

(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
2022 年 2 月 3 日 (03.02.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/022101 A1

(51) 国际专利分类号:

H02J 3/46 (2006.01) *G06Q 10/06* (2012.01)
H02J 3/38 (2006.01) *G06Q 50/06* (2012.01)
H02J 3/24 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/099423

(22) 国际申请日: 2021 年 6 月 10 日 (10.06.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:

202010748432.6 2020 年 7 月 30 日 (30.07.2020) CN

(71) 申请人: 国网甘肃省电力公司电力科学研究院 (STATE GRID GANSU ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE) [CN/CN]; 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 国网甘肃省电力公司 (STATE GRID GANSU ELECTRIC POWER COMPANY) [CN/CN]; 中国甘肃省兰州市城关区北滨河东路 8 号, Gansu 730030 (CN)。 国网青海省电力公司电力科学研究院 (STATE GRID QINGHAI ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE) [CN/CN]; 中国青海省西宁市城西区五四西路 8 号, Qinghai 810000 (CN)。 国网青海省电力公司 (STATE GRID QINGHAI ELECTRIC POWER COMPANY) [CN/CN]; 中国青海省西宁市城西区胜利路 89 号, Qinghai 810000 (CN)。 国家电网有限公司 (STATE GRID

CORPORATION OF CHINA) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街 86 号, Beijing 100031 (CN)。

(72) 发明人: 周强 (ZHOU, Qiang); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 马彦宏 (MA, Yanhong); 中国甘肃省兰州市城关区北滨河东路 8 号, Gansu 730030 (CN)。 张彦琪 (ZHANG, Yanqi); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 吴悦 (WU, Yue); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 汪宁渤 (WANG, Ningbo); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 马志程 (MA, Zhicheng); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 韩旭杉 (HAN, Xushan); 中国甘肃省兰州市城关区北滨河东路 8 号, Gansu 730030 (CN)。 金国刚 (JIN, Guogang); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 赵龙 (ZHAO, Long); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 王定美 (WANG, Dingmei); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 吕清泉 (LV, Qingquan); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 张金平 (ZHANG, Jinping); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 高鹏飞 (GAO, Pengfei); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路 249 号, Gansu 730070 (CN)。 张睿骁 (ZHANG, Ruixiao); 中国

(54) Title: METHOD FOR CONTROLLING COORDINATED PEAK REGULATION OF EMERGENCY SOURCE NETWORK IN SENDING-END GRID FAULT STATE

(54) 发明名称: 一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法

(57) Abstract: Disclosed in the present invention is a method for controlling coordinated peak regulation of an emergency source network in a sending-end grid fault state, comprising the following steps: S1, evaluating the schedulability of a wind cluster virtual power generation unit; S2, establishing a calculation method for a schedulability index of the wind cluster virtual power generation unit; S3, analyzing a source-load peak regulation resource policy; and S4, allocating a control policy of a connecting line peak regulation. The present invention has the beneficial effects: the present invention first analyzes real-time scheduling characteristics of wind power generation participating in real-time power balance, provides the specific evaluation index and calculation method, and provides example verification; and then, provides a real-time scheduling optimization policy in view of a demand-side response resource, performs a unified coordination operation on a direct current line and an alternating current line for the connecting line, provides a method for controlling coordinated peak regulation of an emergency source network in a sending-end grid fault state, ensuring normal operation.

(57) 摘要: 本发明公开了一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法, 包括以下步骤 S1: 对集群风电虚拟机组可调度性的作出评估; S2: 建立集群风电机组可调度性指标的计算方法; S3: 对源荷调峰资源策略作出分析; S4: 对联络线调峰的控制策略作出分配, 本发明的有益效果是, 本发明首先分析了风电参与实时功率平衡的实时调度特性, 并给出了具体评价指标和计算方法, 并给出了算例验证; 而后, 结合需求侧响应资源给出了实时调度优化策略, 并针对联络线进行了直流、交流线路统一协调运行, 为送端电网故障状态下提供紧急源网协调调峰的控制方法, 保证正常运行。

甘肃省兰州市安宁区万新北路249号, Gansu 730070 (CN)。张健美(ZHANG, Jianmei); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路249号, Gansu 730070 (CN)。李津(LI, Jin); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路249号, Gansu 730070 (CN)。张珍珍(ZHANG, Zhenzhen); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路249号, Gansu 730070 (CN)。刘丽娟(LIU, Lijuan); 中国甘肃省兰州市安宁区万新北路249号, Gansu 730070 (CN)。范越(FAN, Yue); 中国青海省西宁市城西区胜利路89号, Qinghai 810000 (CN)。苟晓侃(GOU, Xiaokan); 中国青海省西宁市城西区胜利路89号, Qinghai 810000 (CN)。王学斌(WANG, Xuebin); 中国青海省西宁市城西区五四西路8号, Qinghai 810000 (CN)。

(74) 代理人: 广州三环专利商标代理有限公司 (SCIHEAD IP LAW FIRM); 中国广东省广州市越秀区先烈中路80号汇华商贸大厦1508室, Guangdong 510070 (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, IT, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法

技术领域

本发明涉及一种协调调峰控制方法，特别涉及一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法，属于电气工程技术领域。

背景技术

在高比例可再生能源系统中，通常将风电/光伏以“负负荷”的被动形式参与系统的调度，这将需要电力系统提供大量的灵活性资源满足其波动性，促进消纳，但在系统调峰电源出现非计划停运等系统紧急状态时，系统出现调峰缺额，风电/光伏做为一种“波动性供能机组”也可以在系统紧急状态下提供调峰能力，由于风电/光伏具有随机性和波动性，不像火电等常规机组一样出力具有稳定可控的特点，因此需要对风电/光伏的可调度性出力进行研究并定量评估，计算风电/光伏可以给系统提供的调峰能力。

发明内容

本发明的目的在于提供一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法，以解决上述背景技术中提出的问题。

为实现上述目的，本发明提供如下技术方案：一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法，包括以下步骤：

- S1：对集群风电虚拟机组的可调度性作出评估；
- S2：建立集群风电机组可调度性指标的计算方法；
- S3：对源荷调峰资源策略作出分析；
- S4：对联络线调峰的控制策略作出分配。

作为本发明的一种优选技术方案，所述 S1 中的评估方法为：

- a1：对风电特性概率分布及相关系数的时变特性进行统计分析；通过关注的风电特性包括波动性和不确定性两个

方面，集群风电发电单元（wind cluster virtual power generation unit，WVPG）的波动性 $\Delta P^{\text{VPG}}(t)$ 和不确定性 $\varepsilon^{\text{VPG}}(t)$ 可表示为：

$$\Delta P^{\text{VPG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \Delta P_i^{\text{w}}(t) \quad (1),$$

$$\varepsilon^{\text{VPG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \varepsilon_i^{\text{w}}(t) \quad (2),$$

式（1）和（2）中， n_k 为 WVPG 内风电场个数， t 为时间， $\Delta P_i^{\text{w}}(t)$ 为第 i 个风电场的波动功率， $\varepsilon_i^{\text{w}}(t)$ 为第 i 个风电场的不确定性；

- a2：依据边缘概率分布及秩相关系数矩阵的离线条件建立模型集；包括以下步骤：

a2.1，建立 WVPG 内部各风电场的波动性 $\Delta P_i^{\text{w}}(t)$ 和不确定性 $\varepsilon_i^{\text{w}}(t)$ 的条件相依概率分布离线模型集；

a2.2，建立 WVPG 内部多个风电场之间波动性 $\Delta P_i^{\text{w}}(t)$ 和不确定性 $\varepsilon_i^{\text{w}}(t)$ 累积概率分布函数的条件相依秩相关系数矩阵 $\mathbf{R}_{\varepsilon}^{\text{VPG}}, \mathbf{R}_{\Delta P}^{\text{VPG}}$ 的离线模型集；

a2.3，采用基于遗传算法的蒙特卡罗模拟方法，滚动建立每时刻在各风电场边缘条件相依概率分布，和多风电场条件相依秩相关系数矩阵共同约束下，WVPG 的条件概率分布以及内部各风电场的条件概率分布；

- a3：根据 WVPG 的时变概率分布在线采样计算，包括以下步骤：

a3.1，初始化，随机生成 S 个 $n_s \times n_k$ 阶矩阵作为遗传算法的初始种群，其中 n_s 为采样规模， n_k 为 WVPG 内风电场个数，矩阵元素均为 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数；

a3.2，从离线模型集中选取秩相关系数矩阵，首先根据时刻 t 风电场 i,j 预测风向，计算风向差异性系数；设 $(\tilde{F}_{\varepsilon,i,m}, \tilde{F}_{\varepsilon,j,m})$ 分别为第 m 个随机矩阵中，第 i 列和第 j 列元素组成的数据对，其中， $m \in (1, 2, \dots, S)$ ；将 $(\tilde{F}_{\varepsilon,i,m}, \tilde{F}_{\varepsilon,j,m})$ 中数据对划分为若干子集；设 $\tilde{R}_{\varepsilon,ij,c}$ 为根据第 m 个随机矩阵中风电场 i 和 j 的第 c 个子集元素计算的秩相关系数；设 $R_{\varepsilon,ij,c}$ 为离线模型集中与 $\tilde{R}_{\varepsilon,ij,c}$ 条件集合取值相同的秩相关系数，可设置第 m 个矩阵 $\mathbf{A}_m$ 目标函数为：

$$G(\mathbf{A}_m) = \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1 \& i \neq j}^{n_k} \sum_{c=1}^{n_c} (\tilde{R}_{\varepsilon,ij,c} - R_{\varepsilon,ij,c})^2 \quad (3);$$

a3.3, 利用遗传算法求解式 (3), 其中经过遗传和变异改变 S 个随机矩阵中的元素, 使得最优矩阵的秩相关系数矩阵逼近目标值 $\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon,ij,c}$, 即使得中 $G(\mathbf{A}_m)$ 尽可能小, 其中, 最优矩阵为每次迭代中使 $G(\mathbf{A}_m)$ 最小的矩阵;

a3.4, 收敛性判断, 设 $\mathbf{A}_k^*$ 为遗传算法第 k 代的最优矩阵, $\mathbf{A}_0^*$ 为初始最优矩阵, 则第 k 代最优矩阵相对于初始情况的改进为 $G(\mathbf{A}_k^*) - G(\mathbf{A}_0^*)$; 在第 k 代, 若 $|G(\mathbf{A}_k^*) - G(\mathbf{A}_{k-1}^*)| \leq \sigma |G(\mathbf{A}_k^*) - G(\mathbf{A}_0^*)|$ 则遗传算法迭代停止, σ 为算法收敛性系数, 否则转 a3.2;

a3.5, 根据时刻 t 风电场 i 不确定性条件集合取值, 从离线模型集中选取风电场 i 对应的累积分布函数 $F_{\varepsilon,i}(t)$; 设 $a_{i,g}^*$ $g=1,2,\dots,n_s$ 为 a3.4 中最优矩阵中第 i 列第 g 个元素, 则风电场 i 的第 g 个采样样本为 $\tilde{e}_{i,g}^W(t) = F_{\varepsilon,i}^{-1}(a_{i,g}^*)$, WVPG 的第 g 个采样样本为 $\tilde{e}_g^{\text{VPG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \tilde{e}_{i,g}^W(t)$;

a3.6, 进行样本时间相关性校核;

a3.7, 根据样本统计时刻 t 各风电场及 WVPG 不确定性的频率分布, 当采样规模 n_s 足够大时, 即为离散概率分布的估计; 由此, 可得到风电场 i 和 WVPG 时刻 t 不确定性时变概率分布离散估计 $\tilde{f}_{\varepsilon,i,t}^W$ 和 $\tilde{f}_{\varepsilon,t}^{\text{VPG}}$ 。

作为本发明的一种优选技术方案, 所述 S2 中的计算方法为:

b1: 可发功率的计算; 可发功率指 WVPG 时刻 t 实际出力的可能取值; 火电机组的可发功率为最小稳燃出力和装机容量之间任意点值, 当其在运行运行时, 不同时刻可发功率范围均不变; 而 WVPG 的可发功率服从一概率分布, 且不同时刻的可发功率概率分布会随着功率预测值和不确定性概率分布的变化而时变;

