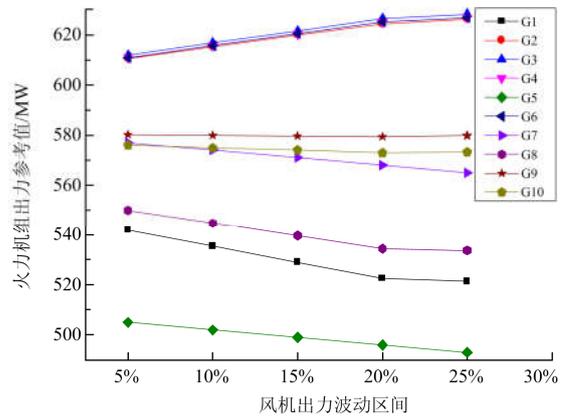
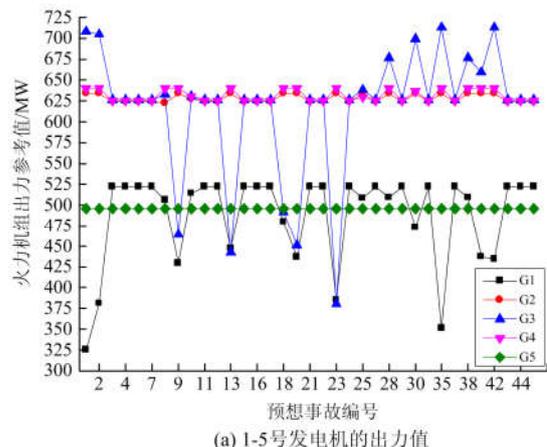


图 3 不同波动范围时鲁棒最优潮流计算结果  
Fig. 3 Robust optimal power flow results with different interval tolerance

#### 4.2 考虑预想事故时预防安全约束鲁棒最优潮流

考虑预想事故时，预防安全约束鲁棒最优潮流结果会发生显著变化。算例 2 中风电出力为容量的 80%，不确定区间波动范围为装机容量的 20%，分别对系统线路进行开断模拟，计算仅考虑单个预想事故的预防安全约束鲁棒最优潮流。图 4 为发电机出力参考值。



(a) 1-5 号发电机的出力值

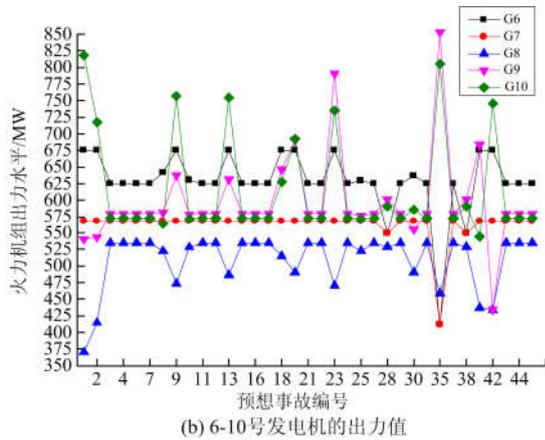


图4 考虑单个预想事故鲁棒最优潮流机组出力  
Fig. 4 Output power of generators in robust optimal power flow considering single contingency

考虑各预想事故, 系统中同一条线路潮流区间值的上下限如图5所示。曲线表明: 考虑部分预想事故后, 线路潮流极值发生变化。部分线路断开后, 系统虽能够在  $N-1$  条件下安全运行, 但运行点相对于其他预想事故为不可行点, 故障需要单独分析考虑。

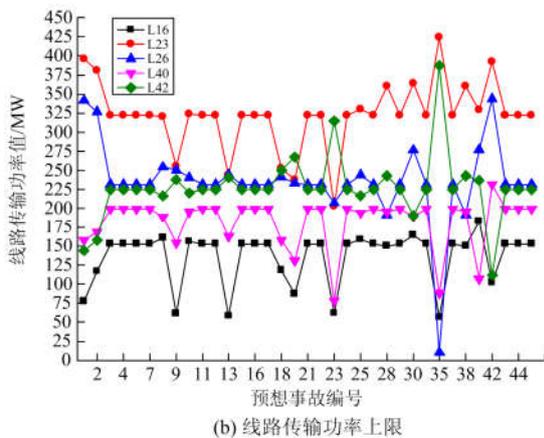
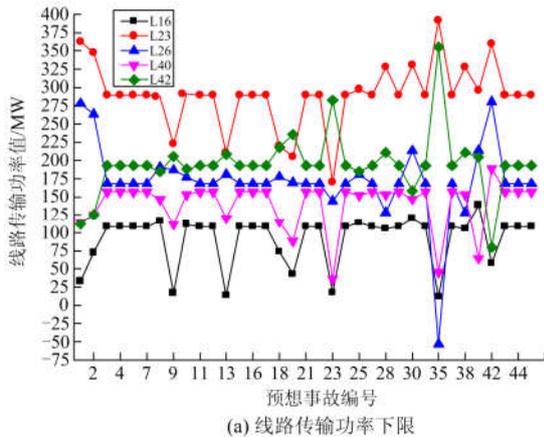


