

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 6 月 18 日 (18.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/119159 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/38 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/100600
- (22) 国际申请日: 2019 年 8 月 14 日 (14.08.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811509293.0 2018 年 12 月 11 日 (11.12.2018) CN
- (71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。
- (72) 发明人: 吴文传 (WU, Wenchuan); 中国北京市
海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 张伯明
(ZHANG, Boming); 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。 许书伟 (XU, Shuwei); 中国
北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 孙
宏斌 (SUN, Hongbin); 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。 王彬 (WANG, Bin); 中
国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。
郭庆来 (GUO, Qinglai); 中国北京市海淀区
清华园, Beijing 100084 (CN)。
- (74) 代理人: 北京清亦华知识产权代理事务
所 (普通合伙) (TSINGYIHUA INTELLECTUAL
PROPERTY LLC); 中国北京市海淀区清华园清华
大学照澜院商业楼 301 室, Beijing 100084 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

(54) **Title:** THERMAL POWER UNIT DYNAMIC REAL-TIME SCHEDULING METHOD BASED ON CAUCHY DISTRIBUTION OF WIND/LIGHT POWER OUTPUT

(54) 发明名称: 基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法

(57) **Abstract:** A thermal power unit dynamic real-time scheduling method based on the Cauchy distribution of wind/light power output, relating to the technical field of power system operation. By means of analysing historical wind power output, statistical or fitting software is used to implement joint Cauchy distribution fitting. For determined power system parameters, establishing a chance-constrained random dynamic real-time scheduling model; then, using the mathematical properties of Cauchy distribution, transforming the original problem into an easily solved linearly constrained convex optimisation problem; and finally solving the scheduling model to obtain a scheduling policy. The present method makes full use of the excellent mathematical properties of Cauchy distribution in terms of short-term predictions of wind power/photovoltaic power plant output, effectively increasing model solving efficiency; in addition, the adjustable risk level chance-constrained model eliminates the conservativeness of traditional robust economic scheduling, in order to provide decision makers with a more rational basis for scheduling. The present method can be applied to the active real-time economic scheduling of power systems comprising large-scale wind power grid connection.

(57) 摘要: 一种基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法, 属于电力系统的运行技术领域。通过分析风电出力的历史数据, 利用统计或拟合软件进行联合柯西分布拟合。针对确定的电力系统参数, 建立机会约束的随机动态实时调度模型; 然后, 利用柯西分布的数学性质, 把原问题转化为容易求解的线性约束凸优化问题; 最后求解调度模型, 得到调度策略。该方法充分利用柯西分布在风电/光伏电站出力的短期预测方面的优越性和优良的数学特性, 有效提高了模型的求解效率, 同时风险水平可调的机会约束模型消除了传统鲁棒经济调度的保守性, 为决策者提供了更合理的调度依据。该方法可应用于包含大规模风电并网的电力系统有功实时经济调度中。

本国际公布：

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法

相关申请的交叉引用

本申请要求清华大学于 2018 年 12 月 11 日提交的、发明名称为“基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法”的、中国专利申请号“201811509293.0”的优先权。

技术领域

本发明涉及一种基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法，尤其涉及一种基于风电/光伏出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法，属于电力系统的运行技术领域。

背景技术

开发利用风电资源、实现能源的可持续发展是我国能源发展战略的重大举措。随着风电大规模接入电网，其波动性和随机性给电力系统的有功调度带来了两个方面的难题。

一方面，精确、灵活的风电出力预测是实现安全、经济有功调度的基础，传统的预测方法包括给定出力上下限的区间描述法和简单的高斯概率密度函数描述法，虽然像贝塔分布、通用分布、混合高斯分布等模型也被用在了风电预测出力的拟合中，但是它们或者无法精确拟合风电预测出力，或者给有功调度模型的求解带来了极大的困难，因此一种准确、灵活的预测模型亟需得到应用。

另一方面，风电的波动性和随机性使得传统的确定性调度方法难以适用。鲁棒经济调度通常是一种可行的方案，然而由于鲁棒优化具有保守性，会给调度带来不必要的成本；机会约束的随机经济调度是兼顾系统运行风险和减少成本的有效建模策略，该方法把风险发生的概率限制在预先给定的置信水平下，通过目标函数值的最小化得到成本最低的调度策略。然而约束和目标函数中存在的随机变量使得机会约束优化问题的求解变得非常困难，现有的求解方法普遍存在计算量大的缺点，然而松弛的方法又使得求解结果不够精确，无法实现经济调度的高效性。

综上所述，计及风电出力随机性的动态经济调度的建模以及快速求解仍然是影响风电资源利用率的一大难题。

发明内容

本发明的目的是提出一种基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法，基于联合柯西分布，对风电短期出力进行精确拟合，以充分利用机会约束随机经济调度的优点，

有效降低系统的风险，节约电网调度的成本。

本发明提出的基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法，包括以下步骤：

(1) 建立电网中风电/光伏电站短期预测出力的多随机变量联合柯西分布模型，该柯西分布模型包括以下内容：

a、一个多风电/光伏电站短期预测出力的联合柯西分布的概率密度函数：

$$PDF_{\tilde{p}_t^w}(\tilde{p}_t^w; \mu_t, \Sigma_t) = \frac{\Gamma\left(\frac{1+K}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \pi^{\frac{K}{2}} |\Sigma_t|^{\frac{1}{2}} \left[1 + (x - \mu_t)^T \Sigma_t^{-1} (x - \mu_t)\right]^{\frac{1+K}{2}}}$$

其中， $PDF(\cdot)$ 表示随机变量的概率密度函数，概率密度函数通过对风电/光伏电站历史出力的拟合得到， t 为调度时段， K 为风电/光伏电站的数目， $\tilde{P}_t^w = (\tilde{p}_{1,t}^w, \tilde{p}_{2,t}^w, \dots, \tilde{p}_{k,t}^w)^T$ 为调度时段 t 所有风电/光伏电站实际出力的列向量，上标 T 为矩阵转置，上标 w 表示该变量描述风电/光伏电站， $\tilde{p}_{k,t}^w$ 表示 t 调度时段第 k 个风电/光伏电站的实际出力， $\mu_t = (\mu_{1,t}, \mu_{2,t}, \dots, \mu_{k,t})^T$ 表示 t 调度时段联合柯西分布概率密度函数的位置参数， $\mu_{k,t}$ 表示 t 调度时段第 k 个风电/光伏电站出力的边缘柯西分布的位置参数， Σ_t 表示 t 调度时段联合柯西分布概率密度函数的尺度参数；

b、形式为各风电/光伏电站出力线性组合的随机变量的概率描述，包括概率密度函数、累积分布函数以及累积分布函数的逆函数：

设 a 为 k 维列向量，那么随机变量 $a^T \tilde{P}_t^w$ 服从位置参数和尺度参数为 $(a^T \mu_t, a^T \Sigma_t a)$ 的一维柯西分布，其概率密度函数、累积分布函数以及累积分布函数的逆函数可以表达为以下形式：

$$\text{其中，概率密度函数为： } PDF_{a^T \tilde{P}_t^w}(x) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{a^T \Sigma_t a}{(x - a^T \mu_t)^2 + (a^T \Sigma_t a)} \right]$$

$$\text{累积分布函数为： } CDF_{a^T \tilde{P}_t^w}(x) = \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{x - a^T \mu_t}{\sqrt{a^T \Sigma_t a}} \right) + \frac{1}{2}$$

$$\text{累积分布函数的逆函数为： } CDF_{a^T \tilde{P}_t^w}^{-1}(F) = a^T \mu_t + \sqrt{a^T \Sigma_t a} \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right]$$

其中， $\tan$ 为正切函数， $\arctan$ 为反正切函数， F 为分位数；

(2) 建立一个基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型，该随机动态实时调度模型由目标函数和约束条件组成，具体步骤如下：

(2-1) 建立基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型的目标函数 f :

目标函数为使运行成本最小化, 表达式如下:

$$f = \min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^N CF_{i,t} (P_{i,t}^s) + \sum_{j=1}^J CF_{j,t} (P_{j,t}^a) + \sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^+ (\tilde{w}_t)] + \sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^- (\tilde{w}_t)] \right\}$$