定义 WVPG 时刻 t 可发功率如式 (4):

$$P_a^{\text{VPG}}(t) = p_f^{\text{VPG}}(t) + \varepsilon^{\text{VPG}}(t) \quad (4),$$

式中, $P_a^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 可发功率 (单位为 MW), 为随机变量, 对应的时变概率分布为 $\tilde{f}_{a,t}^{\text{VPG}}$; $p_f^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 功率点预测值 (MW); $\varepsilon^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 出力不确定性随机变量 (MW), 对应的时变概率分布为 $\tilde{f}_{\varepsilon,t}^{\text{VPG}}$;

可发功率概率分布的计算方法如下:

(1) 将 WVPG 时刻 t 的不确定性的多状态概率分布 $\tilde{f}_{\varepsilon,t}^{\text{VPG}}$ 做平移运算, 平移长度为预测值 $p_f^{\text{VPG}}(t)$; 设 $\tilde{\varepsilon}_i, \tilde{\varepsilon}_i'$ 分别为平移前后 $\tilde{f}_{\varepsilon,t}^{\text{VPG}}$ 第 i 个状态的取值, $\tilde{P}_{\varepsilon,i}, \tilde{P}_{\varepsilon,i}'$ 分别为相应的状态概率, 则有:

$$G(\mathbf{A}_m) = \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1 \& i \neq j}^{n_k} \sum_{c=1}^{n_c} (\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon,ij,c} - \mathcal{R}_{\varepsilon,ij,c})^2 \quad (3),$$

(2) WVPG 的可发功率最小值为 0, 因此, 需将平移后的概率分布从取值为 0 处进行向下截断运算; 设平移后概率分布的第 $1 \sim a$ 个状态取值小于 0, 则向下截断后 0 状态对应的概率 $\tilde{P}_{\varepsilon 0}^*$ 为:

$$\tilde{P}_{\varepsilon 0}^* = \tilde{P}_{\varepsilon 0}' + \sum_{i=1}^a \tilde{P}_{\varepsilon,i}' \quad (5),$$

式 (5) 中, $\tilde{P}_{\varepsilon 0}'$ 为在 0 处进行截断运算前, 多状态分布取值为 0 的概率, 若截断前分布无取值为 0 的状态, 则 $\tilde{P}_{\varepsilon 0}' = 0$;

b2: 可发功率极限的计算; 可发功率极限指时刻 t 时 WVPG 可发功率的最大、最小值; 火电机组出力上限为装机容量, 出力下限为最小稳燃出力, 在各时刻均为固定值; WVPG 可发功率极限为一定置信水平下概率分布的上下边界值, 并且会随着可发功率概率分布的时变而变化;

基于风险价值理论, 定义时刻 t 时 WVPG 可发功率上限如式 (6):

$$p_{\max}^{\text{VPG}}(t) = \min \left[a : P \{ P_a^{\text{VPG}}(t) \leq a \} \geq \beta \right] \quad (6),$$

式 (6) 中, $p_{\max}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 可发功率上限 (MW); β 为置信概率; $p_{\max}^{\text{VPG}}(t)$ 含义为以超过 β 的概率确信, WVPG 时刻 t 可发功率小于等于 a , 所有 a 中最小值为出力上限;

定义时刻 t 时 WVPG 可发功率下限如式 (7):

式(7)中, $p_{\min}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 可发功率下限 (MW); 含义为以超过 β 概率确信, WVPG 时刻 t 可发功率

大于等于 b , 所有 b 中最大值为可发功率下限;

可发功率极限指标计算方法:

设 $\tilde{f}_{a|t}^{\text{VPG}}$ 多状态概率分布的第 i 个状态值和状态概率分别为 $\tilde{p}_{a|t,i}, \tilde{P}_{a|t,i}$, 以可发功率上限为例, 若 $\tilde{f}_{a|t}^{\text{VPG}}$ 的第 b 个状态值对应的累积概率满足式 (8):

$$\sum_{i=1}^b \tilde{P}_{a|t,i} \leq \beta < \sum_{i=1}^{b+1} \tilde{P}_{a|t,i} \quad (8),$$

则可发功率上限为式 (9):

$$p_{\max}^{\text{VPG}}(t) = \tilde{p}_{a|t,b} + (\tilde{p}_{a|t,b+1} - \tilde{p}_{a|t,b}) \frac{\left(\beta - \sum_{i=1}^b \tilde{P}_{a|t,i} \right)}{\tilde{P}_{a|t,b+1}} \quad (9),$$

式 (9) 中, $\tilde{p}_{a|t,b+1} - \tilde{p}_{a|t,b}$ 表示第 $b+1$ 个和第 b 个状态的状态值取值之差, $\left(\beta - \sum_{i=1}^b \tilde{P}_{a|t,i} \right) / \tilde{P}_{a|t,b+1}$ 表示置信概率 β 和第 b 个状态的累积概率之差, 占第 $b+1$ 个和第 b 个状态累积概率之差的比例;

b3: 出力调节范围的计算; 出力调节范围指 WVPG 时刻 t 出力向上/向下调节极限; 火电机组出力调节范围等于可发功率上下限决定的范围; WVPG 出力调节范围由可发功率上下限和控制手段共同决定;

WVPG 时刻 t 出力上调极限 $p_{r,\max}^{\text{VPG}}(t)$ (MW) 等于可发功率上限 $p_{\max}^{\text{VPG}}(t)$; 出力下调极限的确定有两种情况: 当允许切机控制时, WVPG 出力可下调至 0, 此时 $p_{r,\min}^{\text{VPG}}(t) = 0$; 当仅允许桨距角调节时, 设风电机组功率下调极限 (MW) 为可发的功率的 $k\%$, 则出力下调极限可表示为:

$$p_{r,\min}^{\text{VPG}}(t) = k\% E(P_a^{\text{VPG}}(t)) \quad (10);$$

b4: 出力调节范围的计算; 火电机组爬坡率为一固定值, 而 WVPG 爬坡率由其出力波动性决定, 是波动性概率分布 $\tilde{f}_{\Delta P|t}^{\text{VPG}}$ 在一定置信概率下的上下界边界值。同时, 在调度模型中对 WVPG 爬坡率极限的确定, 还需考虑调度规程对单位时间内允许的风电功率波动范围限制;

首先, 定义 WVPG 时刻 t 由出力波动性决定的上爬坡率极限 $r_{ul}^{\text{VPG}}(t)$ (MW/min) 如式 (11) 所示:

$$r_{ul}^{\text{VPG}}(t) = \min \left[a : P \{ \Delta P^{\text{VPG}}(t) \leq a \} \geq \beta \right] \quad (11),$$

式中, $\Delta P^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 出力波动性随机变量; β 为置信概率; $r_{ul}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由波动性决定的上爬坡率极限, 为正值; 式 (11) 含义为以超过 β 的概率确信波动性取值小于等于 a , 所有 a 中最小值为波动特性决定的上爬坡率极限;

定义 WVPG 时刻 t 由出力波动性决定的下爬坡率极限 $r_{dl}^{\text{VPG}}(t)$ (MW/min) 如式 (12) 所示:

$$r_{dl}^{\text{VPG}}(t) = \max \left[b : P \{ \Delta P^{\text{VPG}}(t) \geq b \} \geq \beta \right] \quad (12),$$

式 (12) 中, $r_{dl}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由出力波动性决定的下爬坡率极限, 为负值; 式 (12) 含义为以超过 β 的概率确信波动性的取值大于等于 b , 所有 b 中最大值为波动性决定的下爬坡率极限;

综合考虑由出力波动性决定的爬坡率极限, 以及调度规程对单位时间内允许的风电功率波动范围的限制, 可按式 (13)、(14) 分别确定调度模型中 WVPG 的爬坡率下、上限值;

WVPG 上爬坡率极限为:

$$r_u^{\text{VPG}}(t) = \min \left[r_{ul}^{\text{VPG}}(t), r_{u2}^{\text{VPG}}(t) \right] \quad (13),$$

式 (13) 中, $r_{u2}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由调度规程决定的上爬坡率极限 (MW/min); $r_u^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 的上爬坡率极限 (MW/min);

当 $r_{ul}^{\text{VPG}}(t) < r_{u2}^{\text{VPG}}(t)$ 时, 表明从时刻 $t-1$ 到时刻 t , 波动性决定的上爬坡极限低于调度规程限制, 为避免对功率上升

当 $r_{u1}^{VPG}(t) > r_{u2}^{VPG}(t)$ 时, 表明从时刻 $t-1$ 到时刻 t , 波动性决定的上爬坡极限高于调度规程限制, 为避免功率上升过快, 应将上爬坡率极限设置为 $r_u^{VPG}(t) = r_{u2}^{VPG}(t)$;

WVPG 下爬坡率极限为:

$$r_d^{VPG}(t) = \min[r_{d1}^{VPG}(t), r_{d2}^{VPG}(t)] \quad (14),$$

式 (14) 中, $r_{d2}^{VPG}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由调度规程决定的下爬坡率极限 (MW/min), 为负值; $r_{d1}^{VPG}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 的下爬坡率极限 (MW/min), 为负值;

若 $r_{d1}^{VPG}(t) < r_{d2}^{VPG}(t)$, 表明从时刻 $t-1$ 到时刻 t , 波动性决定的出力下降过快, 为避免对下爬坡率的低估, 应将下爬坡率极限设置为 $r_d^{VPG}(t) = r_{d1}^{VPG}(t)$;

若 $r_{d1}^{VPG}(t) > r_{d2}^{VPG}(t)$, 表明从时刻 $t-1$ 到时刻 t , 出力向下波动的速度小于调度规程要求, 必要时可通过弃风等控制手段增加下爬坡率, 下爬坡率极限设置为 $r_d^{VPG}(t) = r_{d2}^{VPG}(t)$;

爬坡率指标计算方法:

对 WVPG 时刻 t 波动性的多状态概率分布 $\tilde{f}_{\Delta P|t}^{VPG}$ 进行分位点运算, 即可得到由出力波动特性决定的上下爬坡率极限 $r_{u1}^{VPG}(t), r_{d1}^{VPG}(t)$; 然后, 按照式 (13)、(14) 定义即可求得当前时刻 WVPG 的爬坡率极限值。

作为本发明的一种优选技术方案, 所述 S3 中的分析方法为:

c1. 变量

c1.1. 整数变量;

① 机组 i 在 t 时刻的工作启停状态变量 $v(i, t)$, $v(i, t) = 1$ 表示机组 i 在 t 时段处于开机状态, 而 $v(i, t) = 0$ 则代表处于停机状态;

② 机组 i 在 t 时刻的转换状态变量 $y(i, t)$, $y(i, t) = 1$ 表示机组 i 在 t 时段由关机变为开机, 而 $y(i, t) = 0$ 则表示机组处于其它状态;

③ 机组 i 在 t 时刻的转换状态变量 $z(i, t)$, $z(i, t) = 1$ 表示机组 i 在 t 时段由开机变为关机, 而 $z(i, t) = 0$ 则表示机组处于其它状态;

④ 机组停机时间状态变量 $\omega(i, t, j)$, $\omega(i, t, j) = 1$ 表示表示的是机组 i 在 t 时刻已经停机 j 小时, $\omega(i, t, j) = 0$ 表示机组处于其它状态;

添加一个 0-1 变量 $Tr(i, t)$ 表示可平移负荷的启动时间, $Tr(i, t) = 1$ 表示可平移负荷 i 在 t 时段开始运行, $Tr(i, t) = 0$ 表示可平移负荷 i 不是从 t 时段开始运行的;

c1.2. 连续变量

机组 i 在 t 时段的出力 $P(i, t)$ 。

c2. 目标函数

$$\min_{p(i,t), y(i,t)} \sum_{t=1}^{TT} \sum_{i=1}^{NG} [c(i, t) + b(i, t)] \quad (15),$$

$$\text{其中, } c(i, t) = A(i) \times p(i, t)^2 + B(i) \times p(i, t) + C(i) \times v(i, t) \quad (16),$$

