Vol.44 No.2 Feb. 2024

考虑功率预测偏差和出力调节不确定性的 风电集群功率分配策略

柳玉1,赵延顺2,张沛2

(1. 国家电网公司华北分部,北京 100032;2. 北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

摘要:当因输电通道限制需对风电集群进行限电时,应考虑各风电场功率预测和调节能力的差异。考虑功率 预测偏差和调节能力不确定性,构建机会约束规划和机会约束目标规划相结合的风电集群日前功率调度模型,并采用采样排序的方法将不确定变量转化为确定性变量对模型进行求解。对华北某地区风电集群进行 案例分析,结果表明,在满足风电场间期望调度电量比例要求的基础上,相较于传统模型,所提模型能有效降低弃风率和系统负荷不平衡时的缺额电量。

关键词:风电集群;功率分配;机会约束规划;机会约束目标规划 中图分类号:TM614 **文献标志码:**A

DOI:10.16081/j.epae.202304029

0 引言

在国家建设大基地、融入大电网的风电发展战略的指导下,在甘肃、新疆、内蒙古、吉林等地建设了一批大型千瓦级风电基地。当因电网的调峰和输送能力不足而无法消纳风电时,需要对风电集群的输出功率进行限制^[1-3]。风电集群包含分属于不同发电集团的风电场,不同风电场的功率预测精度和调节能力存在差异,而且每座风电场的功率预测偏差和调节能力都存在不确定性。风电集群通过同一输电通道向电网输送电力,当需要对风电集群进行限电时,如何考虑风电场功率预测和调节能力差异的不确定性,将受限功率分配给各风电场,保障调度的公平性,是电网调度面临的问题之一。

考虑风电不确定性的调度方法有模糊优化^[46]、随机优化、经典鲁棒优化、分布鲁棒优化等。文献 [5]采用高斯型隶属度函数描述风电功率的不确定性,解决了在含风电的系统优化调度过程中爬坡能 力不足的问题。文献[6]采用降半梯形隶属度函数 描述风电功率的不确定性。文献[7]采用随机优化 方法,根据风电功率或预测误差概率信息模拟生成 多个随机场景,并将随机问题转化为线性问题进行 求解。文献[8]采用分布鲁棒优化方法,利用不确定 性集合刻画风电出力的随机变量,并通过鲁棒对等 转化将最大化和最小化嵌套形式变为最大化问题进 行求解。文献[9]采用分布式鲁棒优化方法求解考虑

收稿日期:2022-09-05;修回日期:2022-12-24

在线出版日期:2023-05-04

基金项目:国家电网有限公司华北分部科技项目(1300/2020-02001B)

Project supported by the Science and Technology Project of North China Branch of State Grid Corporation of China (1300/2020-02001B) 风电不确定性的系统备用问题,将随机模型等效转 换为确定性双线性矩阵不等式问题进行求解。文献 [10]建立考虑风电高阶不确定性的分布式鲁棒优化 调度模型。文献[11]用置信水平对风蓄联合机组的 并网功率进行约束,构建基于机会约束规划的系统优 化调度模型,并用改进粒子群优化算法对模型进行优 化求解。上述文献采用不同方法对风电的不确定进 行建模,解决了机组开机方式、优化调度和备用预留 的问题,但均未对风电集群功率分配问题进行研究。

文献[12]提出5种风电场功率分配方法:无风 电功率预测的平均分配法、无风电功率预测的装机 容量分配法、基于风电功率预测的预测出力比例分 配法、基于风电功率预测的最优分配法、基于风电功 率预测的计划排队法。随着风电功率预测系统的应 用,根据预测功率安排风电集群的日前出力计划已成 为工业界采用的主要方法^[13]。受限于现有风电预测 技术水平,预测误差较大,因此,基于风电功率预测 的风电集群有功调度需考虑风电预测的不确定性。

文献[14]将风电场的风电预测误差概率密度函 数与日前发电计划相结合,提出基于风电预测误差 分布的机组组合策略,但针对的是风电场和传统发 电机组的组合优化问题,而不是风电集群的功率分 配问题。文献[15]以风电集群内各风电场输出功率 缺额之和最小为优化目标,提出考虑预测误差分布 的风电集群日前调度模型。文献[16]以集群内各风 电场的日前计划指令与实际出力能力偏差的数学期 望之和最小为优化目标,采用遗传算法计算得到风 电集群的调度优化指令。上述文献考虑了风电预测 误差分布特性,但没有考虑风电集群属于不同的发 电集团,在限电情况下需要考虑分配的公平性。目 前,关于风电场功率分配问题的研究较少考虑风电 场调节能力的不确定性。 基于上述分析,本文考虑功率预测偏差和调节 能力的不确定性,针对因系统调峰和输送能力不足 而需要对风电集群输出功率进行限制的问题,提出 风电集群功率分配策略。本文的主要创新点在于: 构建机会约束规划和机会约束目标规划相结合的风 电集群日前功率调度模型;将风电场日电量分配比 例期望值作为理想目标值,将所有风电场的日计划 调度电量占风电集群总调度电量的比例与期望调度 电量比例间的偏差之和最小作为目标函数之一,将 功率平衡约束、网络安全约束等构建为概率约束;采 用采样排序的方法将不确定变量转化为确定性变 量,并通过引入二进制变量将各种约束转化为混合 整数线性约束,从而实现模型的快速求解。