其中, T 、 N 和 J 分别表示调度时段 t 的数量、火电机组数量以及发电量自动控制机组的数量, t 、 i 和 j 分别为调度时段、火电机组编号和发电量自动控制机组的编号, 上标 s 表示该变量描述火电机组, 上标“+”表示该变量描述正旋转备用, 上标“-”表示该变量描述负旋转备用, $P_{i,t}^s$ 表示第 i 台火电机组在 t 调度时段的计划出力, $p_{j,t}^a$ 表示第 j 个发电量自动控制机组在 t 调度时段内计划出力, $\tilde{w}_t$ 表示 t 调度时段所有风电/光伏电站实际出力的总和, $CF_{i,t} (P_{i,t}^s)$ 和 $CF_{j,t} (P_{j,t}^a)$ 分别表示火电机组和发电量自动控制机组的燃料成本:

$$\begin{aligned} CF_{i,t} (P_{i,t}^s) &= a_{i,t} (P_{i,t}^s)^2 + b_{i,t} P_{i,t}^s + c_{i,t} \\ CF_{j,t} (P_{j,t}^a) &= a_{j,t} (P_{j,t}^a)^2 + b_{j,t} P_{j,t}^a + c_{j,t} \end{aligned}$$

其中, $a_{i,t}, b_{i,t}, c_{i,t}$ 分别为 t 时段火电机组 i 的燃料成本的二次项系数、一次项系数和常数项, $a_{j,t}, b_{j,t}, c_{j,t}$ 分别为 t 时段发电量自动控制机组 j 的燃料成本的二次项系数、一次项系数和常数项,

$E(\cdot)$ 表示随机变量的期望值, $CR_{j,t}^+$ 表示在 t 调度时段内, 由于风电/光伏电站发电实际出力低于计划出力引起的正旋转备用的需求成本, 即高估风电/光伏电站出力的惩罚, 当风电/光伏电站的实际出力小于计划值时会调度发电量自动控制机组的正旋转备用以维持功率平衡, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} CR_{j,t}^+ (\tilde{w}_t) = \gamma_{j,t}^+ \cdot \max \{ \alpha_j \cdot (w_t - \tilde{w}_t), 0 \} \\ E[CR_{j,t}^+ (\tilde{w}_t)] = \gamma_{j,t}^+ \alpha_j \int_0^{w_t} (w_t - \tilde{\theta}_t) \varphi_t(\tilde{\theta}_t) d\tilde{\theta}_t \end{cases}$$

其中, $\gamma_{j,t}^+$ 为正旋转备用的成本系数, α_j 为第 j 个发电量自动控制机组的功率分配系数, 根据发电量自动控制机组的额定容量占发电量自动控制机组的总容量的比例确定, w_t 表示 t 调度时段所有风电/光伏电站的计划出力总和, $\tilde{w}_t$ 表示 t 时段所有风电/光伏电站的实际出力总和, 满足如下关系:

$$\begin{aligned}\tilde{p}_{j,t}^a &= p_{j,t}^a - \alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t) \\ \sum_{j=1}^J \alpha_j &= 1 (\alpha_j \geq 0)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}w_t &= \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w \\ \tilde{w}_t &= \sum_{k=1}^K \tilde{p}_{k,t}^w\end{aligned}$$

其中, $\tilde{p}_{j,t}^a$ 为第 j 个发电量自动控制机组的实际出力, $p_{k,t}^w$ 表示 t 调度时段第 k 个风电/光伏电站的计划出力, K 表示风电/光伏电站的数量;

$CR_{j,t}^-$ 表示在 t 时段内由于风电/光伏电站实际出力超过计划出力而引起的负旋转备用的需求成本, 即低估风电/光伏电站出力的惩罚成本, 当风电/光伏电站的实际出力大于计划值时会调度发电量自动控制机组的负旋转备用以维持功率平衡, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t) = \gamma_{j,t}^- \cdot \max\{\alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t), 0\} \\ E[CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t)] = \gamma_{j,t}^- \alpha_j \int_{w_t}^{\bar{w}_t} (\tilde{\theta}_t - w_t) \varphi_t(\tilde{\theta}_t) d\tilde{\theta}_t \end{cases}$$

其中, $\gamma_{j,t}^-$ 为负旋转备用的成本系数, $\varphi_t(\tilde{\theta}_t)$ 为实际风电出力总和 $\tilde{w}_t$ 的概率密度函数, $\bar{w}_t$ 为所有风电/光伏电站在 t 调度时段出力的上界之和, $\bar{w}_t = \sum_{k=1}^K \bar{p}_{k,t}^w$, $\bar{p}_{k,t}^w$ 为 t 时段第 k 个风电/光伏电站的出力的上界;

根据上述步骤 (1) 的风电/光伏电站短期预测出力的多随机变量联合柯西分布模型, 得到目标函数 f 的表达式中的后两项为:

$$\sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^+(\tilde{w}_t)] + \sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t)] = \sum_{j=1}^J \left[A + B \cdot w_t - \frac{C \cdot \Sigma_{\tilde{w}_t}}{2} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{w_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)^2 \right) + C \cdot (w_t - \mu_{\tilde{w}_t}) \arctan \frac{w_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right]$$

其中, $\mu_{\tilde{w}_t} = a_{\tilde{w}_t}^T \mu_t$, $\Sigma_{\tilde{w}_t} = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}}$, $a_{\tilde{w}_t}$ 为所有元素全为 1 的 K 维列向量, K 为风电/光伏电站的数目, A, B, C 均为常数具体表达式如下:

$$A = \frac{\alpha_j \cdot \Sigma_{\tilde{w}_t}}{2\pi} \left(\gamma_{j,t}^+ \ln \left(1 + \left(\frac{\mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)^2 \right) + \gamma_{j,t}^- \ln \left(1 + \left(\frac{\bar{w}_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)^2 \right) \right) + \frac{\alpha_j \cdot \Sigma_{\tilde{w}_t}}{\pi} \left(\gamma_{j,t}^+ \arctan \frac{-\mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} + \gamma_{j,t}^- \arctan \frac{\bar{w}_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)$$

$$B = -\frac{\alpha_j}{\pi} \left(\gamma_{j,t}^+ \arctan \frac{-\mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} + \gamma_{j,t}^- \arctan \frac{\bar{w}_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)$$

$$C = \frac{\gamma_{j,t}^+ \alpha_j}{\pi} + \frac{\gamma_{j,t}^- \alpha_j}{\pi}$$

(2-2) 上述基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型的约束条件, 包括:

(2-2-1) 电网功率平衡约束, 表达式如下:

$$\sum_{i=1}^N p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J p_{j,t}^a + \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w = \sum_{d=1}^D p_{d,t}^d$$

其中, $p_{d,t}^d$ 为 t 调度时段、风电/光伏电站和火电机组所在电网的第 d 个节点的负荷量, D 表示负荷的总数, 同时表示电网中节点的个数;

(2-2-2) 电网机组出力的上、下限约束, 包括:

$$\underline{p}_{j,t}^a \leq p_{j,t}^a \leq \bar{p}_{j,t}^a, \quad \underline{p}_{i,t}^s \leq p_{i,t}^s \leq \bar{p}_{i,t}^s, \quad 0 \leq p_{k,t}^w \leq \bar{p}_{k,t}^w$$

$$\begin{cases} \alpha_j w_t + p_{j,t}^a - \bar{p}_{j,t}^a \leq \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\delta) \\ \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(1-\delta) \leq \alpha_j w_t + p_{j,t}^a - \underline{p}_{j,t}^a \end{cases}$$

其中, $t=1, \dots, T$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, J$, $k=1, \dots, K$, $\underline{p}_{j,t}^a$ 和 $\bar{p}_{j,t}^a$ 分别为第 j 个发电量自动控制机组在 t 调度时段出力的上下界, $\underline{p}_{i,t}^s$ 和 $\bar{p}_{i,t}^s$ 分别为第 i 个火电机组在 t 时段出力的上下界, δ 为调度员设定的可接受的风险水平, $CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\cdot)$ 为 $\tilde{w}_t$ 的累积分布函数的逆函数, $\tilde{w}_t$ 表示 t 时段所有风电/光伏电站的实际出力总和,

$$CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(F) = \mu_{\tilde{w}_t} + \Sigma_{\tilde{w}_t} \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right], \quad \mu_{\tilde{w}_t} = a_{\tilde{w}_t}^T \mu_t, \quad \Sigma_{\tilde{w}_t} = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}}, \quad \mu_{\tilde{w}_t} = a_{\tilde{w}_t}^T \mu_t,$$

$\Sigma_{\tilde{w}_t} = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}}$, $a_{\tilde{w}_t}$ 为所有元素全为 1 的 K 维列向量, K 表示风电/光伏电站的数量;

(2-2-3) 电网中火电机组和发电量自动控制机组的爬坡约束, 表达式如下:

对 $\forall t=2, 3, \dots, T; i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, J$:

$$-RD_{i,t}^s \cdot \Delta T \leq p_{i,t}^s - p_{i,t-1}^s \leq RU_{i,t}^s \cdot \Delta T$$

$$\begin{cases} \alpha_j w_t - RU_{j,t}^a \cdot \Delta T \leq \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\beta) \\ \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(1-\beta) \leq \alpha_j w_t + RD_{j,t}^a \cdot \Delta T \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{p_{j,t}^a - p_{j,t-1}^a + \alpha_j(w_t - w_{t-1}) - RU_{j,t}^a \cdot \Delta T}{\alpha_j} \leq CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}(\beta) \\ CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}(1-\beta) \leq \frac{p_{j,t}^a - p_{j,t-1}^a + \alpha_j(w_t - w_{t-1}) + RD_{j,t}^a \cdot \Delta T}{\alpha_j} \end{cases}$$

其中, $RU_{i,t}^s$ 和 $RD_{i,t}^s$ 分别为 t 调度时段第 i 台火电机组向上、向下爬坡率, $RU_{j,t}^a$ 和 $RD_{j,t}^a$ 分别表示 t 时段第 j 台发电量自动控制机组向上、向下爬坡率, ΔT 表示相邻两个调度时段之间的调度间隔, β 为调度员设定的可接受风险水平, $CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}$ 表示 $w_{t,t-1}$ 的累积分布函数的逆函数, $w_{t,t-1} = \tilde{w}_t - \tilde{w}_{t-1}$, $CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}$ 的表达式如下:

$$CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}(F) = \mu_{w_{t,t-1}}^j + \Sigma_{w_{t,t-1}}^j \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right], \mu_{w_{t,t-1}}^j = a_{\tilde{w}_t} \mu_t - a_{\tilde{w}_{t-1}} \mu_{t-1}, \Sigma_{w_{t,t-1}}^j = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}} + \sqrt{a_{\tilde{w}_{t-1}}^T \Sigma_{t-1} a_{\tilde{w}_{t-1}}}$$

(2-2-4) 发电量自动控制机组的旋转备用约束, 具体表达式如下:

对 $\forall t = 1, 2, \dots, T; i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, J$,

$$\begin{aligned} 0 \leq r_{j,t}^{a+} \leq RU_{j,t}^a \cdot \Delta T, \sum_{j=1}^J r_{j,t}^{a+} &\geq R_t^+ \\ 0 \leq r_{j,t}^{a-} \leq RD_{j,t}^a \cdot \Delta T, \sum_{j=1}^J r_{j,t}^{a-} &\geq R_t^- \end{aligned}$$

$$\begin{cases} w_t + \frac{r_{j,t}^{a+} + p_{j,t}^a - \bar{P}_{j,t}^a}{\alpha_j} \leq CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\varepsilon) \\ CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(1-\varepsilon) \leq w_t + \frac{p_{j,t}^a - \underline{P}_{j,t}^a - r_{j,t}^{a-}}{\alpha_j} \end{cases}$$

其中, $r_{j,t}^+$ 和 $r_{j,t}^-$ 分别表示 t 调度时段第 j 台发电量自动控制机组提供的正负旋转备用的数量, R_t^+ 和 R_t^- 分别表示 t 调度时段电网所需要的最小正、负旋转备用的数量, ε 为调度员设定的可接受的风险水平;

(2-2-5) 电网线路潮流约束, 表达式如下:

对 $\forall t = 1, 2, \dots, T; l = 1, 2, \dots, L$:

$$\begin{cases} CDF_{a_l \tilde{P}_t^w}^{-1}(1-\eta) \leq L_{l,t} - \left[\sum_{i=1}^N G_{l,i} p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J G_{l,j} p_{j,t}^a + \left(\sum_{j=1}^J G_{l,j} \alpha_j \right) \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w + \sum_{d=1}^D G_{l,d} p_{d,t}^d \right] \\ -L_{l,t} - \left[\sum_{i=1}^N G_{l,i} p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J G_{l,j} p_{j,t}^a + \left(\sum_{j=1}^J G_{l,j} \alpha_j \right) \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w + \sum_{d=1}^D G_{l,d} p_{d,t}^d \right] \leq CDF_{a_l \tilde{P}_t^w}^{-1}(\eta) \end{cases}$$

其中, $G_{l,i}$ 为电网中第 l 条线路对第 i 台火力发电机组有功出力的转移分布因子, $G_{j,l}$ 为第 l 条线路对第 j 个发电量自动控制机组有功出力的转移分布因子, $G_{k,l}$ 为第 l 条线路对第 k 个风电/光伏电站有功出力的转移分布因子, $G_{d,l}$ 为第 l 条线路对第 d 个节点负荷功率的转移分布因子, 各转移分布因子分别从电网调度中心获取, $L_{l,t}$ 为 t 调度时段第 l 条线路上的有功功率上限, η 为电网线路上的有功功率超过线路有功功率上限的风险水平, 由调度员设定, $CDF_{a_l \tilde{P}_t^w}^{-1}(\cdot)$ 为 $a_l \tilde{P}_t^w$ 的累积分布函数的逆函数, 满足:

$$CDF_{a_l \tilde{P}_t^w}^{-1}(F) = a_l^T \mu_t + a_l^T \Sigma_t a_l \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right]$$

α_l 为 K 维向量, 其第 k 个元素为 $G_{l,k} - \left(\sum_{j=1}^J G_{l,j} \alpha_j \right)$;

(3) 采用内点法, 求解上述步骤 (2) 中的目标函数和约束条件组成的随机动态实时调度模型, 得到 $p_{i,t}^s$ 、 $p_{j,t}^a$ 和 $p_{k,t}^w$, 将其中的 $p_{i,t}^s$ 作为 t 调度时段第 i 个火电机组的计划出力, $p_{j,t}^a$ 第 j 个发电量自动控制机组的计划出力, $p_{k,t}^w$ 作为第 k 个风电/光伏电站的参考出力, 实现基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度。

本发明提出的基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法, 其优点是:

本发明方法首先通过多随机变量的联合柯西分布精确刻画了风电/光伏短期预测的出力特性和相关性, 以该分布为基础, 本方法建立了考虑确定性约束和机会约束下的成本期望值最小化的随机动态实时调度模型, 机会约束把调度过程中由于风电/光伏电站和 AGC 机组出力的随机性带来的安全风险限制在一定的置信水平内。同时, 由于柯西分布优良的数学性质使得实时有功调度模型被解析地表达为线性约束的凸优化模型, 模型优化的结果是在控制调度风险和减少调度成本下的传统火电机组、可参与调频的 AGC 机组以及风电/光伏电站出力的最优实时调度决策。本发明充分利用了柯西分布在风电/光伏电站出力的短期预测方面的优越性和优良的数学特性, 有效提高了模型的求解效率, 同时风险水平可调的机会约束模型消除了传统鲁棒经济调度的保守性, 为决策者提供了更合理的调度依据。本发明方法可应用于包含大规模风电并网的电力系统有功实时经济调度中。

具体实施方式

本发明提出的基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法，包括以下步骤：

(1) 建立电网中风电/光伏电站短期预测出力的多随机变量联合柯西分布模型，该柯西分布模型包括以下内容：

(1) 建立电网中风电/光伏电站短期预测出力的多随机变量联合柯西分布模型，该柯西分布模型包括以下内容：

a、一个多风电/光伏电站短期预测出力的联合柯西分布的概率密度函数：

$$PDF_{\tilde{p}_t^w}(\tilde{p}_t^w; \mu_t, \Sigma_t) = \frac{\Gamma\left(\frac{1+K}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)^K \pi^{\frac{K}{2}} |\Sigma_t|^{\frac{1}{2}} \left[1 + (x - \mu_t)^T \Sigma_t^{-1} (x - \mu_t)\right]^{\frac{1+K}{2}}} \quad (1)$$

其中， Γ 为一类基本的数学函数，具体表达式为 $\Gamma(s) = \int_0^\infty e^{-t} t^{s-1} dt, s > 0$ ，式中 s 为任意大于 0