其中 TT 表示运行的总时间, NG 表示机组的数量, $A(i), B(i), C(i)$ 表示机组 i 发电成本与输出功率的二次函数的二次项系数, 一次项系数和常数项, $c(i, t)$ 为机组 i 在 t 时段的发电成本, $b(i, t)$ 为机组 i 在 t 时段的启动成本; $b(i, t)$ 的计算与机组在启动前的停机时间有关, 具体的计算在约束条件中详细解释; 停机成本一般不予考虑, 因为其对于总成本影响较小;

c3. 约束条件

c3.1. 功率平衡约束

$$\sum_i^{NG} p(i, t) = D_0(t) + \sum_{i=1}^{NI} PD(i, t) \quad \forall t \in T \quad (17),$$

其中, $PD(i, t)$ 表示可平移负荷 i 在 t 时段的负荷值; $D_0(t)$ 表示 t 时段系统的固定负荷, NI 表示可平移负荷的数

c3.2. 机组出力上下限约束

$$\underline{p}(i,t) \times v(i,t) \leq p(i,t) \leq \bar{p}(i,t) \times v(i,t) \quad \forall i \in G, t \in T \quad (18),$$

$\underline{p}(i,t)$ 表示机组 i 在 t 时段的出力下限, $\bar{p}(i,t)$ 表示机组 i 在 t 时段的出力上限, G 表示所有机组的集合; 该约束条件保证各机组都能在其正常运行的出力范围内运行;

c3.3. 启停辅助变量约束

$$y(i,t) + z(i,t) \leq 1 \quad \forall i \in G, t \in T \quad (19),$$

$$y(i,t) - z(i,t) = v(i,t) - v(i,t-1) \quad \forall i \in G, t \in T \quad (20),$$

式 (19) 约束了一个机组在同一时刻不可以同时启动和停机, 式 (20) 约束了启动和停机的动作和机组工作状态的一致性;

c3.4. 最小运行时间约束

$$\sum_{k=1}^{G(i)} [1 - v(i,k)] = 0 \quad (21),$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{up}(i)-1} v(i,k) \geq T_{up}(i) \times y(i,t) \quad \forall t = G(i) + 1L \quad TT - T_{up}(i) + 1 \quad (22),$$

$$\sum_{k=t}^{TT} [v(i,k) - y(i,t)] \geq 0 \quad \forall t = TT - T_{up}(i) + 2L \quad TT \quad (23),$$

其中, $G(i) = \text{Min}[TT, (T_{up}(i) - T_0(i)) \times U_0(i)]$, 表示在运行开始后, 机组 i 最初所需的最短运行时间; $T_{up}(i)$ 表示机组 i 的最小开机运行时间, $U_0(i)$ 表示机组 i 的初始运行状态, $U_0(i) = 1$ 则机组 i 初始处于运行状态, $U_0(i) = 0$ 则机组 i 初始处于停机状态; $T_0(i)$ 表示机组 i 初始已经运行或停运的时间, 若为初始已运行时间, 则取正数, 若为初始停机时间则取负数; 式 (22)、(23) 主要考虑前一天结束时的运行状况对于新的一天开始运行的影响, 如果机组的初始状态是运行的, 则式 (22) 表示该机组还需要至少运行的时间的约束; 式 (23) 表示运行时间的最后的 $T_{up}(i) - 1$ 小时内的最小运行时间约束; 如果机组在该时段内启动就必须一直运行到一天结束, 不能再次停机;

c3.5. 最小停运时间约束

$$\sum_{k=1}^{L(i)} v(i,k) = 0 \quad (24),$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{down}(i)-1} [1 - v(i,k)] \geq T_{down}(i) \times z(i,t) \quad \forall t = L(i) + 1 \cdots TT - T_{down}(i) + 1 \quad (25),$$

$$\sum_{k=t}^{TT} [1 - v(i,k) - z(i,t)] \geq 0 \quad \forall t = TT - T_{down}(i) + 2 \cdots TT \quad (26),$$

其中, $L(i) = \text{Min}[TT, (T_{down}(i) + T_0(i)) \times (1 - U_0(i))]$, 表示在运行开始后, 机组 i 最初所需的最短停机时间; $T_{down}(i)$ 表示机组 i 的最小停机时间; 式 (25)、(26) 主要考虑前一天结束时的运行状况对于新的一天开始运行的影响, 如果机组的初始状态是停机的, 则表示该机组还需要至少停运的时间的约束; 式 (25) 表示机组 i 每次关停后的最小停机的时间的约束; 式 (26) 表示运行时间的最后的 $T_{down}(i) - 1$ 小时内的最小停机时间约束, 如果机组在该时段内关停就必须一直停机到一天结束, 不能再次开机;

c3.6. 爬坡率约束

$$p(i,t) - p(i,t-1) \leq \text{RATEUP}(i) \quad \forall i \in G, t = 2, 3 \cdots TT \quad (27),$$

$$p(i,t-1) - p(i,t) \leq \text{RATEDN}(i) \quad \forall i \in G, t = 2, 3 \cdots TT \quad (28),$$

$\text{RATEUP}(i)$ 表示机组 i 的上爬坡率, 即机组 i 出力上调的速度, $\text{RATEDN}(i)$ 表示机组 i 的下爬坡率, 即机组 i 出力下调的速度; 由于机组调节出力的速度是有限的, 两个相邻时段之间出力的变化时有限的, 爬坡率约束就是表征这一限制的;

c3.7. 停机时间计数器约束

$$\begin{aligned} S(i,t) + (TT+1) \times v(i,t) &\geq S(i,t-1) + 1 & \forall t \in T & \quad S(i,t) - TT \times [1 - v(i,t)] \leq 0 & \forall t \in T \\ S(i,t) &\geq 0 & \forall t \in T & \end{aligned} \quad (29),$$

$S(i,t)$ 是一个停机时间计数变量, 它表示的是机组 i 在 t 时段已经累计连续停机的时间, 由于模型中的启动成本是分段的, 与机组停机时间有关, 所以利用以上的约束记录停机时间是必要的; 这四个约束条件实现的功能就是当 $v(i,t)=0$ 时, $S(i,t)=S(i,t-1)+1$, 而 $v(i,t)=1$ 时, $S(i,t)=0$, 实现了连续停机时间的累计;

c3.8. 分段启动成本约束

$$\begin{aligned} b(i,t) &= \sum_{j=1}^{ND} UP \text{cost}(i,j) \times \omega(i,t,j) & \forall t \in T \\ \sum_{j=1}^{ND} \omega(i,t,j) &= y(i,t) & \forall t \in T \\ S(i,t-1) &= \sum_{j=1}^{ND-1} j \times \omega(i,t,j) + m(i,t), & \forall t \in T \\ m(i,t) &\leq TT \times [\omega(i,t,ND) - y(i,t) + 1] & \forall t \in T \\ m(i,t) &\geq ND \times \omega(i,t,ND) & \forall t \in T \end{aligned} \quad (30),$$

这几个约束条件是利用连续停机时间的计数器, 实现分段启动成本 $b(i,t)$ 的计算的, 其中, $UP \text{cost}(i,j)$ 表示机组 i 在停机 j 小时后的启动成本; 一般来讲, 随着停机时间的增长, 启动成本是不断变大的, 当停机达到一定的时间后, 启动成本不再发生变化; ND 表示分段启动成本计算中, 最后使得启动成本不再变化的时间的阈值; $\omega(i,t,j)$ 是表示机组停机时间状态的 0-1 变量, $\omega(i,t,j)=1$ 表示的是机组 i 在 t 时刻已经停机 j 小时, $\omega(i,t,j)=0$ 表示机组处于其它状态; 该约束中对于每一个机组的每一个时段, $\omega(i,t,j)$ 至多只能有一个取 1, 利用虚拟变量 $m(i,t)$ 将连续停机时间计数 $S(i,t)$ 和 $\omega(i,t,j)$ 联系起来;

c3.9. 时段平移负荷的约束

$$\begin{aligned} PD(i,t) &= \sum_{j=1}^{T_0} [Tr(i,t-j+1) \times D_r(i,j)] & \forall i \in NI, t \in NT(i) \\ \sum_{t=1}^{TT} Tr(i,t) &= 1, \forall i \in NI \\ \sum_{t=TT-NT(i)+1}^{TT} Tr(i,t) &= 0, \forall i \in NI \end{aligned} \quad (31),$$

其中, $T_0 = \min[t, NT(i)]$; $D_r(i,j)$ 为可平移负荷 i 的负荷序列的第 j 段的负荷值; $NT(i)$ 表示可平移负荷 i 的序列的时间长度; NI 表示可平移负荷的序号集合。

作为本发明的一种优选技术方案, 所述步骤 S4 中的分配方式为:

- d1: 建立最优功率分配问题的一般模型;
- d2: 对最优功率分配问题的简化模型;
- d3: 对简化最优功率分配模型的求解;
- d4: 对求解的数值进行仿真分析。

与现有技术相比, 本发明的有益效果是:

1. 本发明一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法, 本发明首先分析了风电参与实时功率平衡的实时调度特性, 并给出了具体评价指标和计算方法, 并给出了算例验证; 而后, 结合需求侧响应资源给出了实时调度优化策略, 并针对联络线进行了直流、交流线路统一协调运行, 为送端电网故障状态下提供紧急源网协调调峰的控制方法, 保证正常运行。

具体实施方式

下面将结合本发明实施例, 对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述, 显然, 所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例, 而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例, 本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例, 都属于本发明保护的范围。

本发明提供了一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法的技术方案: 包括以下步骤:

S2: 建立集群风电机组可调度性指标的计算方法;

S3: 对源荷调峰资源策略作出分析;

S4: 对联络线调峰的控制策略作出分配。

所述 S1 中的评估方法为:

a1: 对风电特性概率分布及相关系数的时变特性进行统计分析; 通过关注的风电特性包括波动性和不确定性两个

方面, 集群风电发电单元 (wind cluster virtual power generation unit, WVPG) 的波动性 $\Delta P^{\text{VPG}}(t)$ 和不确定性 $\varepsilon^{\text{VPG}}(t)$ 可表示为:

$$\Delta P^{\text{VPG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \Delta P_i^{\text{W}}(t) \quad (1),$$

$$\varepsilon^{\text{VPG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \varepsilon_i^{\text{W}}(t) \quad (2),$$

式 (1) 和 (2) 中, n_k 为 WVPG 内风电场个数, t 为时间, $\Delta P_i^{\text{W}}(t)$ 为第 i 个风电场的波动功率, $\varepsilon_i^{\text{W}}(t)$ 为第 i 个风电场的不确定性;

a2: 依据边缘概率分布及秩相关系数矩阵的离线条件建立模型集; 包括以下步骤:

a2.1, 建立 WVPG 内部各风电场的波动性 $\Delta P_i^{\text{W}}(t)$ 和不确定性 $\varepsilon_i^{\text{W}}(t)$ 的条件相依概率分布离线模型集;

a2.2, 建立 WVPG 内部多个风电场之间波动性 $\Delta P_i^{\text{W}}(t)$ 和不确定性 $\varepsilon_i^{\text{W}}(t)$ 累积概率分布函数的条件相依秩相关系数矩阵 $\mathbf{R}_{\varepsilon}^{\text{VPG}}, \mathbf{R}_{\Delta P}^{\text{VPG}}$ 的离线模型集;

a2.3, 采用基于遗传算法的蒙特卡罗模拟方法, 滚动建立每时刻在各风电场边缘条件相依概率分布, 和多风电场条件相依秩相关系数矩阵共同约束下, WVPG 的条件概率分布以及内部各风电场的条件概率分布。

a3: 根据 WVPG 的时变概率分布在线采样计算; 包括以下步骤:

a3.1, 初始化, 随机生成 S 个 $n_s \times n_k$ 阶矩阵作为遗传算法的初始种群, 其中 n_s 为采样规模, n_k 为 WVPG 内风电场个数, 矩阵元素均为 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数;

a3.2, 从离线模型集中选取秩相关系数矩阵。首先根据时刻 t 风电场 i, j 预测风向, 计算风向差异性系数; 设 $(\tilde{F}_{\varepsilon, i, m}, \tilde{F}_{\varepsilon, j, m})$ 分别为第 m 个 $m \in (1, 2, \dots, S)$ 随机矩阵中, 第 i 列和第 j 列元素组成的数据对, 其中, $m \in (1, 2, \dots, S)$; 将 $(\tilde{F}_{\varepsilon, i, m}, \tilde{F}_{\varepsilon, j, m})$ 中数据对划分为若干子集。设 $\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon, ij, c}$ 为根据第 m 个随机矩阵中风电场 i 和 j 的第 c 个子集元素计算的秩相关系数。设 $\mathcal{R}_{\varepsilon, ij, c}$ 为离线模型集中与 $\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon, ij, c}$ 条件集合取值相同的秩相关系数, 可设置第 m 个矩阵 $\mathbf{A}_m$ 目标函数为:

$$G(\mathbf{A}_m) = \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1 \& i \neq j}^{n_k} \sum_{c=1}^{n_c} (\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon, ij, c} - \mathcal{R}_{\varepsilon, ij, c})^2 \quad (3);$$