1 基于机会约束规划和机会目标约束的日 前调度模型

机会约束规划模型一般表示为:

$$\begin{cases} \min b \\ \text{s.t.} \quad P_r \{f(x,\xi) \le b\} \ge \beta \\ P_r \{g_j(x,\xi) \le 0\} \ge \alpha \quad j=1,2,\cdots,p \end{cases}$$
(1)

式中:b为目标函数 $f(x,\xi)$ 在目标函数成立的置信 水平 β 下的目标值,x为决策变量, ξ 为随机变量; $P_{r}\{\cdot\}$ 为事件成立的概率; $g_{j}(x,\xi)$ 为第j个随机约束 函数;p为随机约束函数的总数; α 为随机约束条件 成立的置信水平。

机会约束规划的核心思想是要求随机约束条件 至少以一定的置信水平成立,本质是以概率约束代 替传统确定约束^[17]。

t时刻风电场的功率预测误差为:

$$\Delta p_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{fct}} = P_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{avl}} - P_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{fct}}$$

$$\tag{2}$$

式中: $\Delta p_{wt,j,t}^{\text{fet}}$ 为t时刻风电场j的功率预测误差; $P_{wt,j,t}^{\text{ret}}$ 为t时刻风电场j的实际可用功率; $P_{wt,j,t}^{\text{fet}}$ 为t时刻风 电场j的预测功率。

t时刻风电场的出力调节偏差为:

$$\Delta p_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{reg}} = P_{\mathrm{wf},j,t} - P_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{ins}}$$
(3)

式中: $\Delta p_{wf,j,t}^{reg}$ 为t时刻风电场j的出力调节偏差; $P_{wf,j,t}$ 为t时刻风电场j的实际出力; $P_{wf,j,t}^{ins}$ 为t时刻风电场j的指令功率。

*t*时刻的负荷预测偏差为:

$$\Delta p_{\text{load},t}^{\text{real}} = P_{\text{load},t}^{\text{real}} - P_{\text{load},t}^{\text{real}}$$

$$(4)$$

式中: $\Delta p_{\text{load},t}^{\text{fet}}$ 为t时刻的负荷预测偏差; $P_{\text{load},t}^{\text{real}}$ 为t时刻的实际负荷; $P_{\text{load},t}^{\text{fet}}$ 为t时刻的预测负荷。

由于风电场的功率预测误差、风电场的出力调 节偏差和负荷预测误差具有不确定性,将其作为随 机变量,将风电场的计划功率作为决策变量,建立基 于机会约束的规划模型。

1.1 目标函数

目标函数包括3个方面:火电机组发电成本最低,弃风电量最小,所有风电场的日计划调度电量占 风电集群总调度电量的比例与期望调度电量比例间 的偏差之和最小。

1)火电机组发电成本最低的目标函数 f₁,即:

$$f_{1} = \min \sum_{t=1}^{96} \sum_{z=1}^{N_{th}} \left[a_{th,z} \left(P_{th,z,t}^{ins} \right)^{2} + b_{th,z} P_{th,z,t}^{ins} + c_{th,z} \right] \quad (5)$$

式中: $N_{\rm th}$ 为火电机组数量; $a_{\rm th,z}$ 、 $b_{\rm th,z}$ 、 $c_{\rm th,z}$ 分别为火电 机组z的发电成本二次系数、一次系数、常数; $P_{\rm th,z,t}^{\rm ins}$ 为t时刻火电机组z的计划调度功率。

2)弃风电量最小的目标函数 f2,即:

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^{96} \sum_{j=1}^{N_{w}} \left(P_{wf,j,t}^{avl} - P_{wf,j,t}^{ins} \right)$$
(6)