的自变量， $PDF(\cdot)$ 表示随机变量的概率密度函数，概率密度函数通过对风电/光伏电站历史出力的拟合得到， t 为调度时段， K 为风电/光伏电站的数目， $\tilde{P}_t^w = (\tilde{p}_{1,t}^w, \tilde{p}_{2,t}^w, \dots, \tilde{p}_{K,t}^w)^T$ 为调度时段 t 所有风电/光伏电站实际出力的列向量，上标 T 为矩阵转置，上标 w 表示该变量描述风电/光伏电站， $\tilde{p}_{k,t}^w$ 表示 t 调度时段第 k 个风电/光伏电站的实际出力， $\mu_t = (\mu_{1,t}, \mu_{2,t}, \dots, \mu_{K,t})^T$ 表示 t 调度时段联合柯西分布概率密度函数的位置参数， $\mu_{k,t}$ 表示 t 调度时段第 k 个风电/光伏电站出力的边缘柯西分布的位置参数， Σ_t 表示 t 调度时段联合柯西分布概率密度函数的尺度参数；

b、形式为各风电/光伏电站出力线性组合的随机变量的概率描述，包括概率密度函数、累积分布函数以及累积分布函数的逆函数：

设 a 为 k 维列向量，那么随机变量 $a^T \tilde{P}_t^w$ 服从位置参数和尺度参数为 $(a^T \mu_t, a^T \Sigma_t a)$ 的一维柯西分布，其概率密度函数、累积分布函数以及累积分布函数的逆函数可以表达为以下形式：

其中，概率密度函数为：

$$PDF_{a^T \tilde{P}_t^w}(x) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{a^T \Sigma_t a}{(x - a^T \mu_t)^2 + (a^T \Sigma_t a)^2} \right] \quad (2)$$

累积分布函数为：

$$CDF_{a^T \tilde{P}_t^w}(x) = \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{x - a^T \mu_t}{\sqrt{a^T \Sigma_t a}} \right) + \frac{1}{2} \quad (3)$$

累积分布函数的逆函数为：

$$CDF_{a^T \tilde{P}_t^w}^{-1}(F) = a^T \mu_t + \sqrt{a^T \Sigma_t a} \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (4)$$

其中， $\tan$ 为正切函数， $\arctan$ 为反正切函数， F 为分位数；

(2) 建立一个基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型，该随机动态实时调度模型由目标函数和约束条件组成，具体步骤如下：

(2-1) 建立基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型的目标函数 f ：

目标函数为使运行成本最小化，表达式如下：

$$f = \min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^N CF_{i,t}(P_{i,t}^s) + \sum_{j=1}^J CF_{j,t}(P_{j,t}^a) + \sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^+(\tilde{w}_t)] + \sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t)] \right\} \quad (5)$$

其中， T 、 N 和 J 分别表示调度时段 t 的数量、火电机组数量以及发电量自动控制机组（以下简称 AGC 机组）的数量， t 、 i 和 j 分别为调度时段、火电机组编号和发电量自动控制机组的编号，上标 s 表示该变量描述火电机组，上标“+”表示该变量描述正旋转备用，上标“-”表示该变量描述负旋转备用， $P_{i,t}^s$ 表示第 i 台火电机组在 t 调度时段的计划出力， $p_{j,t}^a$ 表示第 j 个 AGC 机组在 t 调度时段内计划出力， $\tilde{w}_t$ 表示 t 调度时段所有风电/光伏电站实际出力的总和， $CF_{i,t}(P_{i,t}^s)$ 和 $CF_{j,t}(P_{j,t}^a)$ 分别表示火电机组和 AGC 机组的燃料成本：

$$\begin{aligned} CF_{i,t}(P_{i,t}^s) &= a_{i,t}(P_{i,t}^s)^2 + b_{i,t}P_{i,t}^s + c_{i,t} \\ CF_{j,t}(P_{j,t}^a) &= a_{j,t}(P_{j,t}^a)^2 + b_{j,t}P_{j,t}^a + c_{j,t} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $a_{i,t}$ 、 $b_{i,t}$ 、 $c_{i,t}$ 分别为 t 时段火电机组 i 的燃料成本的二次项系数、一次项系数和常数项，

$a_{j,t}$ 、 $b_{j,t}$ 、 $c_{j,t}$ 分别为 t 时段 AGC 机组 j 的燃料成本的二次项系数、一次项系数和常数项，

$E(\cdot)$ 表示随机变量的期望值， $CR_{j,t}^+$ 表示在 t 调度时段内，由于风电/光伏电站发电实际出力低于计划出力引起的正旋转备用的需求成本，即高估风电/光伏电站出力的惩罚，当风电/光伏电站的实际出力小于计划值时会调度 AGC 机组的正旋转备用以维持功率平衡，具体表达式如下：

$$\begin{cases} CR_{j,t}^+(\tilde{w}_t) = \gamma_{j,t}^+ \cdot \max\{\alpha_j \cdot (w_t - \tilde{w}_t), 0\} \\ E[CR_{j,t}^+(\tilde{w}_t)] = \gamma_{j,t}^+ \alpha_j \int_0^{w_t} (w_t - \tilde{\theta}_t) \varphi_t(\tilde{\theta}_t) d\tilde{\theta}_t \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\gamma_{j,t}^+$ 为正旋转备用的成本系数, 根据 AGC 机组的成本特性确定, 本发明的一个实施例中, 取值为 1000, 单位为“元/MW”, α_j 为第 j 个 AGC 机组的功率分配系数, 根据 AGC 机组的额定容量占发电量自动控制机组的总容量的比例确定, w_t 表示 t 调度时段所有风电/光伏电站的计划出力总和, $\tilde{w}_t$ 表示 t 时段所有风电/光伏电站的实际出力总和, 满足如下关系:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{j,t}^a &= p_{j,t}^a - \alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t) \\ \sum_{j=1}^J \alpha_j &= 1 (\alpha_j \geq 0) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} w_t &= \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w \\ \tilde{w}_t &= \sum_{k=1}^K \tilde{p}_{k,t}^w \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\tilde{p}_{j,t}^a$ 为第 j 个 AGC 机组的实际出力, $p_{k,t}^w$ 表示 t 调度时段第 k 个风电/光伏电站的计划出力, K 表示风电/光伏电站的数量;

$CR_{j,t}^-$ 表示在 t 时段内由于风电/光伏电站实际出力超过计划出力而引起的负旋转备用的需求成本, 即低估风电/光伏电站出力的惩罚成本, 当风电/光伏电站的实际出力大于计划值时会调度 AGC 机组的负旋转备用以维持功率平衡, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t) = \gamma_{j,t}^- \cdot \max\{\alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t), 0\} \\ E[CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t)] = \gamma_{j,t}^- \alpha_j \int_{w_t}^{\bar{w}_t} (\tilde{\theta}_t - w_t) \varphi_t(\tilde{\theta}_t) d\tilde{\theta}_t \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\gamma_{j,t}^-$ 为负旋转备用的成本系数, 根据 AGC 机组的成本特性确定, 本发明的一个实施例中, 取值为 1000, 单位为“元/MW”, $\varphi_t(\tilde{\theta}_t)$ 为实际风电出力总和 $\tilde{w}_t$ 的概率密度函数, $\bar{w}_t$ 为所有风电/光伏电站在 t 调度时段出力的上界之和, $\bar{w}_t = \sum_{k=1}^K \bar{p}_{k,t}^w$, $\bar{p}_{k,t}^w$ 为 t 时段第 k 个风电/光伏电站的出力的上界;

根据上述步骤 (1) 的风电/光伏电站短期预测出力的多随机变量联合柯西分布模型, 结合方程 (2), 得到目标函数 f 的表达式中的后两项为:

$$\sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^+(\bar{w}_t)] + \sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^-(\bar{w}_t)] = \sum_{j=1}^J \left[A + B \cdot w_t - \frac{C \cdot \Sigma_{\bar{w}_t}}{2} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{w_t - \mu_{\bar{w}_t}}{\Sigma_{\bar{w}_t}} \right)^2 \right) \right] + C \cdot (w_t - \mu_{\bar{w}_t}) \arctan \frac{w_t - \mu_{\bar{w}_t}}{\Sigma_{\bar{w}_t}} \quad (11)$$