式中 n_c 为子集个数;

a3.3, 利用遗传算法求解式 (3), 其中经过遗传和变异改变 S 个随机矩阵中的元素, 使得最优矩阵 (每次迭代中使 $G(\mathbf{A}_m)$ 最小的矩阵) 的秩相关系数矩阵逼近目标值 $\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon, ij, c}$, 即使得中 $G(\mathbf{A}_m)$ 尽可能小;

a3.4, 收敛性判断。设 $\mathbf{A}_k^*$ 为遗传算法第 k 代的最优矩阵, $\mathbf{A}_0^*$ 为初始最优矩阵, 则第 k 代最优矩阵相对于初始情况的改进为 $G(\mathbf{A}_k^*) - G(\mathbf{A}_0^*)$ 。在第 k 代, 若 $|G(\mathbf{A}_k^*) - G(\mathbf{A}_{k-1}^*)| \leq \sigma |G(\mathbf{A}_k^*) - G(\mathbf{A}_0^*)|$ 则遗传算法迭代停止, σ 为算法收敛性系数, 否则转 a3.2;

a3.5, 根据时刻 t 风电场 i 不确定性条件集合取值, 从离线模型集中选取风电场 i 对应的累积分布函数 $F_{\varepsilon, i}(t)$ 。设 $a_{i, g}^*$ $g=1, 2, \dots, n_s$ 为 a3.4 中最优矩阵中第 i 列第 g 个元素, 则风电场 i 的第 g 个采样样本为 $\tilde{\varepsilon}_{i, g}^{\text{W}}(t) = F_{\varepsilon, i}^{-1}(a_{i, g}^*)$, WVPG

的第 g 个采样样本为 $\tilde{\varepsilon}_g^{\text{VPG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \tilde{\varepsilon}_{i, g}^{\text{W}}(t)$;

a3.6, 根据式进行样本时间相关性校核;

的估计。由此，可得到风电场 i 和 WVPG 时刻 t 不确定性时变概率分布离散估计 $\tilde{f}_{e|t,i}^W$ 和 $\tilde{f}_{e|t}^{VPG}$ 。

所述 S2 中的计算方法为：

b1: 可发功率的计算；可发功率指 WVPG 时刻 t 实际出力的可能取值。火电机组的可发功率为最小稳燃出力和装机容量之间任意点值，当其在线运行时，不同时刻可发功率范围均不变。而 WVPG 的可发功率服从一概率分布，且不同时刻的可发功率概率分布会随着功率预测值和不确定性概率分布的变化而时变。

定义 WVPG 时刻 t 可发功率如式 (4)：

$$P_a^{VPG}(t) = p_f^{VPG}(t) + \varepsilon^{VPG}(t) \quad (4),$$

式中， $P_a^{VPG}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 可发功率（单位为 MW），为随机变量，对应的时变概率分布为 $\tilde{f}_{a|t}^{VPG}$ ； $p_f^{VPG}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 功率点预测值（MW）； $\varepsilon^{VPG}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 出力不确定性随机变量（MW），对应的时变概率分布为 $\tilde{f}_{e|t}^{VPG}$ 。

可发功率概率分布的计算方法如下：

(1) 将 WVPG 时刻 t 的不确定性的多状态概率分布 $\tilde{f}_{e|t}^{VPG}$ 做平移运算，平移长度为预测值 $p_f^{VPG}(t)$ 。设 $\tilde{\varepsilon}_i, \tilde{\varepsilon}_i'$ 分别为平移前后 $\tilde{f}_{e|t}^{VPG}$ 第 i 个状态的取值， $\tilde{P}_{\varepsilon,i}, \tilde{P}_{\varepsilon,i}'$ 分别为相应的状态概率，则有：

$$G(A_m) = \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1 \& i \neq j}^{n_k} \sum_{c=1}^{n_c} (\tilde{R}_{\varepsilon,ij,c} - \tilde{R}_{\varepsilon,ij,c})^2 \quad (3),$$

(2) WVPG 的可发功率最小值为 0，因此，需将平移后的概率分布从取值为 0 处进行向下截断运算。设平移后概率分布的第 1~a 个状态取值小于 0，则向下截断后 0 状态对应的概率 $\tilde{P}_{\varepsilon 0}'$ 为：

$$\tilde{P}_{\varepsilon 0}' = \tilde{P}_{\varepsilon 0}' + \sum_{i=1}^a \tilde{P}_{\varepsilon,i}' \quad (5),$$

式 (5) 中， $\tilde{P}_{\varepsilon 0}'$ 为在 0 处进行截断运算前，多状态分布取值为 0 的概率，若截断前分布无取值为 0 的状态，则 $\tilde{P}_{\varepsilon 0}' = 0$ 。

b2: 可发功率极限的计算；可发功率极限指时刻 t 时 WVPG 可发功率的最大、最小值。火电机组出力上限为装机容量，出力下限为最小稳燃出力，在各时刻均为固定值。WVPG 可发功率极限为一定置信水平下概率分布的上下边界值，并且会随着可发功率概率分布的时变而变化。

基于风险价值理论，定义时刻 t 时 WVPG 可发功率上限如式 (6)：

$$p_{\max}^{VPG}(t) = \min \left[a : P \{ P_a^{VPG}(t) \leq a \} \geq \beta \right] \quad (6),$$

式 (6) 中， $p_{\max}^{VPG}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 可发功率上限（MW）； β 为置信概率。 $p_{\max}^{VPG}(t)$ 含义为以超过 β 的概率确信，WVPG 时刻 t 可发功率小于等于 a ，所有 a 中最小值为出力上限。

定义时刻 t 时 WVPG 可发功率下限如式 (7)：

$$p_{\min,k}^{VPG}(t) = \max \left[a : P \{ P_{a,k}^{VPG}(t) \geq a \} \geq \beta \right] \quad (7),$$

式 (7) 中， $p_{\min}^{VPG}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 可发功率下限（MW）。含义为以超过 β 概率确信，WVPG 时刻 t 可发功率大于等于 b ，所有 b 中最大值为可发功率下限。

可发功率极限指标计算方法：

设 $\tilde{f}_{a|t}^{VPG}$ 多状态概率分布的第 i 个状态值和状态概率分别为 $\tilde{p}_{a|t,i}, \tilde{P}_{a|t,i}$ ，以可发功率上限为例，若 $\tilde{f}_{a|t}^{VPG}$ 的第 b 个状态值对应的累积概率满足式 (8)：

$$\sum_{i=1}^b \tilde{P}_{a|t,i} \leq \beta < \sum_{i=1}^{b+1} \tilde{P}_{a|t,i} \quad (8),$$

则可发功率上限为式 (9)：

$$p_{\max}^{VPG}(t) = \tilde{p}_{a|t,b} + (\tilde{p}_{a|t,b+1} - \tilde{p}_{a|t,b}) \frac{\left(\beta - \sum_{i=1}^b \tilde{P}_{a|t,i} \right)}{\tilde{P}_{a|t,b+1}} \quad (9),$$

式(9)中, $\tilde{P}_{a|t,b+1} - \tilde{P}_{a|t,b}$ 表示第 b+1 个和第 b 个状态的状态值取值之差, $\left(\rho - \sum_{i=1}^{\rho} r_{a|t,i} \right) / r_{a|t,b+1}$ 表示置信概率 β 和第 b 个状态的累积概率之差, 占第 b+1 个和第 b 个状态累积概率之差的比。

b3:出力调节范围的计算;出力调节范围指 WVPG 时刻 t 出力向上/向下调节极限。火电机组出力调节范围等于可发功率上下限决定的范围;WVPG 出力调节范围由可发功率上下限和控制手段共同决定。

WVPG 时刻 t 出力上调极限 $p_{r,\max}^{\text{VPG}}(t)$ (MW) 等于可发功率上限 $p_{\max}^{\text{VPG}}(t)$; 出力下调极限的确定有两种情况: 当允许切机控制时, WVPG 出力可下调至 0, 此时 $p_{r,\min}^{\text{VPG}}(t) = 0$; 当仅允许桨距角调节时, 设风电机组功率下调极限 (MW) 为可发的功率的 $k\%$, 则出力下调极限可表示为:

$$p_{r,\min}^{\text{VPG}}(t) = k\% E(P_a^{\text{VPG}}(t)) \quad (10)。$$

b4:出力调节范围的计算;火电机组爬坡率为一固定值, 而 WVPG 爬坡率由其出力波动性决定, 是波动性概率分布 $\tilde{f}_{\Delta P|t}^{\text{VPG}}$ 在一定置信概率下的上下界边界值。同时, 在调度模型中对 WVPG 爬坡率极限的确定, 还需考虑调度规程对单位时间内允许的风电功率波动范围限制。

首先, 定义 WVPG 时刻 t 由出力波动性决定的上爬坡率极限 $r_{u1}^{\text{VPG}}(t)$ (MW/min) 如式 (11) 所示:

$$r_{u1}^{\text{VPG}}(t) = \min \left[a : P \{ \Delta P^{\text{VPG}}(t) \leq a \} \geq \beta \right] \quad (11),$$

式中, $\Delta P^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 出力波动性随机变量; β 为置信概率; $r_{u1}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由波动性决定的上爬坡率极限, 为正值。式 (11) 含义为以超过 β 的概率确信波动性取值小于等于 a , 所有 a 中最小值为波动特性决定的上爬坡率极限。

定义 WVPG 时刻 t 由出力波动性决定的下爬坡率极限 $r_{d1}^{\text{VPG}}(t)$ (MW/min) 如式 (12) 所示:

$$r_{d1}^{\text{VPG}}(t) = \max \left[b : P \{ \Delta P^{\text{VPG}}(t) \geq b \} \geq \beta \right] \quad (12),$$

式 (12) 中, $r_{d1}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由出力波动性决定的下爬坡率极限, 为负值。式 (12) 含义为以超过 β 的概率确信波动性的取值大于等于 b , 所有 b 中最大值为波动性决定的下爬坡率极限。

综合考虑由出力波动性决定的爬坡率极限, 以及调度规程对单位时间内允许的风电功率波动范围的限制, 可按式 (13)、(14) 分别确定调度模型中 WVPG 的爬坡率下、上限值。

WVPG 上爬坡率极限为:

$$r_u^{\text{VPG}}(t) = \min \left[r_{u1}^{\text{VPG}}(t), r_{u2}^{\text{VPG}}(t) \right] \quad (13),$$

式 (13) 中, $r_{u2}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由调度规程决定的上爬坡率极限 (MW/min); $r_u^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 的上爬坡率极限 (MW/min)。

当 $r_{u1}^{\text{VPG}}(t) < r_{u2}^{\text{VPG}}(t)$ 时, 表明从时刻 t-1 到时刻 t, 波动性决定的上爬坡极限低于调度规程限制, 为避免对功率上升速度的高估, 应将上爬坡率极限设置为 $r_u^{\text{VPG}}(t) = r_{u1}^{\text{VPG}}(t)$ 。

当 $r_{u1}^{\text{VPG}}(t) > r_{u2}^{\text{VPG}}(t)$ 时, 表明从时刻 t-1 到时刻 t, 波动性决定的上爬坡极限高于调度规程限制, 为避免功率上升过快, 应将上爬坡率极限设置为 $r_u^{\text{VPG}}(t) = r_{u2}^{\text{VPG}}(t)$ 。

WVPG 下爬坡率极限为:

$$r_d^{\text{VPG}}(t) = \min \left[r_{d1}^{\text{VPG}}(t), r_{d2}^{\text{VPG}}(t) \right] \quad (14),$$