式中:N_w为风电场数量。

3)当由于系统调峰或通道传输能力受限对风电 集群进行限电时,需要对风电集群内的风电场分配 限电功率。由于风电集群内的风电场由不同的发电 集团运营,为确保调度的公平性,综合风电集群内每 座风电场的装机容量、资源禀赋和截至调度日之前 的历史发电量,在日前计算出风电集群内风电场的 日电量分配比例期望值。将风电场的日电量分配比 例期望值作为理想目标值,构建风电集群功率分配 的目标函数 f₃,即所有风电场的日计划调度电量占 风电集群总调度电量的比例与期望调度电量比例间 的偏差之和最小,如式(7)所示。

$$f_3 = \min \sum_{j=1}^{N_*} d_j \tag{7}$$

式中:d_j为风电场 j 日计划调度电量占风电集群总调度电量的比例与期望调度电量比例间的偏差。

1.2 约束条件

约束条件包括4个概率约束和2个确定性约束, 即风电场功率概率约束、功率平衡概率约束、网络安 全概率约束、风电场日调度电量比例概率约束以及 火电机组上下限确定性约束和火电机组爬坡确定性 约束。

1)风电场功率概率约束指风电场实际功率不大 于可用功率预测值的概率不小于置信水平β_{avl},即:

$$P_{\mathrm{r}} \Big\{ P_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{ins}} + \Delta p_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{reg}} \leqslant P_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{fct}} + \Delta p_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{fct}} \Big\} \geqslant \beta_{\mathrm{avl}}$$
(8)

2)功率平衡概率约束指各时刻的发电功率之和 不小于负荷需求的概率不小于置信水平β_{balance},即:

$$P_{r}\left\{\sum_{z=1}^{N_{h}}P_{\text{th},z,t}^{\text{ins}} + \sum_{j=1}^{N_{v}}P_{\text{wf},j,t}^{\text{ins}} + \sum_{j=1}^{N_{v}}\Delta p_{\text{wf},j,t}^{\text{reg}} \ge P_{\text{load},t}^{\text{fct}} + \Delta p_{\text{load},t}^{\text{fct}}\right\} \ge \beta_{\text{balance}}$$

$$(9)$$

3)网络安全概率约束指输电通道功率不大于限 值的概率不小于置信度 $\beta_{interface}$,即:

$$P_{r}\left\{\sum_{j\in\Omega}G_{L, wf, j}\left(P_{wf, j, t}^{ins} + \Delta p_{wf, j, t}^{reg}\right) + \sum_{z=1}^{N_{th}}G_{L, th, z}P_{th, z, t}^{ins} \leq P_{interface}^{lim}\right\} \geq \beta_{interface}$$
(10)

式中: Ω 为所有风电机组构成的集合; $G_{L,wf,j}$ 为风电机 组j对输电通道L的灵敏度系数; $G_{L,wf,z}$ 为火电机组z对输电通道L的灵敏度系数; $P_{interface}^{lim}$ 为输电通道容量 的限值。

4)风电场日调度电量比例概率约束指每座风电 场日计划调度电量占风电集群总调度电量的比例与 其目标值之差的绝对值不大于风电场日计划调度电 量占风电集群总调度电量的比例与期望调度电量比 例间偏差的概率不小于可信度β_{ratio},即:

$$P_{r}\left\{\left|\frac{\sum_{t=1}^{96} \left(P_{\text{wf},j,t}^{\text{ins}} + \Delta p_{\text{wf},j,t}^{\text{reg}}\right)}{\sum_{k=1}^{N_{v}} \sum_{t=1}^{96} \left(P_{\text{wf},k,t}^{\text{ins}} + \Delta p_{\text{wf},k,t}^{\text{reg}}\right)} - R_{j}^{\text{daily}}\right| \leq d_{j}\right\} \geq \beta_{\text{ratio}} \quad (11)$$

式中: *R_j* 动风电场 *j* 日计划调度电量占风电集群总 调度电量比例的目标值。

5)火电机组出力上下限确定性约束,即:

 $P_{th,z,t}^{lower} \leq P_{th,z,t}^{ins} \leq P_{th,z,t}^{upper}$ (12) 式中: $P_{th,z,t}^{upper}$ 分别为t时刻火电机组z的出力上限 和下限。

6)火电机组爬坡确定性约束,即:

$$\begin{split} -\Delta P_{\text{th},z} \leqslant P_{\text{th},z,t}^{\text{ins}} - P_{\text{th},z,t-1}^{\text{ins}} \leqslant \Delta P_{\text{th},z} \quad (13) \\ 式 中: \Delta P_{\text{th},z} \end{pmatrix} 15 \min 内火电机组 z 的最大爬坡能力。 \end{split}$$