其中, $\mu_{\bar{w}_t} = a_{\bar{w}_t}^T \mu_t$, $\Sigma_{\bar{w}_t} = \sqrt{a_{\bar{w}_t}^T \Sigma_t a_{\bar{w}_t}}$, $a_{\bar{w}_t}$ 为所有元素全为 1 的 K 维列向量, K 为风电/光伏电站的数目, A, B, C 均为常数具体表达式如下:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\alpha_j \cdot \Sigma_{\bar{w}_t}}{2\pi} \left(\gamma_{j,t}^+ \ln \left(1 + \left(\frac{\mu_{\bar{w}_t}}{\Sigma_{\bar{w}_t}} \right)^2 \right) + \gamma_{j,t}^- \ln \left(1 + \left(\frac{\bar{w}_t - \mu_{\bar{w}_t}}{\Sigma_{\bar{w}_t}} \right)^2 \right) \right) + \frac{\alpha_j \cdot \Sigma_{\bar{w}_t}}{\pi} \left(\gamma_{j,t}^+ \arctan \frac{-\mu_{\bar{w}_t}}{\Sigma_{\bar{w}_t}} + \gamma_{j,t}^- \arctan \frac{\bar{w}_t - \mu_{\bar{w}_t}}{\Sigma_{\bar{w}_t}} \right) \\ B &= -\frac{\alpha_j}{\pi} \left(\gamma_{j,t}^+ \arctan \frac{-\mu_{\bar{w}_t}}{\Sigma_{\bar{w}_t}} + \gamma_{j,t}^- \arctan \frac{\bar{w}_t - \mu_{\bar{w}_t}}{\Sigma_{\bar{w}_t}} \right) \\ C &= \frac{\gamma_{j,t}^+ \alpha_j}{\pi} + \frac{\gamma_{j,t}^- \alpha_j}{\pi} \end{aligned} \quad (12)$$

基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型由方程 (5), (6), (11) 和 (12) 确定。

2-2) 上述基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型的约束条件, 包括:

(2-2-1) 电网功率平衡约束, 表达式如下:

对 $\forall t = 1, 2, \dots, T$,

$$\sum_{i=1}^N p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J \tilde{p}_{j,t}^a + \sum_{k=1}^K \tilde{p}_{k,t}^w = \sum_{d=1}^D p_{d,t}^d \quad (13)$$

其中, $p_{d,t}^d$ 为 t 调度时段、风电/光伏电站和火电机组所在电网的第 d 个节点的负荷量, 电网中每个节点都有一个负荷, D 表示负荷的总数, 同时表示电网中节点的个数;

由于由风电/光伏电站实际出力偏离计划出力引起的功率不平衡最终被 AGC 机组所平衡, 因此表达式 (13) 可写为方程 (14):

$$\sum_{i=1}^N p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J p_{j,t}^a + \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w = \sum_{d=1}^D p_{d,t}^d \quad (14)$$

(2-2-2) 电网机组出力的上、下限约束, 包括:

对 $\forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K$:

$$\underline{p}_{j,t}^a \leq p_{j,t}^a \leq \bar{p}_{j,t}^a, \underline{p}_{i,t}^s \leq p_{i,t}^s \leq \bar{p}_{i,t}^s, 0 \leq p_{k,t}^w \leq \bar{p}_{k,t}^w \quad (15)$$

其中, $\underline{p}_{j,t}^a$ 和 $\bar{p}_{j,t}^a$ 分别为第 j 个 AGC 机组在 t 调度时段出力的上下界, $\underline{p}_{i,t}^s$ 和 $\bar{p}_{i,t}^s$ 分别为第 i 个火电机组在 t 时段出力的上下界。

同时, AGC 机组 t 时段的实际出力以一定的风险水平不得超出其出力的上下界, 具体表达

式如下：

$$\begin{cases} p\{\alpha_j \cdot (w_t - \tilde{w}_t) + p_{j,t}^a \leq \bar{P}_{j,t}^a\} \geq 1 - \delta \\ p\{\underline{P}_{j,t}^a \leq p_{j,t}^a + \alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t)\} \geq 1 - \delta \end{cases} \quad (16)$$

其中 δ 为调度员设定的可接受的风险水平。

结合方程 (4)，机会约束 (16) 可以转化为确定性的线性约束：

$$\begin{cases} \alpha_j w_t + p_{j,t}^a - \bar{P}_{j,t}^a \leq \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\delta) \\ \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(1 - \delta) \leq \alpha_j w_t + p_{j,t}^a - \underline{P}_{j,t}^a \end{cases} \quad (17)$$

其中， $CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\cdot)$ 为随机变量 $\tilde{w}_t$ 的累积分布函数的逆函数， $\tilde{w}_t$ 表示 t 时段所有风电/光伏电站

的实际出力总和， $CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(F) = \mu_{\tilde{w}_t} + \Sigma_{\tilde{w}_t} \tan\left[\pi\left(F - \frac{1}{2}\right)\right]$ ，函数中各参数为 $\mu_{\tilde{w}_t} = a_{\tilde{w}_t}^T \mu_t$ ，

$\Sigma_{\tilde{w}_t} = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}}$ ， $a_{\tilde{w}_t}$ 为所有元素全为 1 的 k 维列向量。

(2-2-3) 电网中火电机组和发电量自动控制机组的爬坡约束，表达式如下：

对 $\forall t = 2, 3, \dots, T; i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, J$ ：

$$-RD_{i,t}^s \cdot \Delta T \leq p_{i,t}^s - p_{i,t-1}^s \leq RU_{i,t}^s \cdot \Delta T \quad (18)$$

$$\begin{cases} p\{\alpha_j \cdot (w_t - \tilde{w}_t) \leq RU_{j,t}^a \cdot \Delta T\} \geq 1 - \beta \\ p\{\alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t) \leq RD_{j,t}^a \cdot \Delta T\} \geq 1 - \beta \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} p\{-RD_{j,t}^a \cdot \Delta T \leq \tilde{p}_{j,t}^a - \tilde{p}_{j,t-1}^a\} \geq 1 - \beta \\ p\{\tilde{p}_{j,t}^a - \tilde{p}_{j,t-1}^a \leq RU_{j,t}^a \cdot \Delta T\} \geq 1 - \beta \end{cases} \quad (20)$$

其中， $RU_{i,t}^s$ 和 $RD_{i,t}^s$ 分别为 t 调度时段第 i 台火电机组向上、向下爬坡率； $RU_{j,t}^a$ 和 $RD_{j,t}^a$ 分

别表示 t 调度时段第 j 台 AGC 机组向上、向下爬坡率； ΔT 表示相邻两个调度时段之间的

调度间隔； β 为调度员设定的可接受风险水平； $w_{t,t-1} = \tilde{w}_t - \tilde{w}_{t-1}$ 方程 (18) 和方程 (20) 分

别表示火电机组和 AGC 机组在相邻时段的爬坡限制，方程 (19) 表示 AGC 机组在 t 调度

时段发挥调频作用时的爬坡限制。

结合方程 (4)，方程 (19) 和 (20) 可以转化为如下形式：

$$\begin{cases} \alpha_j w_t - RU_{j,t}^a \cdot \Delta T \leq \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\beta) \\ \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(1 - \beta) \leq \alpha_j w_t + RD_{j,t}^a \cdot \Delta T \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \frac{p_{j,t}^a - p_{j,t-1}^a + \alpha_j (w_t - w_{t-1}) - RU_{j,t}^a \cdot \Delta T}{\alpha_j} \leq CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}(\beta) \\ CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}(1 - \beta) \leq \frac{p_{j,t}^a - p_{j,t-1}^a + \alpha_j (w_t - w_{t-1}) + RD_{j,t}^a \cdot \Delta T}{\alpha_j} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $w_{t,t-1} = \tilde{w}_t - \tilde{w}_{t-1}$, $CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}$ 表示随机变量 $w_{t,t-1}$ 的累积分布函数的逆函数, 表达式如下:

$$CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}(F) = \mu_{w_{t,t-1}} + \Sigma_{w_{t,t-1}} \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right], \mu_{w_{t,t-1}} = a_{\tilde{w}_t} \mu_t - a_{\tilde{w}_{t-1}} \mu_{t-1}, \Sigma_{w_{t,t-1}} = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}} + \sqrt{a_{\tilde{w}_{t-1}}^T \Sigma_{t-1} a_{\tilde{w}_{t-1}}} \quad (23)$$

(2-2-4) 发电量自动控制机组的旋转备用约束, 为了平衡由于各种不确定性因素引起的功率波动, 系统需要留有一定数量的正、负旋转备用容量, 该备用容量受 AGC 机组的爬坡率和出力上、下界限制, 具体表达式如下:

对 $\forall t = 1, 2, \dots, T; i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, J$,

$$\begin{aligned} 0 \leq r_{j,t}^{a+} &\leq RU_{j,t}^a \cdot \Delta T, \sum_{j=1}^J r_{j,t}^{a+} \geq R_t^+ \\ 0 \leq r_{j,t}^{a-} &\leq RD_{j,t}^a \cdot \Delta T, \sum_{j=1}^J r_{j,t}^{a-} \geq R_t^- \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} p\{r_{j,t}^{a+} \leq \bar{P}_{j,t}^a - \tilde{p}_{j,t}^a\} &\geq 1 - \varepsilon \\ p\{r_{j,t}^{a-} \leq \tilde{p}_{j,t}^a - \underline{P}_{j,t}^a\} &\geq 1 - \varepsilon \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $r_{j,t}^+$ 和 $r_{j,t}^-$ 分别表示 t 调度时段第 j 台 AGC 机组提供的正、负旋转备用的数量, R_t^+ 和 R_t^- 分别表示 t 调度时段电网所需要的最小正、负旋转备用的数量, ε 为调度员设定的可接受的风险水平。