图5 考虑单个预想事故鲁棒最优潮流线路潮流区间值  
Fig. 5 Interval values of transmission power considering single contingency in robust optimal power flow

### 4.3 约束集混合筛选方法及程序计算性能分析

为测试所研究有效约束集筛选算法, 分别采用多个 IEEE 标准算例及修改的江苏电网 1 079 节点测试算例对系统线路有功约束集进行筛选判别, 测试结果列于表 1 中。由于断开某些线路可能导致系统解列或导致系统中发电机脱网, 故表中预想事故数为选择过的预想事故, 故小于系统的总线路数。测试系统中, 选定在某些常规电源处设置合适容量的风力发电厂, 风机出力波动范围均设置为占容量 10%。改动后的江苏电网预想事故数为基于调度部门工作人员在电网实际运行时考虑的预想事故集中数目。

表 1 有效约束集筛选算法测试结果

Table 1 Test results of effective constraints filtering				
测试系统相关参数				
节点总数	9	39	118	1 079
总线路数	9	46	186	1 830
预想事故数	6	31	132	156
线路总约束数量	127	2 945	68 077	574 621
非冗余约束数量	24	493	1 372	15 302

由表 1 中数据可知, 由于在鲁棒最优潮流中需要考虑预想事故集, 故系统安全约束(线路传输有功容量约束)增长迅速, 在 IEEE-118 节点系统和江苏电网 1 079 节点系统中呈现远多于系统节点数的约束数目, 给后续优化求解带来了巨大的计算负担。由于采用了有效约束集筛选方法, 进行预防安全约束鲁棒最优潮流计算时, 仅需考虑数目较少的约束条数, 给问题求解提供了可能性。

表 2 为算法计算耗时统计表, 算例仍为上文所述系统。由表中数据可知: 若不进行筛选约束集工作, IEEE-118 节点系统和江苏 1 079 节点测试系统预防安全约束最优潮流无法计算。原因为约束条数过多导致模型存储空间超过了常规软件所能调取的空间大小。采用筛选约束后, 问题即可求解; 对于小节点系统算例, 由于约束集的筛选需求解对应子问题, 约束筛选占据了相对多的时间, 导致求解时

表 2 计算用时

Table 2 Computation times				
计算时间/s				
节点总数	9	39	118	1 079
不筛选约束计算总时间	0.002	0.006	无法计算	无法计算
约束筛选时间	0.101 6	4.712	108.923 2	459.69
优化计算时间	0.011 7	0.026	0.017	2.331
筛选约束后计算总时间	0.113 3	4.738	108.940 2	462.021

间长于不进行约束筛选的优化模型。在大系统中, 由于约束数目及网络拓扑结构复杂, 约束筛选时间较长, 故求解总时间亦较长, 若需实现在线应用仍需进行进一步研究。

## 5 结论

本文提出了一种考虑约束集混合筛选的预防安全约束鲁棒最优潮流计算方法, 采用仿射可调线性鲁棒优化原理对含不确定性的预防安全约束最优潮流模型进行建模, 研究了基于有效约束筛选的求解方法。选用修改后的 IEEE 标准系统及江苏电网验证了所研究模型及求解方法的有效性。算例结果表明, 提出算法能够进行考虑预想事故的鲁棒最优潮流计算, 且能够进行预防安全约束计算, 为考虑不确定性的电力系统实时经济调度提供了策略支持。