式 (14) 中, $r_{d2}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由调度规程决定的下爬坡率极限 (MW/min), 为负值; $r_d^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 的下爬坡率极限 (MW/min), 为负值。

若 $r_{d1}^{\text{VPG}}(t) < r_{d2}^{\text{VPG}}(t)$, 表明从时刻 t-1 到时刻 t, 波动性决定的出力下降过快, 为避免对下爬坡率的低估, 应将下爬坡率极限设置为 $r_d^{\text{VPG}}(t) = r_{d1}^{\text{VPG}}(t)$ 。

若 $r_{d1}^{\text{VPG}}(t) > r_{d2}^{\text{VPG}}(t)$, 表明从时刻 t-1 到时刻 t, 出力向下波动的速度小于调度规程要求, 必要时可通过弃风等控制手段增加下爬坡率, 下爬坡率极限设置为 $r_d^{\text{VPG}}(t) = r_{d2}^{\text{VPG}}(t)$ 。

对 WVPG 时刻 t 波动性的多状态概率分布 $f_{\Delta P|t}^{VPG}$ 进行分位点运算, 运算方法与式类似, 即可得到由出力波动特性决定的上下爬坡率极限 $r_{ul}^{VPG}(t), r_{dl}^{VPG}(t)$ 。然后, 按照式 (13)、(14) 定义即可求得当前时刻 WVPG 的爬坡率极限值。

所述 S3 中的分析方法为:

c1. 变量

c1.1, 整数变量

① 机组 i 在 t 时刻的工作启停状态变量 $v(i, t)$, $v(i, t) = 1$ 表示机组 i 在 t 时段处于开机状态, 而 $v(i, t) = 0$ 则代表处于停机状态;

② 机组 i 在 t 时刻的转换状态变量 $y(i, t)$, $y(i, t) = 1$ 表示机组 i 在 t 时段由关机变为开机, 而 $y(i, t) = 0$ 则表示机组处于其它状态;

③ 机组 i 在 t 时刻的转换状态变量 $z(i, t)$, $z(i, t) = 1$ 表示机组 i 在 t 时段由开机变为关机, 而 $z(i, t) = 0$ 则表示机组处于其它状态;

④ 机组停机时间状态变量 $\omega(i, t, j)$, $\omega(i, t, j) = 1$ 表示表示的是机组 i 在 t 时刻已经停机 j 小时, $\omega(i, t, j) = 0$ 表示机组处于其它状态。

还需要添加一个 0-1 变量 $Tr(i, t)$ 表示可平移负荷的启动时间。 $Tr(i, t) = 1$ 表示可平移负荷 i 在 t 时段开始运行, $Tr(i, t) = 0$ 表示可平移负荷 i 不是从 t 时段开始运行的。

c1.2, 连续变量

机组 i 在 t 时段的出力 $p(i, t)$ 。

c2. 目标函数

$$\min_{p(i, t), y(i, t)} \sum_{t=1}^{TT} \sum_{i=1}^{NG} [c(i, t) + b(i, t)] \quad (15),$$

$$\text{其中, } c(i, t) = A(i) \times p(i, t)^2 + B(i) \times p(i, t) + C(i) \times v(i, t) \quad (16),$$

其中 TT 表示运行的总时间, NG 表示机组的数量, $A(i), B(i), C(i)$ 表示机组 i 发电成本与输出功率的二次函数的二次项系数, 一次项系数和常数项, $c(i, t)$ 为机组 i 在 t 时段的发电成本, $b(i, t)$ 为机组 i 在 t 时段的启动成本。 $b(i, t)$ 的计算与机组在启动前的停机时间有关, 具体的计算在约束条件中详细解释。停机成本一般不予考虑, 因为其对于总成本影响较小。

c3. 约束条件

c3.1. 功率平衡约束

$$\sum_i^{NG} p(i, t) = D_0(t) + \sum_{i=1}^{NI} PD(i, t) \quad \forall t \in T \quad (17),$$

其中, $PD(i, t)$ 表示可平移负荷 i 在 t 时段的负荷值。 $D_0(t)$ 表示 t 时段系统的固定负荷, NI 表示可平移负荷的数量。该约束将固定负荷和平移后的可平移负荷的总和与机组总出力相匹配。

c3.2. 机组出力上下限约束

$$\underline{p}(i, t) \times v(i, t) \leq p(i, t) \leq \bar{p}(i, t) \times v(i, t) \quad \forall i \in G, t \in T \quad (18),$$

$\underline{p}(i, t)$ 表示机组 i 在 t 时段的出力下限, $\bar{p}(i, t)$ 表示机组 i 在 t 时段的出力上限, G 表示所有机组的集合。该约束条件保证各机组都能在其正常运行的出力范围内运行。

c3.3. 启停辅助变量约束

$$y(i, t) + z(i, t) \leq 1 \quad \forall i \in G, t \in T \quad (19),$$

$$y(i, t) - z(i, t) = v(i, t) - v(i, t-1) \quad \forall i \in G, t \in T \quad (20),$$

式 (19) 约束了一个机组在同一时刻不可以同时启动和停机。式 (20) 约束了启动和停机的动作和机组工作状态的一致性。

c3.4. 最小运行时间约束

$$\sum_{k=1}^{G(i)} [1 - v(i, k)] = 0 \quad (21),$$

$$\sum_{k=t} v(i, k) \geq T_{up}(i) \times y(i, t) \quad \forall t = G(1) + 1 \cdots TT - T_{up}(i) + 1 \quad (22),$$

$$\sum_{k=t} [v(i, k) - y(i, t)] \geq 0 \quad \forall t = TT - T_{up}(i) + 2 \cdots TT \quad (23),$$

其中, $G(i) = \text{Min}[TT, (T_{up}(i) - T_0(i)) \times U_0(i)]$, 表示在运行开始后, 机组 i 最初所需的最短运行时间。 $T_{up}(i)$ 表示机组 i 的最小开机运行时间, $U_0(i)$ 表示机组 i 的初始运行状态, $U_0(i) = 1$ 则机组 i 初始处于运行状态, $U_0(i) = 0$ 则机组 i 初始处于停机状态。 $T_0(i)$ 表示机组 i 初始已经运行或停运的时间, 若为初始已运行时间, 则取正数, 若为初始停机时间则取负数。式 (22)、(23) 主要考虑前一天结束时的运行状况对于新的一天开始运行的影响。如果机组的初始状态是运行的, 则式 (22) 表示该机组还需要至少运行的时间的约束。式 (23) 表示运行时间的最后的 $T_{up}(i) - 1$ 小时内的最小运行时间约束, 如果机组在该时段内启动就必须一直运行到一天结束, 不能再次停机;

c3.5. 最小停运时间约束

$$\sum_{k=1}^{L(i)} v(i, k) = 0 \quad (24),$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{down}(i)-1} [1 - v(i, k)] \geq T_{down}(i) \times z(i, t) \quad \forall t = L(i) + 1 \cdots TT - T_{down}(i) + 1 \quad (25),$$

$$\sum_{k=t}^{TT} [1 - v(i, k) - z(i, t)] \geq 0 \quad \forall t = TT - T_{down}(i) + 2 \cdots TT \quad (26),$$

其中, $L(i) = \text{Min}[TT, (T_{down}(i) + T_0(i)) \times (1 - U_0(i))]$, 表示在运行开始后, 机组 i 最初所需的最短停机时间。 $T_{down}(i)$ 表示机组 i 的最小停机时间。式 (25)、(26) 主要考虑前一天结束时的运行状况对于新的一天开始运行的影响。如果机组的初始状态是停机的, 则表示该机组还需要至少停运的时间的约束。式 (25) 表示机组 i 每次关停后的最小停机的时间的约束。式 (26) 表示运行时间的最后的 $T_{down}(i) - 1$ 小时内的最小停机时间约束, 如果机组在该时段内关停就必须一直停机到一天结束, 不能再次开机。

c3.6. 爬坡率约束

$$p(i, t) - p(i, t-1) \leq \text{RATEUP}(i) \quad \forall i \in G, t = 2, 3 \cdots TT \quad (27),$$

$$p(i, t-1) - p(i, t) \leq \text{RATEDN}(i) \quad \forall i \in G, t = 2, 3 \cdots TT \quad (28),$$

$\text{RATEUP}(i)$ 表示机组 i 的上爬坡率, 即机组 i 出力上调的速度, $\text{RATEDN}(i)$ 表示机组 i 的下爬坡率, 即机组 i 出力下调的速度。由于机组调节出力的速度是有限的, 两个相邻时段之间出力的变化时有限的, 爬坡率约束就是表征这一限制的。

c3.7. 停机时间计数器约束

$$S(i, t) \leq S(i, t-1) + 1 \quad \forall t \in T$$

$$S(i, t) + (TT + 1) \times v(i, t) \geq S(i, t-1) + 1 \quad \forall t \in T \quad S(i, t) - TT \times [1 - v(i, t)] \leq 0 \quad \forall t \in T$$

$$S(i, t) \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (29),$$

$S(i, t)$ 是一个停机时间计数变量, 它表示的是机组 i 在 t 时段已经累计连续停机的时间, 由于模型中的启动成本是分段的, 与机组停机时间有关, 所以利用以上的约束记录停机时间是必要的。这四个约束条件实现的功能就是当 $v(i, t) = 0$ 时, $S(i, t) = S(i, t-1) + 1$, 而 $v(i, t) = 1$ 时, $S(i, t) = 0$, 实现了连续停机时间的累计。

c3.8. 分段启动成本约束

$$b(i, t) = \sum_{j=1}^{ND} \text{UP cost}(i, j) \times \omega(i, t, j) \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{j=1}^{ND} \omega(i, t, j) = y(i, t) \quad \forall t \in T$$

$$S(i, t-1) = \sum_{j=1}^{ND-1} j \times \omega(i, t, j) + m(i, t), \quad \forall t \in T$$

$$m(i, t) \geq ND \times \omega(i, t, ND) \quad \forall t \in T \quad (30),$$

这几个约束条件是利用连续停机时间的计数器，实现分段启动成本 $b(i, t)$ 的计算的，其中， $UPcost(i, j)$ 表示机组 i 在停机 j 小时后的启动成本。一般来讲，随着停机时间的增长，启动成本是不断变大的，当停机达到一定的时间后，启动成本不再发生变化。 ND 表示分段启动成本计算中，最后使得启动成本不再变化的时间的阈值。 $\omega(i, t, j)$ 是表示机组停机时间状态的 0-1 变量， $\omega(i, t, j) = 1$ 表示表示的是机组 i 在 t 时刻已经停机 j 小时， $\omega(i, t, j) = 0$ 表示机组处于其它状态。该约束中对于每一个机组的每一个时段， $\omega(i, t, j)$ 至多只能有一个取 1。利用虚拟变量 $m(i, t)$ 将连续停机时间计数 $S(i, t)$ 和 $\omega(i, t, j)$ 联系起来。

c3.9. 时段平移负荷的约束

$$PD(i, t) = \sum_{j=1}^{T_0} [Tr(i, t-j+1) \times D_r(i, j)] \quad \forall i \in NI, t \in NT(i)$$

$$\sum_{t=1}^{TT} Tr(i, t) = 1, \forall i \in NI$$

$$\sum_{t=TT-NT(i)+1}^{TT} Tr(i, t) = 0, \forall i \in NI \quad (31),$$

其中， $T_0 = \min[t, NT(i)]$ 。 $D_r(i, j)$ 为可平移负荷 i 的负荷序列的第 j 段的负荷值。 $NT(i)$ 表示可平移负荷 i 的序列的时间长度。 NI 表示可平移负荷的序号集合。

步骤 S4 中的分配方式为：

- d1：建立最优功率分配问题的一般模型；
- d2：对最优功率分配问题的简化模型；
- d3：对简化最优功率分配模型的求解；
- d4：对求解的数值进行仿真分析。

具体使用时，本发明的一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法，首先对集群风电虚拟机组可调度性的作出评估，并建立集群风电机组可调度性指标的计算方法，紧接着对源荷调峰资源策略作出分析，最后对联络线调峰的控制策略作出分配，本发明首先分析了风电参与实时功率平衡的实时调度特性，并给出了具体评价指标和计算方法，并给出了算例验证；而后，结合需求侧响应资源给出了实时调度优化策略，并针对联络线进行了直流、交流线路统一协调运行，为送端电网故障状态下提供紧急源网协调调峰的控制方法，保证正常运行。