结合方程 (4), 约束 (25) 可以转化为线性约束 (26)

$$\begin{cases} w_t + \frac{r_{j,t}^{a+} + p_{j,t}^a - \bar{P}_{j,t}^a}{\alpha_j} \leq CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\varepsilon) \\ CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(1 - \varepsilon) \leq w_t + \frac{p_{j,t}^a - \underline{P}_{j,t}^a - r_{j,t}^{a-}}{\alpha_j} \end{cases} \quad (26)$$

(2-2-5) 电网线路潮流约束, 表达式如下:

对 $\forall t = 1, 2, \dots, T; l = 1, 2, \dots, L$:

$$p \left\{ \left| \sum_{i=1}^N G_{l,i} p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J G_{l,j} \tilde{p}_{j,t}^a + \sum_{k=1}^K G_{l,k} \tilde{p}_{k,t}^w + \sum_{d=1}^D G_{l,d} p_{d,t}^d \right| \leq L_{l,t} \right\} \geq 1 - \eta \quad (27)$$

其中, $G_{l,i}$ 为电网中第 l 条线路对第 i 台火力发电机组有功出力的转移分布因子, $G_{j,l}$ 为第 l 条线路对第 j 个发电量自动控制机组有功出力的转移分布因子, $G_{k,l}$ 为第 l 条线路对第 k 个风电/光伏电站有功出力的转移分布因子, $G_{d,l}$ 为第 l 条线路对第 d 个节点负荷功率的转移分布因子, 各转移分布因子分别从电网调度中心获取, $L_{l,t}$ 为 t 调度时段第 l 条线路上的有功功率上限, η 为电网线路上的有功功率超过线路有功功率上限的风险水平, 由调度员设定。

结合方程 (4)，约束 (27) 可以转化为线性约束 (28)，

$$\begin{cases} CDF_{a_t \tilde{P}_t^w}^{-1}(1-\eta) \leq L_t - \left[\sum_{i=1}^N G_{l,i} p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J G_{l,j} p_{j,t}^a + \left(\sum_{j=1}^J G_{l,j} \alpha_j \right) \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w + \sum_{d=1}^D G_{l,d} p_{d,t}^d \right] \\ -L_t - \left[\sum_{i=1}^N G_{l,i} p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J G_{l,j} p_{j,t}^a + \left(\sum_{j=1}^J G_{l,j} \alpha_j \right) \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w + \sum_{d=1}^D G_{l,d} p_{d,t}^d \right] \leq CDF_{a_t \tilde{P}_t^w}^{-1}(\eta) \end{cases} \quad (28)$$

其中， $CDF_{a_t \tilde{P}_t^w}^{-1}(\cdot)$ 为随机变量 $a_t \tilde{P}_t^w$ 的累积分布函数的逆函数，满足：

$$CDF_{a_t \tilde{P}_t^w}^{-1}(F) = a_t^T \mu_t + a_t^T \Sigma_t a_t \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (29)$$

α_t 为 k 维向量，其第 k 个元素为 $G_{l,k} - \left(\sum_{j=1}^J G_{l,j} \alpha_j \right)$ 。

(3) 采用内点法，求解由式 (5)，(6)，(8)，(9)，(11)，(12)，(14) ~ (29) 确定的随机动态实时调度模型，得到 $p_{i,t}^s$ 、 $p_{j,t}^a$ 和 $p_{k,t}^w$ ，将其中的 $p_{i,t}^s$ 作为 t 调度时段第 i 个火电机组的计划出力， $p_{j,t}^a$ 作为第 j 个发电量自动控制机组的计划出力， $p_{k,t}^w$ 作为第 k 个风电/光伏电站的参考出力，实现基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度。

权利要求书

1、一种基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度方法，其特征在于该方法包括以下步骤：

(1) 建立电网中风电/光伏电站短期预测出力的多随机变量联合柯西分布模型，该柯西分布模型包括以下内容：

a、一个多风电/光伏电站短期预测出力的联合柯西分布的概率密度函数：

$$PDF_{\tilde{p}_t^w}(\tilde{p}_t^w; \mu_t, \Sigma_t) = \frac{\Gamma\left(\frac{1+K}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \pi^{\frac{K}{2}} |\Sigma_t|^{\frac{1}{2}} \left[1 + (x - \mu_t)^T \Sigma_t^{-1} (x - \mu_t)\right]^{\frac{1+K}{2}}}$$

其中， $PDF(\cdot)$ 表示随机变量的概率密度函数，概率密度函数通过对风电/光伏电站历史出力的拟合得到， t 为调度时段， K 为风电/光伏电站的数目， $\tilde{P}_t^w = (\tilde{p}_{1,t}^w, \tilde{p}_{2,t}^w, \dots, \tilde{p}_{k,t}^w)^T$ 为调度时段 t 所有风电/光伏电站实际出力的列向量，上标 T 为矩阵转置，上标 w 表示该变量描述风电/光伏电站， $\tilde{p}_{k,t}^w$ 表示 t 调度时段第 k 个风电/光伏电站的实际出力， $\mu_t = (\mu_{1,t}, \mu_{2,t}, \dots, \mu_{k,t})^T$ 表示 t 调度时段联合柯西分布概率密度函数的位置参数， $\mu_{k,t}$ 表示 t 调度时段第 k 个风电/光伏电站出力的边缘柯西分布的位置参数， Σ_t 表示 t 调度时段联合柯西分布概率密度函数的尺度参数；

b、形式为各风电/光伏电站出力线性组合的随机变量的概率描述，包括概率密度函数、累积分布函数以及累积分布函数的逆函数：

设 a 为 k 维列向量，那么随机变量 $a^T \tilde{P}_t^w$ 服从位置参数和尺度参数为 $(a^T \mu_t, a^T \Sigma_t a)$ 的一维柯西分布，其概率密度函数、累积分布函数以及累积分布函数的逆函数可以表达为以下形式：

$$\text{其中，概率密度函数为： } PDF_{a^T \tilde{P}_t^w}(x) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{a^T \Sigma_t a}{(x - a^T \mu_t)^2 + (a^T \Sigma_t a)} \right]$$

$$\text{累积分布函数为： } CDF_{a^T \tilde{P}_t^w}(x) = \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{x - a^T \mu_t}{\sqrt{a^T \Sigma_t a}} \right) + \frac{1}{2}$$

$$\text{累积分布函数的逆函数为： } CDF_{a^T \tilde{P}_t^w}^{-1}(F) = a^T \mu_t + \sqrt{a^T \Sigma_t a} \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right]$$

其中， $\tan$ 为正切函数， $\arctan$ 为反正切函数， F 为分位数；

(2) 建立一个基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型, 该随机动态实时调度模型由目标函数和约束条件组成, 具体步骤如下:

(2-1) 建立基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型的目标函数 f :

目标函数为使运行成本最小化, 表达式如下:

$$f = \min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^N CF_{i,t} (P_{i,t}^s) + \sum_{j=1}^J CF_{j,t} (P_{j,t}^a) + \sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^+ (\tilde{w}_t)] + \sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^- (\tilde{w}_t)] \right\}$$

其中, T 、 N 和 J 分别表示调度时段 t 的数量、火电机组数量以及发电量自动控制机组的数量, t 、 i 和 j 分别为调度时段、火电机组编号和发电量自动控制机组的编号, 上标 s 表示该变量描述火电机组, 上标“+”表示该变量描述正旋转备用, 上标“-”表示该变量描述负旋转备用, $P_{i,t}^s$ 表示第 i 台火电机组在 t 调度时段的计划出力, $p_{j,t}^a$ 表示第 j 个发电量自动控制机组在 t 调度时段内计划出力, $\tilde{w}_t$ 表示 t 调度时段所有风电/光伏电站实际出力的总和, $CF_{i,t} (P_{i,t}^s)$ 和 $CF_{j,t} (P_{j,t}^a)$ 分别表示火电机组和发电量自动控制机组的燃料成本:

$$\begin{aligned} CF_{i,t} (P_{i,t}^s) &= a_{i,t} (P_{i,t}^s)^2 + b_{i,t} P_{i,t}^s + c_{i,t} \\ CF_{j,t} (P_{j,t}^a) &= a_{j,t} (P_{j,t}^a)^2 + b_{j,t} P_{j,t}^a + c_{j,t} \end{aligned}$$