2 基于采样排序的求解方法

2.1 概率约束转化为确定性约束的方法

机会约束模型需要被转化为确定性约束进行求 解。假设函数 $g_j(x,\xi)$ 的形式为 $g_j(x,\xi)=h_j(x)-\xi$,其 中 $h_j(x)$ 为第j个随机约束函数 $g_j(x,\xi)$ 变形为只含 变量x后的函数,则可以根据式(14)将上述含随机 变量 ξ 的机会约束等价转化为确定性约束^[17]。

$$\begin{cases} P_{r} \{h_{j}(x) \leq \xi + b\} \geq \alpha \\ h_{j}(x) \leq \sup \left(\varphi^{-1}(1 - \alpha)\right) \end{cases}$$
(14)

式中: $\varphi(\cdot)$ 为 ξ 的概率分布函数, $\varphi^{-1}(\cdot)$ 为 $\varphi(\cdot)$ 的逆函数;sup(\cdot)表示函数上确界。

由于同一模型中随机变量的概率密度函数往往 不是同一种类型的概率密度分布,其联合分布函数 难以表示,且对于部分复杂的分布函数难以求解反 函数,因此,在实际求解时,式(14)存在一定的局限 性。本文采用基于采样排序的方法将机会约束转化 为确定性约束。

对于式(1)中的机会约束 $P_{r}\left\{f(x,\xi) \leq b\right\} \geq \beta,$ 按 照 ξ 的分布规律进行N次采样,再利用产生的样本验 证 *f*(*x*, *ξ*)≤*b*是否成立。若成立,则将统计次数加1。 若成立次数与验证次数的比值不小于β,则判定该 机会约束成立;否则,判定该机会约束不成立。

当采样次数*N*足够大时,式(1)中的机会约束 $P_r\{f(x,\xi) \le b\} \ge \beta$ 可由式(15)所示混合整数线性约 束等价。

$$\begin{cases} f(x,\xi(n)) - b \leq M(1 - d(n)) \\ \sum_{n=1}^{N} d(n) \geq N\beta \\ d(n) \in \{0,1\} \quad n = 1, 2, \cdots, N \end{cases}$$
(15)

式中: $\xi(n)$ 为第n次采样的随机变量值;M为足够小的负数。当d(n)=1时, $f(x,\xi(n)) \leq b$ 成立;当d(n)=0时, $f(x,\xi(n)) \leq b$ 不成立。当采样次数足够大时, $f(x,\xi(n)) \leq b$ 至少成立 $N\beta$ 次,即 $P_r\{f(x,\xi) \leq b\} \geq \beta$ 与式(15)等价。

若式(1)机会约束 $P_{r}\{f(x,\xi) \leq b\} \geq \beta$ 中的随机变量和优化变量可以相分离,即可表示为:

$$f(x,\xi) = h_i(x) - \xi \tag{16}$$

将采样值按影响程度由小到大进行排序,式 (15)可进一步等效化简为:

$$\begin{cases} h_{j}(x) - \Delta \xi \left(\operatorname{ceil} \left(N \beta \right) \right) \leq b \\ \Delta \xi = \operatorname{sort} \left(\left[\xi(1), \xi(2), \cdots, \xi(N) \right] \right) \end{cases}$$
(17)

式中:ceil(·)为向上取整的运算符;sort(·)为将数列 按从小到大排列的运算符;Δξ为采样的随机变量值 按从小到大排序后构成的向量。

对于模型中的复杂机会约束,利用历史数据拟 合其概率密度函数,采用基于采样排序的机会约束 转化方法,将机会约束转化为确定性约束,以实现模 型的快速求解。利用式(15)—(17)将式(8)、(14)的 机会约束转化为确定性约束。按照负荷预测偏差以 及各风电场的功率预测误差、出力调节偏差之和的 概率密度分布特点,采用拉丁超立方抽样对 $\Delta p_{\text{load},r}^{\text{ret}}$ 、 $\Delta p_{\text{wf},j,r}^{\text{ret}}$ 、 $\Delta p_{\text{wf},j,r}^{\text{ret}}$ 、 $\Delta p_{\text{wf},j,r}^{\text{ret}}$ 、 $(n), \Delta p_{\text{wf},j,r}^{\text{ret}}$ (n)、 $\Delta p_{\text{wf},r}^{\text{ret}}$ (n)、 $\Delta p_{\text{wf},r}^{\text{ret}}}$ (n)、 $\Delta p_{\text{wf},r}^{\text{ret}}$ (n)