在本发明的描述中，需要理解的是，指示的方位或位置关系为基于实施例所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。

在本发明中，除非另有明确的规定和限定，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或成一体；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系，除非另有明确的限定，对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

尽管已经示出和描述了本发明的实施例，对于本领域的普通技术人员而言，可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型，本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。

权 利 要 求 书

1.一种送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法，其特征在于，包括以下步骤：

- S1：对集群风电虚拟机组的可调度性作出评估；
S2：建立集群风电机组可调度性指标的计算方法；
S3：对源荷调峰资源策略作出分析；
S4：对联络线调峰的控制策略作出分配。

2.根据权利要求1所述的送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法，其特征在于：所述S1中的评估方法为：

a1：对风电特性概率分布及相关系数的时变特性进行统计分析；通过关注的风电特性包括波动性和不确定性两个

方面，集群风电发电单元（wind cluster virtual power generation unit, WVPG）的波动性 $\Delta P^{\text{VPG}}(t)$ 和不确定性 $\varepsilon^{\text{VPG}}(t)$ 可表示为：

$$\Delta P^{\text{VPG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \Delta P_i^{\text{W}}(t) \quad (1),$$

$$\varepsilon^{\text{VPG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \varepsilon_i^{\text{W}}(t) \quad (2),$$

式（1）和（2）中， n_k 为 WVPG 内风电场个数， t 为时间， $\Delta P_i^{\text{W}}(t)$ 为第 i 个风电场的波动功率， $\varepsilon_i^{\text{W}}(t)$ 为第 i 个风电场的不确定性；

a2：依据边缘概率分布及秩相关系数矩阵的离线条件建立模型集；包括以下步骤：

a2.1，建立 WVPG 内部各风电场的波动性 $\Delta P_i^{\text{W}}(t)$ 和不确定性 $\varepsilon_i^{\text{W}}(t)$ 的条件相依概率分布离线模型集；

a2.2，建立 WVPG 内部多个风电场之间波动性 $\Delta P_i^{\text{W}}(t)$ 和不确定性 $\varepsilon_i^{\text{W}}(t)$ 累积概率分布函数的条件相依秩相关系数矩阵 $\mathbf{R}_{\varepsilon}^{\text{VPG}}, \mathbf{R}_{\Delta P}^{\text{VPG}}$ 的离线模型集；

a2.3，采用基于遗传算法的蒙特卡罗模拟方法，滚动建立每时刻在各风电场边缘条件相依概率分布，和多风电场条件相依秩相关系数矩阵共同约束下，WVPG 的条件概率分布以及内部各风电场的条件概率分布；

a3：根据 WVPG 的时变概率分布在线采样计算，包括以下步骤：

a3.1，初始化，随机生成 S 个 $n_s \times n_k$ 阶矩阵作为遗传算法的初始种群，其中 n_s 为采样规模， n_k 为 WVPG 内风电场个数，矩阵元素均为 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数；

a3.2，从离线模型集中选取秩相关系数矩阵，首先根据时刻 t 风电场 i,j 预测风向，计算风向差异性系数；设 $(\tilde{F}_{\varepsilon,i,m}, \tilde{F}_{\varepsilon,j,m})$ 分别为第 m 个随机矩阵中，第 i 列和第 j 列元素组成的数据对，其中， $m \in (1,2,\dots,S)$ ；将 $(\tilde{F}_{\varepsilon,i,m}, \tilde{F}_{\varepsilon,j,m})$ 中数据对划分为若干子集；设 $\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon,ij,c}$ 为根据第 m 个随机矩阵中风电场 i 和 j 的第 c 个子集元素计算的秩相关系数；设 $\mathcal{R}_{\varepsilon,ij,c}$ 为离线模型集中与 $\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon,ij,c}$ 条件集合取值相同的秩相关系数，可设置第 m 个矩阵 $\mathbf{A}_m$ 目标函数为：

$$G(\mathbf{A}_m) = \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1 \& i \neq j}^{n_k} \sum_{c=1}^{n_c} (\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon,ij,c} - \mathcal{R}_{\varepsilon,ij,c})^2 \quad (3);$$

式中 n_c 为子集个数；

a3.3，利用遗传算法求解式（3），其中经过遗传和变异改变 S 个随机矩阵中的元素，使得最优矩阵的秩相关系数矩阵逼近目标值 $\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon,ij,c}$ ，即使得中 $G(\mathbf{A}_m)$ 尽可能小，其中，最优矩阵为每次迭代中使 $G(\mathbf{A}_m)$ 最小的矩阵；

a3.4，收敛性判断，设 $\mathbf{A}_k^*$ 为遗传算法第 k 代的最优矩阵， $\mathbf{A}_0^*$ 为初始最优矩阵，则第 k 代最优矩阵相对于初始情况的改进为 $G(\mathbf{A}_k^*) - G(\mathbf{A}_0^*)$ ；在第 k 代，若 $|G(\mathbf{A}_k^*) - G(\mathbf{A}_{k-1}^*)| \leq \sigma |G(\mathbf{A}_k^*) - G(\mathbf{A}_0^*)|$ 则遗传算法迭代停止， σ 为算法收敛性系数，否则转 a3.2；

a3.5，根据时刻 t 风电场 i 不确定性条件集合取值，从离线模型集中选取风电场 i 对应的累积分布函数 $F_{\varepsilon,i}(t)$ ；设 $a_{i,g}^*$ $g=1,2,\dots,n_s$ 为 a3.4 中最优矩阵中第 i 列第 g 个元素，则风电场 i 的第 g 个采样样本为 $\tilde{\varepsilon}_{i,g}^{\text{W}}(t) = F_{\varepsilon,i}^{-1}(a_{i,g}^*)$ ，WVPG

的第 g 个采样样本为 $\tilde{e}_g^{\text{VPG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \tilde{e}_{i,g}^{\text{W}}(t)$;
a3.6, 进行样本时间相关性校核;

a3.7, 根据样本统计时刻 t 各风电场及 WVPG 不确定性的频率分布, 当采样规模 n_s 足够大时, 即为离散概率分布的估计; 由此, 可得到风电场 i 和 WVPG 时刻 t 不确定性时变概率分布离散估计 $\tilde{f}_{i|t}^{\text{W}}$ 和 $\tilde{f}_{i|t}^{\text{VPG}}$ 。

3.根据权利要求 1 所述的送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法, 其特征在于: 所述 S2 中的计算方法为:

b1: 可发功率的计算; 可发功率指 WVPG 时刻 t 实际出力的可能取值; 火电机组的可发功率为最小稳燃出力和装机容量之间任意点值, 当其在线运行时, 不同时刻可发功率范围均不变; 而 WVPG 的可发功率服从一概率分布, 且不同时刻的可发功率概率分布会随着功率预测值和不确定性概率分布的变化而时变;

定义 WVPG 时刻 t 可发功率如式 (4):

$$P_a^{\text{VPG}}(t) = p_f^{\text{VPG}}(t) + \varepsilon^{\text{VPG}}(t) \quad (4),$$

式中, $P_a^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 可发功率 (单位为 MW), 为随机变量, 对应的时变概率分布为 $\tilde{f}_{a|t}^{\text{VPG}}$; $p_f^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 功率点预测值 (MW); $\varepsilon^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 出力不确定性随机变量 (MW), 对应的时变概率分布为 $\tilde{f}_{\varepsilon|t}^{\text{VPG}}$;

可发功率概率分布的计算方法如下:

(1) 将 WVPG 时刻 t 的不确定性的多状态概率分布 $\tilde{f}_{\varepsilon|t}^{\text{VPG}}$ 做平移运算, 平移长度为预测值 $p_f^{\text{VPG}}(t)$; 设 $\tilde{\varepsilon}_i, \tilde{\varepsilon}_i'$ 分别为平移前后 $\tilde{f}_{\varepsilon|t}^{\text{VPG}}$ 第 i 个状态的取值, $\tilde{P}_{\varepsilon,i}, \tilde{P}_{\varepsilon,i}'$ 分别为相应的状态概率, 则有:

$$G(\mathbf{A}_m) = \sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1 \& i \neq j}^{n_k} \sum_{c=1}^{n_c} (\tilde{\mathcal{R}}_{\varepsilon,ij,c} - \mathcal{R}_{\varepsilon,ij,c})^2 \quad (3),$$

(2) WVPG 的可发功率最小值为 0, 因此, 需将平移后的概率分布从取值为 0 处进行向下截断运算; 设平移后概率分布的第 1~a 个状态取值小于 0, 则向下截断后 0 状态对应的概率 $\tilde{P}_{\varepsilon,0}'$ 为:

$$\tilde{P}_{\varepsilon,0}' = \tilde{P}_{\varepsilon,0} + \sum_{i=1}^a \tilde{P}_{\varepsilon,i}' \quad (5),$$

式(5)中, $\tilde{P}_{\varepsilon,0}'$ 为在 0 处进行截断运算前, 多状态分布取值为 0 的概率, 若截断前分布无取值为 0 的状态, 则 $\tilde{P}_{\varepsilon,0}' = 0$;

b2: 可发功率极限的计算; 可发功率极限指时刻 t 时 WVPG 可发功率的最大、最小值; 火电机组出力上限为装机容量, 出力下限为最小稳燃出力, 在各时刻均为固定值; WVPG 可发功率极限为一定置信水平下概率分布的上下边界值, 并且会随着可发功率概率分布的时变而变化;

基于风险价值理论, 定义时刻 t 时 WVPG 可发功率上限如式 (6):

$$p_{\max}^{\text{VPG}}(t) = \min[a : P\{P_a^{\text{VPG}}(t) \leq a\} \geq \beta] \quad (6),$$

式 (6) 中, $p_{\max}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 可发功率上限 (MW); β 为置信概率; $p_{\max}^{\text{VPG}}(t)$ 含义为以超过 β 的概率确信, WVPG 时刻 t 可发功率小于等于 a , 所有 a 中最小值为出力上限;

定义时刻 t 时 WVPG 可发功率下限如式 (7):

$$p_{\min,k}^{\text{VPG}}(t) = \max[a : P\{P_{a,k}^{\text{VPG}}(t) \geq a\} \geq \beta] \quad (7),$$

式 (7) 中, $p_{\min}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 可发功率下限 (MW); 含义为以超过 β 概率确信, WVPG 时刻 t 可发功率大于等于 b , 所有 b 中最大值为可发功率下限;

可发功率极限指标计算方法:

设 $\tilde{f}_{a|t}^{\text{VPG}}$ 多状态概率分布的第 i 个状态值和状态概率分别为 $\tilde{P}_{a|t,i}, \tilde{P}_{a|t,i}'$, 以可发功率上限为例, 若 $\tilde{f}_{a|t}^{\text{VPG}}$ 的第 b 个状态值对应的累积概率满足式 (8):

$$\sum_{i=1}^b \tilde{P}_{a|t,i}' \leq \beta < \sum_{i=1}^{b+1} \tilde{P}_{a|t,i}' \quad (8),$$

则可发功率上限为式 (9):

$$p_{\max}^{\text{VPG}}(t) = \tilde{p}_{a|t,b} + (\tilde{p}_{a|t,b+1} - \tilde{p}_{a|t,b}) \frac{\left(\beta - \sum_{i=1}^b \tilde{p}_{a|t,i} \right)}{\tilde{p}_{a|t,b+1}} \quad (9),$$

式(9)中, $\tilde{p}_{a|t,b+1} - \tilde{p}_{a|t,b}$ 表示第 $b+1$ 个和第 b 个状态的状态值取值之差, $\left(\beta - \sum_{i=1}^b \tilde{p}_{a|t,i} \right) / \tilde{p}_{a|t,b+1}$ 表示置信概率 β 和第 b 个状态的累积概率之差, 占第 $b+1$ 个和第 b 个状态累积概率之差的比例;

b3: 出力调节范围的计算; 出力调节范围指 WVPG 时刻 t 出力向上/向下调节极限; 火电机组出力调节范围等于可发功率上下限决定的范围; WVPG 出力调节范围由可发功率上下限和控制手段共同决定;