## 参考文献

- [1] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.  
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [2] 郭永明, 李仲昌, 尤小虎, 等. 计及备用容量优化配置的风火联合随机经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 31-36.  
GUO Yongming, LI Zhongchang, YOU Xiaohu, et al. Stochastic economic dispatch model for joint delivery of wind power and thermal power generation system considering optimal scheduling of reserve capacity[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 31-36.
- [3] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.  
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [4] 王敏, 许建, 潘永春. 计及风电预测可靠性的含风电电力系统优化调度模型[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 43-49.  
WANG Min, XU Jian, PAN Yongchun. Optimized dispatching model for power system with wind power considering wind power forecasting reliability[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 43-49.
- [5] 魏聪, 白帆, 方开俊, 等. 基于风电容量可信度的电力电量平衡优化模型[J]. 智慧电力, 2018, 46(8): 25-31.  
WEI Cong, BAI Fan, FANG Kaijun, et al. An electric power and energy balance optimization model based on wind power capacity credit[J]. Smart Power, 2018, 46(8): 25-31.
- [6] 魏韡, 刘锋, 梅生伟. 电力系统鲁棒经济调度(一)理论基础[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 37-43.  
WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Robust and economical scheduling methodology for power systems part one theoretical foundations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 37-43.
- [7] 黎静华, 文劲宇, 潘毅, 等. 面向新能源并网的电力系统鲁棒调度模式[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 47-54.  
LI Jinghua, WEN Jinyu, PAN Yi, et al. Robust dispatching mode of electrical power system to cope with renewable energy power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 47-54.
- [8] 管志成, 丁晓群, 郑能, 等. 计及需求侧资源的主动配电系统两阶段优化调度[J]. 智慧电力, 2018, 46(1): 14-21.  
GUAN Zhicheng, DING Xiaoqun, ZHENG Neng, et al. Two-stage optimal dispatch of active distribution system considering demand-side resources[J]. Smart Power, 2018, 46(1): 14-21.
- [9] 王蓓蓓, 唐楠, 赵盛楠, 等. 需求响应参与风电消纳的随机 & 可调节鲁棒混合日前调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6339-6346.  
WANG Beibei, TANG Nan, ZHAO Shengnan, et al. Stochastic & adjustable robust hybrid scheduling model of power system considering demand response's participation in large-scale wind power consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6339-6346.
- [10] 翟鹤峰, 杨明, 王栋, 等. 计及注入转移分布因子估计误差的鲁棒实时调度[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 217-228.  
ZHAI Hefeng, YANG Ming, WANG Dong, et al. Robust real-time dispatch considering the injection shift factor estimation errors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 217-228.
- [11] 张倩文, 王秀丽, 杨廷天, 等. 含风电场电力系统的鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1451-1459.  
ZHANG Qianwen, WANG Xiuli, YANG Tingtian, et al. A robust dispatch method for power grid with wind farms[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1451-1459.

- [12] 黄国栋, 崔晖, 许丹, 等. 安全约束经济调度中有功潮流调整方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 91-96.  
HUANG Guodong, CUI Hui, XU Dan, et al. A method of active power flow adjustment in security constrained economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 91-96.
- [13] STREET A, MOREIRA A, ARROYO J M. Energy and reserve scheduling under a joint generation and transmission security criterion: an adjustable robust optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 3-14.
- [14] 吴巍, 汪可友, 李国杰. 考虑风电时空相关性的仿射可调鲁棒机组组合[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4089-4097.  
WU Wei, WANG Keyou, LI Guojie. Affinely adjustable robust unit commitment considering the spatiotemporal correlation of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4089-4097.
- [15] 于丹文, 杨明, 翟鹤峰, 等. 鲁棒优化在电力系统调度决策中的应用研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 134-143.  
YU Danwen, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. An overview of robust optimization used for power system dispatch and decision making[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 134-143.
- [16] 陈雁, 文劲宇, 程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 80-87.  
CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow analysis considering dependencies among input random variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 80-87.
- [17] 叶燕飞, 王琦, 陈宁, 等. 考虑时空分布特性的风速预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 114-120.  
YE Yanfei, WANG Qi, CHEN Ning, et al. Wind forecast model considering the characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 114-120.
- [18] 陈昊. 采用现代时间序列分析方法的电力负荷预测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [19] ZHENG D, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [20] 晁颖, 金焯, 朱晶亮, 等. 考虑光伏发电出力不确定性的年度最大负荷概率预测[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 83-89.  
CHAO Ying, JIN Ye, ZHU Jingliang, et al. Probabilistic forecast of annual peak load with consideration of photovoltaic generation output uncertainties[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 83-89.
- [21] WANG Q, WATSON J P, GUAN Y. Two-stage robust optimization for N-k contingency-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2366-2375.
- [22] ARDAKANI A J, BOUFFARD F. Identification of umbrella constraints in DC-based security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3924-3934.
- [23] WU H, GUAN X, ZHAI Q, et al. A systematic method for constructing feasible solution to SCUC problem with analytical feasibility conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 526-534.
- [24] KARGARIAN A, FU Y, LI Z. Distributed security-constrained unit commitment for large-scale power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1925-1936.
- [25] ZHAI Q, GUAN X, CHENG J, et al. Fast identification of inactive security constraints in SCUC problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1946-1954.

收稿日期: 2018-04-27; 修回日期: 2018-10-30

作者简介:

许超(1989—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定与控制; E-mail: xuchaochn@163.com

陈昊(1980—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为能源预测、电力系统保护与控制; E-mail: pingfengma@126.com

屠秉慧(1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统调控运行。E-mail: 289729006@qq.com

(编辑 张爱琴)