其中, $a_{i,t}, b_{i,t}, c_{i,t}$ 分别为 t 时段火电机组 i 的燃料成本的二次项系数、一次项系数和常数项, $a_{j,t}, b_{j,t}, c_{j,t}$ 分别为 t 时段发电量自动控制机组 j 的燃料成本的二次项系数、一次项系数和常数项,

$E(\cdot)$ 表示随机变量的期望值, $CR_{j,t}^+$ 表示在 t 调度时段内, 由于风电/光伏电站发电实际出力低于计划出力引起的正旋转备用的需求成本, 即高估风电/光伏电站出力的惩罚, 当风电/光伏电站的实际出力小于计划值时会调度发电量自动控制机组的正旋转备用以维持功率平衡, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} CR_{j,t}^+ (\tilde{w}_t) = \gamma_{j,t}^+ \cdot \max \{ \alpha_j \cdot (w_t - \tilde{w}_t), 0 \} \\ E[CR_{j,t}^+ (\tilde{w}_t)] = \gamma_{j,t}^+ \alpha_j \int_0^{w_t} (w_t - \tilde{\theta}_t) \varphi_t(\tilde{\theta}_t) d\tilde{\theta}_t \end{cases}$$

其中, $\gamma_{j,t}^+$ 为正旋转备用的成本系数, α_j 为第 j 个发电量自动控制机组的功率分配系数, 根据发电量自动控制机组的额定容量占发电量自动控制机组的总容量的比例确定, w_t 表示 t 调度时段所有风电/光伏电站的计划出力总和, $\tilde{w}_t$ 表示 t 时段所有风电/光伏电站的实际

出力总和，满足如下关系：

$$\tilde{p}_{j,t}^a = p_{j,t}^a - \alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t)$$

$$\sum_{j=1}^J \alpha_j = 1 (\alpha_j \geq 0)$$

$$w_t = \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w$$

$$\tilde{w}_t = \sum_{k=1}^K \tilde{p}_{k,t}^w$$

其中， $\tilde{p}_{j,t}^a$ 为第 j 个发电量自动控制机组的实际出力， $p_{k,t}^w$ 表示 t 调度时段第 k 个风电/光伏电站的计划出力， K 表示风电/光伏电站的数量；

$CR_{j,t}^-$ 表示在 t 时段内由于风电/光伏电站实际出力超过计划出力而引起的负旋转备用的需求成本，即低估风电/光伏电站出力的惩罚成本，当风电/光伏电站的实际出力大于计划值时会调度发电量自动控制机组的负旋转备用以维持功率平衡，具体表达式如下：

$$\begin{cases} CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t) = \gamma_{j,t}^- \cdot \max\{\alpha_j \cdot (\tilde{w}_t - w_t), 0\} \\ E[CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t)] = \gamma_{j,t}^- \alpha_j \int_{w_t}^{\bar{w}_t} (\tilde{w}_t - w_t) \varphi_t(\tilde{w}_t) d\tilde{w}_t \end{cases}$$

其中， $\gamma_{j,t}^-$ 为负旋转备用的成本系数， $\varphi_t(\tilde{w}_t)$ 为实际风电出力总和 $\tilde{w}_t$ 的概率密度函数， $\bar{w}_t$ 为所有风电/光伏电站在 t 调度时段出力的上界之和， $\bar{w}_t = \sum_{k=1}^K \bar{p}_{k,t}^w$ ， $\bar{p}_{k,t}^w$ 为 t 时段第 k 个风电/光伏电站的出力的上界；

根据上述步骤（1）的风电/光伏电站短期预测出力的多随机变量联合柯西分布模型，得到目标函数 f 的表达式中的后两项为：

$$\sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^+(\tilde{w}_t)] + \sum_{j=1}^J E[CR_{j,t}^-(\tilde{w}_t)] = \sum_{j=1}^J \left[A + B \cdot w_t - \frac{C \cdot \Sigma_{\tilde{w}_t}}{2} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{w_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)^2 \right) + C \cdot (w_t - \mu_{\tilde{w}_t}) \arctan \frac{w_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right]$$

其中， $\mu_{\tilde{w}_t} = a_{\tilde{w}_t}^T \mu_t$ ， $\Sigma_{\tilde{w}_t} = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}}$ ， $a_{\tilde{w}_t}$ 为所有元素全为 1 的 K 维列向量， K 为风电/光伏电站的数目， A, B, C 均为常数具体表达式如下：

$$A = \frac{\alpha_j \cdot \Sigma_{\tilde{w}_t}}{2\pi} \left(\gamma_{j,t}^+ \ln \left(1 + \left(\frac{\mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)^2 \right) + \gamma_{j,t}^- \ln \left(1 + \left(\frac{\bar{w}_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)^2 \right) \right) + \frac{\alpha_j \cdot \Sigma_{\tilde{w}_t}}{\pi} \left(\gamma_{j,t}^+ \arctan \frac{-\mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} + \gamma_{j,t}^- \arctan \frac{\bar{w}_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)$$

$$B = -\frac{\alpha_j}{\pi} \left(\gamma_{j,t}^+ \arctan \frac{-\mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} + \gamma_{j,t}^- \arctan \frac{\bar{w}_t - \mu_{\tilde{w}_t}}{\Sigma_{\tilde{w}_t}} \right)$$

$$C = \frac{\gamma_{j,t}^+ \alpha_j}{\pi} + \frac{\gamma_{j,t}^- \alpha_j}{\pi}$$

(2-2) 上述基于风电/光伏电站出力柯西分布的随机动态实时调度模型的约束条件, 包括:

(2-2-1) 电网功率平衡约束, 表达式如下:

$$\sum_{i=1}^N p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J p_{j,t}^a + \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w = \sum_{d=1}^D p_{d,t}^d$$

其中, $p_{d,t}^d$ 为 t 调度时段、风电/光伏电站和火电机组所在电网的第 d 个节点的负荷量,

D 表示负荷的总数, 同时表示电网中节点的个数;

(2-2-2) 电网机组出力的上、下限约束, 包括:

$$\underline{p}_{j,t}^a \leq p_{j,t}^a \leq \bar{p}_{j,t}^a, \quad \underline{p}_{i,t}^s \leq p_{i,t}^s \leq \bar{p}_{i,t}^s, \quad 0 \leq p_{k,t}^w \leq \bar{p}_{k,t}^w$$

$$\begin{cases} \alpha_j w_t + p_{j,t}^a - \bar{p}_{j,t}^a \leq \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\delta) \\ \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(1-\delta) \leq \alpha_j w_t + p_{j,t}^a - \underline{p}_{j,t}^a \end{cases}$$

其中, $t = 1, \dots, T$, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, J$, $k = 1, \dots, K$, $\underline{p}_{j,t}^a$ 和 $\bar{p}_{j,t}^a$ 分别为第 j 个发电量自动控制机组在 t 调度时段出力的上下界, $\underline{p}_{i,t}^s$ 和 $\bar{p}_{i,t}^s$ 分别为第 i 个火电机组在 t 时段出力的上下界, δ 为调度员设定的可接受的风险水平, $CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\cdot)$ 为 $\tilde{w}_t$ 的累积分布函数的逆函数, $\tilde{w}_t$ 表示 t 时段所有风电/光伏电站的实际出力总和,

$$CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(F) = \mu_{\tilde{w}_t} + \Sigma_{\tilde{w}_t} \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right], \quad \mu_{\tilde{w}_t} = a_{\tilde{w}_t}^T \mu_t, \quad \Sigma_{\tilde{w}_t} = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}}, \quad \mu_{\tilde{w}_t} = a_{\tilde{w}_t}^T \mu_t,$$

$\Sigma_{\tilde{w}_t} = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}}$, $a_{\tilde{w}_t}$ 为所有元素全为 1 的 K 维列向量, K 表示风电/光伏电站的数量;

(2-2-3) 电网中火电机组和发电量自动控制机组的爬坡约束, 表达式如下:

对 $\forall t = 2, 3, \dots, T; i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, J$:

$$-RD_{i,t}^s \cdot \Delta T \leq p_{i,t}^s - p_{i,t-1}^s \leq RU_{i,t}^s \cdot \Delta T$$

$$\begin{cases} \alpha_j w_t - RU_{j,t}^a \cdot \Delta T \leq \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\beta) \\ \alpha_j \cdot CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(1-\beta) \leq \alpha_j w_t + RD_{j,t}^a \cdot \Delta T \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{p_{j,t}^a - p_{j,t-1}^a + \alpha_j (w_t - w_{t-1}) - RU_{j,t}^a \cdot \Delta T}{\alpha_j} \leq CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}(\beta) \\ CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}(1-\beta) \leq \frac{p_{j,t}^a - p_{j,t-1}^a + \alpha_j (w_t - w_{t-1}) + RD_{j,t}^a \cdot \Delta T}{\alpha_j} \end{cases}$$