$$\begin{cases} P_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{ins}} - P_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{fet}} + \Delta p_{1,j,t}^{\mathrm{sort}} \left(\operatorname{ceil} \left(\beta_{\mathrm{avl}} N \right) \right) \leq 0 \\ \Delta p_{1,j,t}^{\mathrm{sort}} = \operatorname{sort} \left(\left[\Delta p_{1,j,t}(1), \Delta p_{1,j,t}(2), \cdots, \Delta p_{1,j,t}(N) \right] \right) \\ \Delta p_{1,j,t}(n) = \Delta p_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{reg}}(n) - \Delta p_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{fet}}(n) \quad n = 1, 2, \cdots, N \end{cases}$$

$$(18)$$

式中: $\Delta p_{1,j,i}(n)$ 为第n次采样的t时刻风电场j的出力调节偏差与功率预测误差的差值, $\Delta p_{1,j,i}^{\text{sort}}$ 为所有这些差值按从小到大排序后构成的向量。

同理,功率平衡概率约束可以转化为确定性约 束,即:

$$\begin{cases} P_{\text{load},t}^{\text{fet}} - \sum_{j=1}^{N_{*}} P_{\text{wf},j,t}^{\text{ins}} - \sum_{z=1}^{N_{+}} P_{\text{th},z,t}^{\text{ins}} + \Delta p_{2,t}^{\text{sort}} \Big(\operatorname{ceil} \big(\beta_{\text{halance}} N \big) \Big) \leq 0 \\ \Delta p_{2,t}^{\text{sort}} = \operatorname{sort} \Big(\Big[\Delta p_{2,t}(1), \Delta p_{2,t}(2), \cdots, \Delta p_{2,t}(N) \Big] \Big) \\ \Delta p_{2,t}(n) = \Delta p_{\text{load},t}^{\text{fet}}(n) - \sum_{j=1}^{N_{*}} \Delta p_{\text{wf},j,t}^{\text{reg}}(n) \quad n = 1, 2, \cdots, N \end{cases}$$

$$(19)$$

式中: $\Delta p_{2,t}(n)$ 为第n次采样的t时刻负荷预测误差 与所有风电场出力调节偏差的差值, $\Delta p_{2,t}^{\text{sert}}$ 为所有这 些差值按从小到大排序后构成的向量。

网络安全概率约束也可转化为确定性约束,如 式(20)所示。

$$\begin{cases} \sum_{j \in \Omega} G_{L, \text{wf}, j} P_{\text{wf}, j, t}^{\text{ins}} + \sum_{z=1}^{N_{\text{th}}} G_{L, \text{th}, z} P_{\text{th}, z, t}^{\text{ins}} - P_{\text{interface}}^{\text{lim}} + \\ \Delta p_{3, j, t}^{\text{sort}} \left(\text{ceil} \left(\beta_{\text{interface}} N \right) \right) \leq 0 \\ \Delta p_{3, j, t}^{\text{sort}} = \text{sort} \left(\left[\sum_{j \in \Omega} G_{L, \text{wf}, j} \Delta p_{\text{wf}, j, t}^{\text{reg}}(1), \right] \right) \\ \sum_{j \in \Omega} G_{L, \text{wf}, j} \Delta p_{\text{wf}, j, t}^{\text{reg}}(2), \cdots, \sum_{j \in \Omega} G_{L, \text{wf}, j} \Delta p_{\text{wf}, j, t}^{\text{reg}}(N) \right] \end{cases}$$
(20)

式中: $\Delta p_{3,j,t}^{\text{soft}}$ 为t时刻风电场j在输电通道产生的功率按从小到大排序后构成的向量。

将风电场日调度电量比例概率约束等效为式 (21),再将式(21)转化为式(22)。

$$P_{r}\left\{\sum_{t=1}^{96} \left(P_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{ins}} + \Delta p_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{reg}}\right) - R_{j}^{\mathrm{daily}} \sum_{k=1}^{N_{*}} \sum_{t=1}^{96} \left(P_{\mathrm{wf},k,t}^{\mathrm{ins}} + \Delta p_{\mathrm{wf},k,t}^{\mathrm{reg}}\right) \leq d_{j}^{+}\right\} \geq \beta_{i}^{+} \qquad (21)$$

$$P_{r}\left\{R_{j}^{\mathrm{daily}} \sum_{k=1}^{N_{*}} \sum_{t=1}^{96} \left(P_{\mathrm{wf},k,t}^{\mathrm{ins}} + \Delta p_{\mathrm{wf},k,t}^{\mathrm{reg}}\right) - \sum_{t=1}^{96} \left(P_{\mathrm{wf},j,t}^{\mathrm{ins}} + \Delta p_{\mathrm{wf},k,t}^{\mathrm{reg}}\right) \leq d_{j}^{-}\right\} \geq \beta_{i}^{-} \qquad (22)$$