WVPG 时刻 t 出力上调极限 $p_{\text{r,max}}^{\text{VPG}}(t)$ (MW) 等于可发功率上限 $p_{\max}^{\text{VPG}}(t)$; 出力下调极限的确定有两种情况: 当允许切机控制时, WVPG 出力可下调至 0, 此时 $p_{\text{r,min}}^{\text{VPG}}(t) = 0$; 当仅允许桨距角调节时, 设风电机组功率下调极限 (MW) 为可发的功率的 $k\%$, 则出力下调极限可表示为:

$$p_{\text{r,min}}^{\text{VPG}}(t) = k\% E(p_a^{\text{VPG}}(t)) \quad (10);$$

b4: 出力调节范围的计算; 火电机组爬坡率为一固定值, 而 WVPG 爬坡率由其出力波动性决定, 是波动性概率分布 $\tilde{f}_{\Delta P|t}^{\text{VPG}}$ 在一定置信概率下的上下界边界值。同时, 在调度模型中对 WVPG 爬坡率极限的确定, 还需考虑调度规程对单位时间内允许的风电功率波动范围限制;

首先, 定义 WVPG 时刻 t 由出力波动性决定的上爬坡率极限 $r_{\text{ul}}^{\text{VPG}}(t)$ (MW/min) 如式 (11) 所示:

$$r_{\text{ul}}^{\text{VPG}}(t) = \min[a : P\{\Delta P^{\text{VPG}}(t) \leq a\} \geq \beta] \quad (11),$$

式中, $\Delta P^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 出力波动性随机变量; β 为置信概率; $r_{\text{ul}}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由波动性决定的上爬坡率极限, 为正值; 式 (11) 含义为以超过 β 的概率确信波动性取值小于等于 a , 所有 a 中最小值为波动特性决定的上爬坡率极限;

定义 WVPG 时刻 t 由出力波动性决定的下爬坡率极限 $r_{\text{dl}}^{\text{VPG}}(t)$ (MW/min) 如式 (12) 所示:

$$r_{\text{dl}}^{\text{VPG}}(t) = \max[b : P\{\Delta P^{\text{VPG}}(t) \geq b\} \geq \beta] \quad (12),$$

式 (12) 中, $r_{\text{dl}}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由出力波动性决定的下爬坡率极限, 为负值; 式 (12) 含义为以超过 β 的概率确信波动性的取值大于等于 b , 所有 b 中最大值为波动性决定的下爬坡率极限;

综合考虑由出力波动性决定的爬坡率极限, 以及调度规程对单位时间内允许的风电功率波动范围的限制, 可按式 (13)、(14) 分别确定调度模型中 WVPG 的爬坡率下、上限值;

WVPG 上爬坡率极限为:

$$r_{\text{u}}^{\text{VPG}}(t) = \min[r_{\text{ul}}^{\text{VPG}}(t), r_{\text{u2}}^{\text{VPG}}(t)] \quad (13),$$

式 (13) 中, $r_{\text{u2}}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由调度规程决定的上爬坡率极限 (MW/min); $r_{\text{u}}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 的上爬坡率极限 (MW/min);

当 $r_{\text{ul}}^{\text{VPG}}(t) < r_{\text{u2}}^{\text{VPG}}(t)$ 时, 表明从时刻 $t-1$ 到时刻 t , 波动性决定的上爬坡率极限低于调度规程限制, 为避免对功率上升速度的高估, 应将上爬坡率极限设置为 $r_{\text{u}}^{\text{VPG}}(t) = r_{\text{ul}}^{\text{VPG}}(t)$;

当 $r_{\text{ul}}^{\text{VPG}}(t) > r_{\text{u2}}^{\text{VPG}}(t)$ 时, 表明从时刻 $t-1$ 到时刻 t , 波动性决定的上爬坡率极限高于调度规程限制, 为避免功率上升过快, 应将上爬坡率极限设置为 $r_{\text{u}}^{\text{VPG}}(t) = r_{\text{u2}}^{\text{VPG}}(t)$;

WVPG 下爬坡率极限为:

$$r_{\text{d}}^{\text{VPG}}(t) = \min[r_{\text{dl}}^{\text{VPG}}(t), r_{\text{d2}}^{\text{VPG}}(t)] \quad (14),$$

式 (14) 中, $r_{\text{d2}}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 由调度规程决定的下爬坡率极限 (MW/min), 为负值; $r_{\text{d}}^{\text{VPG}}(t)$ 为 WVPG 时刻 t 的下爬坡率极限 (MW/min), 为负值;

若 $r_{\text{dl}}^{\text{VPG}}(t) < r_{\text{d2}}^{\text{VPG}}(t)$, 表明从时刻 $t-1$ 到时刻 t , 波动性决定的出力下降过快, 为避免对下爬坡率的低估, 应将下爬坡率极限设置为 $r_{\text{d}}^{\text{VPG}}(t) = r_{\text{dl}}^{\text{VPG}}(t)$;

若 $r_{d1}^{VPG}(t) > r_{d2}^{VPG}(t)$, 表明从时刻 $t-1$ 到时刻 t , 出力向下波动的速度小于调度规程要求, 必要时可通过弃风等控制手段增加下爬坡率, 下爬坡率极限设置为 $r_d^{VPG}(t) = r_{d2}^{VPG}(t)$;

爬坡率指标计算方法:

对 WVPG 时刻 t 波动性的多状态概率分布 $\tilde{f}_{\Delta P|t}^{VPG}$ 进行分位点运算, 即可得到由出力波动特性决定的上下爬坡率极限 $r_{u1}^{VPG}(t), r_{d1}^{VPG}(t)$; 然后, 按照式 (13)、(14) 定义即可求得当前时刻 WVPG 的爬坡率极限值。

4. 根据权利要求 1 所述的送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法, 其特征在于: 所述 S3 中的分析方法为:

c1. 变量

c1.1. 整数变量:

① 机组 i 在 t 时刻的工作启停状态变量 $v(i, t)$, $v(i, t) = 1$ 表示机组 i 在 t 时段处于开机状态, 而 $v(i, t) = 0$ 则代表处于停机状态;

② 机组 i 在 t 时刻的转换状态变量 $y(i, t)$, $y(i, t) = 1$ 表示机组 i 在 t 时段由关机变为开机, 而 $y(i, t) = 0$ 则表示机组处于其它状态;

③ 机组 i 在 t 时刻的转换状态变量 $z(i, t)$, $z(i, t) = 1$ 表示机组 i 在 t 时段由开机变为关机, 而 $z(i, t) = 0$ 则表示机组处于其它状态;

④ 机组停机时间状态变量 $\omega(i, t, j)$, $\omega(i, t, j) = 1$ 表示表示的是机组 i 在 t 时刻已经停机 j 小时, $\omega(i, t, j) = 0$ 表示机组处于其它状态;

添加一个 0-1 变量 $Tr(i, t)$ 表示可平移负荷的启动时间, $Tr(i, t) = 1$ 表示可平移负荷 i 在 t 时段开始运行, $Tr(i, t) = 0$ 表示可平移负荷 i 不是从 t 时段开始运行的;

c1.2. 连续变量

机组 i 在 t 时段的出力 $p(i, t)$ 。

c2. 目标函数

$$\min_{p(i, t), y(i, t)} \sum_{t=1}^{TT} \sum_{i=1}^{NG} [c(i, t) + b(i, t)] \quad (15),$$

$$\text{其中, } c(i, t) = A(i) \times p(i, t)^2 + B(i) \times p(i, t) + C(i) \times v(i, t) \quad (16),$$

其中 TT 表示运行的总时间, NG 表示机组的数量, $A(i), B(i), C(i)$ 表示机组 i 发电成本与输出功率的二次函数的二次项系数, 一次项系数和常数项, $c(i, t)$ 为机组 i 在 t 时段的发电成本, $b(i, t)$ 为机组 i 在 t 时段的启动成本; $b(i, t)$ 的计算与机组在启动前的停机时间有关, 具体的计算在约束条件中详细解释; 停机成本一般不予考虑, 因为其对于总成本影响较小;

c3. 约束条件

c3.1. 功率平衡约束

$$\sum_i^{NG} p(i, t) = D_0(t) + \sum_{i=1}^{NI} PD(i, t) \quad \forall t \in T \quad (17),$$

其中, $PD(i, t)$ 表示可平移负荷 i 在 t 时段的负荷值; $D_0(t)$ 表示 t 时段系统的固定负荷, NI 表示可平移负荷的数量; 该约束将固定负荷和平移后的可平移负荷的总和与机组总出力相匹配;

c3.2. 机组出力上下限约束

$$\underline{p}(i, t) \times v(i, t) \leq p(i, t) \leq \bar{p}(i, t) \times v(i, t) \quad \forall i \in G, t \in T \quad (18),$$

$\underline{p}(i, t)$ 表示机组 i 在 t 时段的出力下限, $\bar{p}(i, t)$ 表示机组 i 在 t 时段的出力上限, G 表示所有机组的集合; 该约束条件保证各机组都能在其正常运行的出力范围内运行;

c3.3. 启停辅助变量约束

$$y(i, t) + z(i, t) \leq 1 \quad \forall i \in G, t \in T \quad (19),$$

$$y(i, t) - z(i, t) = v(i, t) - v(i, t-1) \quad \forall i \in G, t \in T \quad (20),$$

式 (19) 约束了一个机组在同一时刻不可以同时启动和停机, 式 (20) 约束了启动和停机的动作和机组工作状态的一致性;

c3.4. 最小运行时间约束

$$\sum_{k=1}^{G(i)} [1 - v(i, k)] = 0 \quad (21),$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{up}(i)-1} v(i, k) \geq T_{up}(i) \times y(i, t) \quad \forall t = G(i) + 1 \dots TT - T_{up}(i) + 1 \quad (22),$$

$$\sum_{k=t}^{TT} [v(i, k) - y(i, t)] \geq 0 \quad \forall t = TT - T_{up}(i) + 2 \dots TT \quad (23),$$

其中, $G(i) = \text{Min}[TT, (T_{up}(i) - T_0(i)) \times U_0(i)]$, 表示在运行开始后, 机组 i 最初所需的最短运行时间; $T_{up}(i)$ 表示机组 i 的最小开机运行时间, $U_0(i)$ 表示机组 i 的初始运行状态, $U_0(i) = 1$ 则机组 i 初始处于运行状态, $U_0(i) = 0$ 则机组 i 初始处于停机状态; $T_0(i)$ 表示机组 i 初始已经运行或停运的时间, 若为初始已运行时间, 则取正数, 若为初始停机时间则取负数; 式 (22)、(23) 主要考虑前一天结束时的运行状况对于新的一天开始运行的影响, 如果机组的初始状态是运行的, 则式 (22) 表示该机组还需要至少运行的时间的约束; 式 (23) 表示运行时间的最后的 $T_{up}(i) - 1$ 小时内的最小运行时间约束; 如果机组在该时段内启动就必须一直运行到一天结束, 不能再次停机;

c3.5. 最小停运时间约束

$$\sum_{k=1}^{L(i)} v(i, k) = 0 \quad (24),$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{down}(i)-1} [1 - v(i, k)] \geq T_{down}(i) \times z(i, t) \quad \forall t = L(i) + 1 \dots TT - T_{down}(i) + 1 \quad (25),$$

$$\sum_{k=t}^{TT} [1 - v(i, k) - z(i, t)] \geq 0 \quad \forall t = TT - T_{down}(i) + 2 \dots TT \quad (26),$$

其中, $L(i) = \text{Min}[TT, (T_{down}(i) + T_0(i)) \times (1 - U_0(i))]$, 表示在运行开始后, 机组 i 最初所需的最短停机时间; $T_{down}(i)$ 表示机组 i 的最小停机时间; 式 (25)、(26) 主要考虑前一天结束时的运行状况对于新的一天开始运行的影响, 如果机组的初始状态是停机的, 则表示该机组还需要至少停运的时间的约束; 式 (25) 表示机组 i 每次关停后的最小停机的时间的约束; 式 (26) 表示运行时间的最后的 $T_{down}(i) - 1$ 小时内的最小停机时间约束, 如果机组在该时段内关停就必须一直停机到一天结束, 不能再次开机;

c3.6. 爬坡率约束

$$p(i, t) - p(i, t-1) \leq \text{RATEUP}(i) \quad \forall i \in G, t = 2, 3 \dots TT \quad (27),$$

$$p(i, t-1) - p(i, t) \leq \text{RATEDN}(i) \quad \forall i \in G, t = 2, 3 \dots TT \quad (28),$$