其中, $RU_{i,t}^s$ 和 $RD_{i,t}^s$ 分别为 t 调度时段第 i 台火电机组向上、向下爬坡率, $RU_{j,t}^a$ 和 $RD_{j,t}^a$ 分别表示 t 时段第 j 台发电量自动控制机组向上、向下爬坡率, ΔT 表示相邻两个调度时段之间的调度间隔, β 为调度员设定的可接受风险水平, $CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}$ 表示 $w_{t,t-1}$ 的累积分布函数的逆函数, $w_{t,t-1} = \tilde{w}_t - \tilde{w}_{t-1}$, $CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}$ 的表达式如下:

$$CDF_{w_{t,t-1}}^{-1}(F) = \mu_{w_{t,t-1}}^j + \Sigma_{w_{t,t-1}}^j \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right], \mu_{w_{t,t-1}}^j = a_{\tilde{w}_t} \mu_t - a_{\tilde{w}_{t-1}} \mu_{t-1}, \Sigma_{w_{t,t-1}}^j = \sqrt{a_{\tilde{w}_t}^T \Sigma_t a_{\tilde{w}_t}} + \sqrt{a_{\tilde{w}_{t-1}}^T \Sigma_{t-1} a_{\tilde{w}_{t-1}}}$$

(2-2-4) 发电量自动控制机组的旋转备用约束, 具体表达式如下:

对 $\forall t = 1, 2, \dots, T; i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, J$,

$$\begin{aligned} 0 \leq r_{j,t}^{a+} \leq RU_{j,t}^a \cdot \Delta T, \sum_{j=1}^J r_{j,t}^{a+} &\geq R_t^+ \\ 0 \leq r_{j,t}^{a-} \leq RD_{j,t}^a \cdot \Delta T, \sum_{j=1}^J r_{j,t}^{a-} &\geq R_t^- \end{aligned}$$

$$\begin{cases} w_t + \frac{r_{j,t}^{a+} + p_{j,t}^a - \bar{p}_{j,t}^a}{\alpha_j} \leq CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(\varepsilon) \\ CDF_{\tilde{w}_t}^{-1}(1-\varepsilon) \leq w_t + \frac{p_{j,t}^a - \underline{p}_{j,t}^a - r_{j,t}^{a-}}{\alpha_j} \end{cases}$$

其中, $r_{j,t}^+$ 和 $r_{j,t}^-$ 分别表示 t 调度时段第 j 台发电量自动控制机组提供的正负旋转备用的数量, R_t^+ 和 R_t^- 分别表示 t 调度时段电网所需要的最小正、负旋转备用的数量, ε 为调度员设定的可接受的风险水平;

(2-2-5) 电网线路潮流约束, 表达式如下:

对 $\forall t = 1, 2, \dots, T; l = 1, 2, \dots, L$:

$$\begin{cases} CDF_{a_l \tilde{P}_t^w}^{-1}(1-\eta) \leq L_l - \left[\sum_{i=1}^N G_{l,i} p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J G_{l,j} p_{j,t}^a + \left(\sum_{j=1}^J G_{l,j} \alpha_j \right) \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w + \sum_{d=1}^D G_{l,d} p_{d,t}^d \right] \\ -L_l - \left[\sum_{i=1}^N G_{l,i} p_{i,t}^s + \sum_{j=1}^J G_{l,j} p_{j,t}^a + \left(\sum_{j=1}^J G_{l,j} \alpha_j \right) \sum_{k=1}^K p_{k,t}^w + \sum_{d=1}^D G_{l,d} p_{d,t}^d \right] \leq CDF_{a_l \tilde{P}_t^w}^{-1}(\eta) \end{cases}$$

其中, $G_{l,i}$ 为电网中第 l 条线路对第 i 台火力发电机组有功出力的转移分布因子, $G_{j,l}$ 为第 l 条线路对第 j 个发电量自动控制机组有功出力的转移分布因子, $G_{k,l}$ 为第 l 条线路对第 k 个风电/光伏电站有功出力的转移分布因子, $G_{d,l}$ 为第 l 条线路对第 d 个节点负荷功率的转移分布因子, 各转移分布因子分别从电网调度中心获取, $L_{l,t}$ 为 t 调度时段第 l 条线路上的有功功率上限, η 为电网线路上的有功功率超过线路有功功率上限的风险水平, 由调度员设定, $CDF_{a_l \tilde{P}_t^w}^{-1}(\cdot)$ 为 $a_l \tilde{P}_t^w$ 的累积分布函数的逆函数, 满足:

$$CDF_{a_l \tilde{P}_t^w}^{-1}(F) = a_l^T \mu_t + a_l^T \Sigma_t a_l \tan \left[\pi \left(F - \frac{1}{2} \right) \right]$$

α_l 为 K 维向量, 其第 k 个元素为 $G_{l,k} - \left(\sum_{j=1}^J G_{l,j} \alpha_j \right)$;

(3) 采用内点法, 求解上述步骤 (2) 中的目标函数和约束条件组成的随机动态实时调度模型, 得到 $p_{i,t}^s$ 、 $p_{j,t}^a$ 和 $p_{k,t}^w$, 将其中的 $p_{i,t}^s$ 作为 t 调度时段第 i 个火电机组的计划出力, $p_{j,t}^a$ 第 j 个发电量自动控制机组的计划出力, $p_{k,t}^w$ 作为第 k 个风电/光伏电站的参考出力, 实现基于风/光出力柯西分布的火电机组动态实时调度。

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/100600

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/38(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 风电, 风光, 调度, 动态, 火电机组, 统计, 柯西分布, 建模, 拟合, real w time, distribution, wind, photovoltaic, power

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109755959 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 14 May 2019 (2019-05-14) description, paragraphs [0006]-[0154]	1
A	CN 107330546 A (WUHAN UNIVERSITY) 07 November 2017 (2017-11-07) description, paragraphs [0110]-[0307], and figures 1-5	1
A	CN 103050998 A (XI'AN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 17 April 2013 (2013-04-17) entire document	1
A	CN 108879787 A (HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 23 November 2018 (2018-11-23) entire document	1
A	CN 104242354 A (STATE GRID CORPORATION OF CHINA et al.) 24 December 2014 (2014-12-24) entire document	1
A	US 2017371306 A1 (ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE EPFL) 28 December 2017 (2017-12-28) entire document	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

29 October 2019

Date of mailing of the international search report

18 November 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/100600

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109755959	A	14 May 2019	None			
CN	107330546	A	07 November 2017	None			
CN	103050998	A	17 April 2013	CN	103050998	B	05 November 2014
CN	108879787	A	23 November 2018	None			
CN	104242354	A	24 December 2014	CN	104242354	B	05 January 2018
US	2017371306	A1	28 December 2017	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/100600

A. 主题的分类

H02J 3/38(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H02J

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC:风电, 风光, 调度, 动态, 火电机组, 统计, 柯西分布, 建模, 拟合, real w time, distribution, wind, photovoltaic, power

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 109755959 A (清华大学) 2019年 5月 14日 (2019 - 05 - 14) 说明书第[0006]-[0154]段	1
A	CN 107330546 A (武汉大学) 2017年 11月 7日 (2017 - 11 - 07) 说明书第[0110]-[0307]段, 附图1-5	1
A	CN 103050998 A (西安理工大学) 2013年 4月 17日 (2013 - 04 - 17) 全文	1
A	CN 108879787 A (合肥工业大学) 2018年 11月 23日 (2018 - 11 - 23) 全文	1
A	CN 104242354 A (国家电网公司 等) 2014年 12月 24日 (2014 - 12 - 24) 全文	1
A	US 2017371306 A1 (ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE EPFL) 2017年 12月 28日 (2017 - 12 - 28) 全文	1

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 10月 29日

国际检索报告邮寄日期

2019年 11月 18日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

兰霞

电话号码 86-(10)-53961511

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/100600

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109755959	A	2019年 5月 14日	无	
CN	107330546	A	2017年 11月 7日	无	
CN	103050998	A	2013年 4月 17日	CN 103050998	B 2014年 11月 5日
CN	108879787	A	2018年 11月 23日	无	
CN	104242354	A	2014年 12月 24日	CN 104242354	B 2018年 1月 5日
US	2017371306	A1	2017年 12月 28日	无	