式中:d_j为风电场 j 日计划调度电量占风电集群总 调度电量的比例与期望调度电量比例间的正向偏 差; β_i为正向可信度; d_j为风电场 j 日计划调度电量 占风电集群总调度电量的比例与期望调度电量比例 间的反向偏差; β_i为反向可信度。

将式(22)转化为确定性约束,即:

$$\sum_{t=1}^{96} P_{wt,j,t}^{ins} - R_j^{daily} \sum_{k=1}^{N_v} \sum_{t=1}^{96} P_{wt,k,t}^{ins} + \Delta p_{5,j}^{sort} \Big(\operatorname{ceil} \Big(\beta_i^+ N \Big) \Big) \leq d_j^+ \\ \Delta p_{5,j}^{sort} \Big(\operatorname{ceil} \Big(\beta_i^- N \Big) \Big) - \sum_{t=1}^{96} P_{wt,j,t}^{ins} + R_j^{daily} \sum_{k=1}^{N_v} \sum_{t=1}^{96} P_{wt,k,t}^{ins} \leq d_j^- \\ \Delta p_{5,j}^{sort} = \operatorname{sort} \Big(\Big[\Delta p_{5,j}(1), \Delta p_{5,j}(2), \cdots, \Delta p_{5,j}(N) \Big] \Big)$$

$$\Delta p_{5,j}(n) = \sum_{t=1}^{96} \Delta p_{wt,j,t}^{reg}(n) + R_j^{daily} \sum_{k=1}^{N_v} \sum_{t=1}^{96} \Delta p_{wt,k,t}^{reg}(n) \\ n = 1, 2, \cdots, N$$
(23)

2.2 方法流程

利用基于采样排序的方法求解含机会规划和机 会约束的日前调度模型的流程为:

1)根据风电场功率预测误差、风电场出力调节 偏差、负荷预测偏差3个随机变量的概率密度函数 生成N个样本;

2)将样本值按影响程度由小到大进行排序;

3)将火电机组发电成本最低、弃风电量最小、所 有风电场的日计划调度电量占风电集群总调度电量 的比例与期望调度电量比例间的偏差之和最小转化 成单一目标;

4)利用式(18)—(23)将风电场功率概率约束、 功率平衡概率约束、网络安全概率约束以及风电场 日调度电量比例概率约束转化为确定性约束,保留 火电机组上下限确定性约束和火电机组爬坡确定 性约束;

5)利用优化求解器计算风电场和火电机组的调 度计划。

3 算例分析

基于华北某地区3座风电场(风电场A—C)的 数据对日前功率调度模型进行验证。该地区有6台 火电机组,火电机组装机容量共为3555 MW,最低 出力为总装机容量的55%,每分钟的爬坡率为总装 机容量的1.5%,发电成本函数系数*a*_{th,z}、*b*_{th,z}、*c*_{th,z}</sub>如 附录A表A1所示,各火电机组发电功率按照机组容 量比例分配;负荷最大值为1122.5 MW,最小值为 827.5 MW;风电场A—C的装机容量分别为126、 150、100 MW。该地区某日的风电场日前预测功率 以及预测负荷与火电最低出力的差值和风电总预测 功率大于预测负荷与火电最低出力的差值时会出现 大量弃风。

利用该地区电网历史运行数据拟合出风电场功 率预测误差、风电场出力调节偏差以及负荷预测偏 差的概率密度函数,所得到的概率密度函数以及相







114



关参数如附录A式(A1)—(A3)所示。3座风电场功 率预测误差概率密度函数的拟合结果如附录A表 A2和图A1所示。3座风电场出力调节偏差概率密 度函数的拟合结果如附录A表A3和图A2所示。负 荷预测误差概率密度函数的拟合结果如附录A图 A3所示。

可以看出,3座风电场的功率预测误差和出力 调节偏差以及负荷预测偏差的概率密度分布并不是 同一种类型的概率密度函数。在拟合出随机变量的 概率密度函数后,采用拉丁超立方抽样对 Δp_{load}^{fet} 、 Δp_{wf}^{reg} 、 Δp_{wf}^{fet} 进行5000次采样,将置信水平为0.85时允 许的偏差值设为0,调度电量比例机会约束的置信 水平 $\beta_i^*=0.9$ 、 $\beta_i^*=0.25$ 。

在多目标优化中,目标函数f,为:

$$f_{\rm o} = \min(A_{\rm m} f_1 - B_{\rm m} f_2 + C_{\rm m} f_3) \tag{27}$$

式中: A_m 、 B_m 、 C_m 为多目标优化函数的权重系数。 A_m 、 B_m 、 C_m 分别取2、1、5000,调度电量比例偏差的权 重系数均取为1。设定风电场A—C的期望日调度 电量比例为1.5:1:1.4。