$\text{RATEUP}(i)$ 表示机组 i 的上爬坡率, 即机组 i 出力上调的速度, $\text{RATEDN}(i)$ 表示机组 i 的下爬坡率, 即机组 i 出力下调的速度; 由于机组调节出力的速度是有限的, 两个相邻时段之间出力的变化时有限的, 爬坡率约束就是表征这一限制的;

c3.7. 停机时间计数器约束

$$S(i, t) \leq S(i, t-1) + 1 \quad \forall t \in T$$

$$S(i, t) + (TT + 1) \times v(i, t) \geq S(i, t-1) + 1 \quad \forall t \in T \quad S(i, t) - TT \times [1 - v(i, t)] \leq 0 \quad \forall t \in T$$

$$S(i, t) \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (29),$$

$S(i, t)$ 是一个停机时间计数变量, 它表示的是机组 i 在 t 时段已经累计连续停机的时间, 由于模型中的启动成本是分段的, 与机组停机时间有关, 所以利用以上的约束记录停机时间是必要的; 这四个约束条件实现的功能就是当 $v(i, t) = 0$ 时, $S(i, t) = S(i, t-1) + 1$, 而 $v(i, t) = 1$ 时, $S(i, t) = 0$, 实现了连续停机时间的累计;

c3.8. 分段启动成本约束

$$b(i, t) = \sum_{j=1}^{ND} \text{UP cost}(i, j) \times \omega(i, t, j) \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{j=1}^{ND} \omega(i, t, j) = y(i, t) \quad \forall t \in T$$

$$\begin{aligned}
S(i, t-1) &= \sum_{j=1}^{ND-1} j \times \omega(i, t, j) + m(i, t), \quad \forall t \in T \\
m(i, t) &\leq TT \times [\omega(i, t, ND) - y(i, t) + 1] \quad \forall t \in T \\
m(i, t) &\geq ND \times \omega(i, t, ND) \quad \forall t \in T \quad (30),
\end{aligned}$$

这几个约束条件是利用连续停机时间的计数器，实现分段启动成本 $b(i, t)$ 的计算的，其中， $UPcost(i, j)$ 表示机组 i 在停机 j 小时后的启动成本；一般来讲，随着停机时间的增长，启动成本是不断变大的，当停机达到一定的时间后，启动成本不再发生变化； ND 表示分段启动成本计算中，最后使得启动成本不再变化的时间的阈值； $\omega(i, t, j)$ 是表示机组停机时间状态的 0-1 变量， $\omega(i, t, j) = 1$ 表示的是机组 i 在 t 时刻已经停机 j 小时， $\omega(i, t, j) = 0$ 表示机组处于其它状态；该约束中对于每一个机组的每一个时段， $\omega(i, t, j)$ 至多只能有一个取 1，利用虚拟变量 $m(i, t)$ 将连续停机时间计数 $S(i, t)$ 和 $\omega(i, t, j)$ 联系起来：

c3.9. 时段平移负荷的约束

$$\begin{aligned}
PD(i, t) &= \sum_{j=1}^{T_0} [Tr(i, t-j+1) \times D_r(i, j)] \quad \forall i \in NI, t \in NT(i) \\
\sum_{t=1}^{TT} Tr(i, t) &= 1, \forall i \in NI \\
\sum_{t=TT-NT(i)+1}^{TT} Tr(i, t) &= 0, \forall i \in NI \quad (31),
\end{aligned}$$

其中， $T_0 = \min[t, NT(i)]$ ； $D_r(i, j)$ 为可平移负荷 i 的负荷序列的第 j 段的负荷值； $NT(i)$ 表示可平移负荷 i 的序列的时间长度； NI 表示可平移负荷的序号集合。

5. 根据权利要求 1 所述的送端电网故障状态下紧急源网协调调峰控制方法，其特征在于：所述步骤 S4 中的分配方式为：

- d1：建立最优功率分配问题的一般模型；
- d2：对最优功率分配问题的简化模型；
- d3：对简化最优功率分配模型的求解；
- d4：对求解的数值进行仿真分析。

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/099423

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/46(2006.01)i; H02J 3/38(2006.01)i; H02J 3/24(2006.01)i; G06Q 10/06(2012.01)i; G06Q 50/06(2012.01)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,G06Q

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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: 风电, 边缘概率分布, 虚拟机组, 秩相关系数矩阵, 时变概率, 离线模型, 可发功率, 爬坡功率, 爬坡率约束, 最小运行时间约束, 可平移负荷, wind power, wind farm cluster, virtual power generation, time varying probabilistic, dispatch characteristic indice

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111934364 A (STATE GRID GANSU ELECTRIC POWER COMPANY ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE et al.) 13 November 2020 (2020-11-13) claims 1-5, description paragraphs [0001]-[0269]	1-5
X	王健等 (WANG, Jian et al.). "高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究 (Research on Demand Response Mechanism of Wind Power Local Accommodation Utilizing Energy-Intensive Loads)" 电网技术 (Power System Technology), Vol. 41, No. 7, 31 July 2017 (2017-07-31), pp. 2116-2122	1, 4-5
Y	王健等 (WANG, Jian et al.). "高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究 (Research on Demand Response Mechanism of Wind Power Local Accommodation Utilizing Energy-Intensive Loads)" 电网技术 (Power System Technology), Vol. 41, No. 7, 31 July 2017 (2017-07-31), pp. 2116-2122	2-3



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

09 August 2021

Date of mailing of the international search report

10 September 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/099423

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	叶希 等 (YE, Xi et al.). "集群风电虚拟机组时变概率模型及调度性能指标(一): 时变概率模型 (Time-Varying Probabilistic Model and Dispatch Performance Indices for Wind Farm Cluster Virtual Power Generator—Part I: Time-Varying Probabilistic Model)" <i>中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE)</i> , Vol. 35, No. 20, 20 October 2015 (2015-10-20), pp. 5137-5141	2-3
Y	叶希 等 (YE, Xi et al.). "集群风电虚拟机组时变概率模型及调度性能指标(二): 调度性能指标 (Time-varying Probabilistic Model and Dispatch Performance Indices for Wind Farm Cluster Virtual Power Generator—Part II: Dispatch Performance Indices)" <i>中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE)</i> , Vol. 35, No. 21, 05 November 2015 (2015-11-05), pp. 5396-5399	3
A	CN 108448646 A (NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY et al.) 24 August 2018 (2018-08-24) entire document	1-5
A	US 2019036342 A1 (WOBBEN PROPERTIES GMBH) 31 January 2019 (2019-01-31) entire document	1-5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/099423

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111934364	A	13 November 2020	None			
CN	108448646	A	24 August 2018	None			
US	2019036342	A1	31 January 2019	EP	3408914	A1	05 December 2018
				BR	112018015300	A2	18 December 2018
				JP	6796137	B2	02 December 2020
				US	10707684	B2	07 July 2020
				CN	108604799	A	28 September 2018
				CA	3011494	A1	03 August 2017
				DE	102016101469	A1	27 July 2017
				JP	2019506828	A	07 March 2019
				WO	2017129740	A1	03 August 2017
				KR	20180105195	A	27 September 2018
				IN	201817028555	A	14 December 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/099423

A. 主题的分类 H02J 3/46(2006.01)i; H02J 3/38(2006.01)i; H02J 3/24(2006.01)i; G06Q 10/06(2012.01)i; G06Q 50/06(2012.01)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, G06Q 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)) WPI, EPDOC, CNPAT, CNKI: 风电, 边缘概率分布, 虚拟机组, 秩相关系数矩阵, 时变概率, 离线模型, 可发功率, 爬坡功率, 爬坡率约束, 最小运行时间约束, 可平移负荷, wind power, wind farm cluster, virtual power generation, time varying probabilistic, dispatch characteristic indice																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 111934364 A (国网甘肃省电力公司电力科学研究院 等) 2020年 11月 13日 (2020 - 11 - 13) 权利要求1-5, 说明书[0001]段-[0269]段</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>王健 等. "高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究" 电网技术, 第41卷, 第7期, 2017年 7月 31日 (2017 - 07 - 31), 第2116页-2122页</td> <td>1, 4-5</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>王健 等. "高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究" 电网技术, 第41卷, 第7期, 2017年 7月 31日 (2017 - 07 - 31), 第2116页-2122页</td> <td>2-3</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>叶希 等. "集群风电虚拟机组时变概率模型及调度性能指标(一): 时变概率模型" 中国电机工程学报, 第35卷, 第20期, 2015年 10月 20日 (2015 - 10 - 20), 第5137页-5141页</td> <td>2-3</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>叶希 等. "集群风电虚拟机组时变概率模型及调度性能指标(二): 调度性能指标" 中国电机工程学报, 第35卷, 第21期, 2015年 11月 5日 (2015 - 11 - 05), 第5396页-5399页</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 111934364 A (国网甘肃省电力公司电力科学研究院 等) 2020年 11月 13日 (2020 - 11 - 13) 权利要求1-5, 说明书[0001]段-[0269]段	1-5	X	王健 等. "高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究" 电网技术, 第41卷, 第7期, 2017年 7月 31日 (2017 - 07 - 31), 第2116页-2122页	1, 4-5	Y	王健 等. "高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究" 电网技术, 第41卷, 第7期, 2017年 7月 31日 (2017 - 07 - 31), 第2116页-2122页	2-3	Y	叶希 等. "集群风电虚拟机组时变概率模型及调度性能指标(一): 时变概率模型" 中国电机工程学报, 第35卷, 第20期, 2015年 10月 20日 (2015 - 10 - 20), 第5137页-5141页	2-3	Y	叶希 等. "集群风电虚拟机组时变概率模型及调度性能指标(二): 调度性能指标" 中国电机工程学报, 第35卷, 第21期, 2015年 11月 5日 (2015 - 11 - 05), 第5396页-5399页	3
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
PX	CN 111934364 A (国网甘肃省电力公司电力科学研究院 等) 2020年 11月 13日 (2020 - 11 - 13) 权利要求1-5, 说明书[0001]段-[0269]段	1-5																		
X	王健 等. "高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究" 电网技术, 第41卷, 第7期, 2017年 7月 31日 (2017 - 07 - 31), 第2116页-2122页	1, 4-5																		
Y	王健 等. "高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究" 电网技术, 第41卷, 第7期, 2017年 7月 31日 (2017 - 07 - 31), 第2116页-2122页	2-3																		
Y	叶希 等. "集群风电虚拟机组时变概率模型及调度性能指标(一): 时变概率模型" 中国电机工程学报, 第35卷, 第20期, 2015年 10月 20日 (2015 - 10 - 20), 第5137页-5141页	2-3																		
Y	叶希 等. "集群风电虚拟机组时变概率模型及调度性能指标(二): 调度性能指标" 中国电机工程学报, 第35卷, 第21期, 2015年 11月 5日 (2015 - 11 - 05), 第5396页-5399页	3																		
☒ 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 2021年 8月 9日		国际检索报告邮寄日期 2021年 9月 10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		授权官员 王文娟 电话号码 010-53961212																		

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
A	CN 108448646 A (华北电力大学 等) 2018年 8月 24日 (2018 - 08 - 24) 全文	1-5
A	US 2019036342 A1 (WOBBEN PROPERTIES GMBH) 2019年 1月 31日 (2019 - 01 - 31) 全文	1-5

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/099423

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	111934364	A	2020年 11月 13日	无			
CN	108448646	A	2018年 8月 24日	无			
US	2019036342	A1	2019年 1月 31日	EP	3408914	A1	2018年 12月 5日
				BR	112018015300	A2	2018年 12月 18日
				JP	6796137	B2	2020年 12月 2日
				US	10707684	B2	2020年 7月 7日
				CN	108604799	A	2018年 9月 28日
				CA	3011494	A1	2017年 8月 3日
				DE	102016101469	A1	2017年 7月 27日
				JP	2019506828	A	2019年 3月 7日
				WO	2017129740	A1	2017年 8月 3日
				KR	20180105195	A	2018年 9月 27日
				IN	201817028555	A	2018年 12月 14日