利用 MATLAB 中的 CPLEX 工具包对 24 h(96个时刻)的调度计划进行求解,得到各风电场以及火电机组的出力,并对比本文模型与不考虑随机变量且 仅按照预测功率比例进行功率分配的传统模型, 各风电场的调度功率、调度电量分别如图 3 和表 1 所示。

由图3和表1可知:相较于传统模型,在出现弃 风的第1-23、72-94个时刻,本文模型下各风电 场的实际电量均有不同程度的提升,对于预测电量 小于实际可用电量的风电场,提升效果更明显;相较 于传统模型,本文模型下3座风电场的实际总电量 提高了361.25 MW·h,风电场A-C的预测电量比 例从1.12:1:0.94变为更加接近实际可用电量比例 1.6:1:1.37。

由于风电场输电通道容量有限,需要通过调度 限制部分风电功率并网。由于本文模型考虑了网络



图 3 风电场的调度功率对比

Fig.3 Comparison of dispatching power among wind farms

表1 风电场的调度电量对比

Table 1	Comparison of dispatching electricity
	quanlity among wind farms 单位、MW・h

				1 12.111 () 11
风电场	预测电量	实际可用电量	实际电量	
			传统模型	本文模型
А	1966.10	2136.13	1638.63	1949.41
В	1867.32	1 892.26	1464.38	1216.77
С	1874.54	1819.12	1 367.94	1666.02
合计	5707.96	5847.51	4470.95	4832.20

安全概率约束,因此可以有效缓解输电通道潮流,使 其小于通道极限容量。利用本文模型调度前后的输 电通道潮流情况如附录A图A4所示。

在制定功率分配计划时考虑随机变量可以减少 风电场功率预测误差、出力调节偏差和负荷预测误 差所导致的功率不足。在本文模型和传统模型下, 不考虑随机变量时风电场实际出力与负荷的偏差如 图4所示,风电集群日调度效果如表2所示。由对比 结果可知,与传统模型相比,在本文模型下,风电集 群的实际电量从4478.85 MW·h增至4905.21 MW·h, 弃风比例大幅降低,从23%降至16%,由风电场 指令偏低导致的负荷不平衡对应的缺额电量从 451.11 MW·h降至111.71 MW·h。



表2 风电集群日调度效果

Table 2	Daily	dispatching	effect	of
---------	-------	-------------	--------	----

wind power cluster

会粉	结果		
参奴	本文模型	传统模型	
总可用电量 / (MW•h)	5847.51	5847.51	
弃风量 / (MW · h)	942.30	1 368.66	
弃风比例 / %	16	23	
平均超发功率 / MW	9.65	3.95	
平均缺额功率 / MW	9.51	20.50	
缺额电量/(MW·h)	111.71	451.11	

4 结论

在风电集群输出功率受限的情况下,针对在将 受限功率分配给集群内各风电场时需考虑风电场功 率预测和调节能力差异的不确定性以及调度公平性 的问题,本文提出机会约束规划和机会约束目标规 划相结合的风电集群日前功率调度模型以及采用采 样排序的方法将不确定变量转化为确定性变量进行 求解的方法。在目标函数中增加所有风电场的日计 划调度电量占风电集群总调度电量的比例与期望调 度电量比例间的偏差之和最小的目标,以确保调度 的公平性。考虑到风电场功率预测误差和出力调节 偏差的不确定性,将风电场功率约束、功率平衡约 束、网络安全约束、风电场日调度电量比例约束构建 为概率约束,并通过利用采样排序以及引入二进制 变量将概率约束转化为混合整数线性约束进行求 解。本文提出的调度策略可以降低风电调度中的不 确定性对电网稳定运行的影响,同时保障优质风电 场的效益和调度的公平合理性,从而更好地促进新 能源的消纳和发展。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 冀肖彤,柳丹,江克证,等. 储能型风电场一次调频容量优化与 风电功率协调分配[J/OL]. 电力自动化设备. [2022-12-02]. https://doi.org/10.16081/j.epae.202210015.
- [2] 叶林,路朋,赵永宁,等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6181-6198.
 YE Lin,LU Peng,ZHAO Yongning, et al. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(18): 6181-6198.
- [3]张利,王成福,牛远方.风电场输出有功功率的协调分配策略
 [J].电力自动化设备,2012,32(8):101-105,112.
 ZHANG Li,WANG Chengfu,NIU Yuanfang. Coordinative distribution strategy of wind farm output active power[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):101-105,112.
- [4] LIANG R H, LIAO J H. A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems [J].
 IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4):1665-1674.
- [5]季峰,蔡兴国,岳彩国. 含风电场电力系统的模糊鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4791-4798.
 JI Feng,CAI Xingguo,YUE Caiguo. Fuzzy robust dispatch for

power systems with wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4791-4798.

 [6] 刘文颖,文晶,谢昶,等. 基于源荷互动的含风电场电力系统多目标模糊优化调度方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(10): 56-63,68.

LIU Wenying, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective fuzzy optimal dispatch based on source-load interaction for power system with wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):56-63, 68.

- [7] SOROUDI A, RABIEE A, KEANE A. Stochastic real-time scheduling of wind-thermal generation units in an electric utility
 [J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(3):1622-1631.
- [8] 汲国强,吴文传,张伯明.考虑风电不确定性的机组检修鲁棒 优化方法[J].中国电机工程学报,2015,35(12):2919-2926.
 JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Robust optimization method of generator maintenance schedule considering wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35 (12):2919-2926.
- [9] WANG Z, BIAN Q Y, XIN H H, et al. A distributionally robust co-ordinated reserve scheduling model considering CVaRbased wind power reserve requirements [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(2):625-636.
- [10] 夏鹏,刘文颖,张尧翔,等.考虑风电高阶不确定性的分布式鲁 棒优化调度模型[J].电工技术学报,2020,35(1):189-200.
 XIA Peng,LIU Wenying,ZHANG Yaoxiang, et al. A distributionally robust optimization scheduling model considering higherorder uncertainty of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(1):189-200.
- [11] 马丽叶,王志强,陆肖宇,等. 基于机会约束规划的风-火-蓄联 合系统优化调度[J]. 电网技术,2019,43(9):3311-3320.
 MA Liye,WANG Zhiqiang,LU Xiaoyu,et al. Optimal scheduling of combined wind-thermo-storage system based on chance constrained programming[J]. Power System Technology, 2019, 43(9):3311-3320.
- [12] 刘伟,黄越辉,刘纯,等.风电场功率分配算法[J].中国电力, 2011,44(8):53-56.
 LIU Wei, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Study on algorithms of power curtailment among wind farms [J]. Electric Power, 2011,44(8):53-56.
- [13] 王世谦,林俐,狄立,等.限出力条件下风电场集群有功功率优 化分配方法[J].中国电力,2013,46(12):107-112.
 WANG Shiqian, LIN Li, DI Li, et al. Method for wind farm cluster active power optimal dispatch under restricted output condition[J]. Electric Power,2013,46(12):107-112.
- [14] 王彩霞,鲁宗相.风电功率预测信息在日前机组组合中的应用
 [J].电力系统自动化,2011,35(7):13-18.
 WANG Caixia,LU Zongxiang. Unit commitment based on wind power forecast[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(7):13-18.
- [15] 汤奕,王琦,陈宁,等.考虑预测误差分布特性的风电场集群调度方法[J].中国电机工程学报,2013,33(25):27-32.
 TANG Yi, WANG Qi, CHEN Ning, et al. A dispatching method of active power in wind farm clusters considering probability distribution of forecasting errors[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(25):27-32.
- [16] 鲁宗相,吴晓刚,乔颖,等. 基于预测误差概率密度曲线的风电 场集群日前有功优化调度[J]. 华北电力技术,2017(3):8-13.
 LU Zongxiang,WU Xiaogang,QIAO Ying,et al. Day-ahead optimal scheduling based on prediction error probability density curve for wind farm cluster[J]. North China Electric Power, 2017(3):8-13.
- [17] 李志伟,赵书强,李东旭,等.基于改进ε-约束与采样确定性转 化的电力系统日前调度机会约束模型快速求解技术[J].中国

电机工程学报,2018,38(16):4679-4691,4973.

LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LI Dongxu, et al. Fast solving of day-ahead power system scheduling chance-constrained model based on improved ε -constrained and deterministic transform by sampling [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (16) : 4679-4691,4973.

作者简介:

柳 玉(1985-),男,高级工程师,博士,主要研究方向

为新能源发电运行控制、新能源发电功率预测(E-mail: ncepuly@126.com);

赵延顺(1995—),男,硕士,主要研究方向为新能源运行 消纳(E-mail:185919306@qq.com);

张 沛(1972—),男,教授,博士研究生导师,博士,通 信作者,主要研究方向为电力系统运行和规划(E-mail: peizhang166@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

Power allocation strategy of wind power cluster considering power forecasting deviation and output regulation uncertainty

LIU Yu1, ZHAO Yanshun2, ZHANG Pei2

(1. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: When it is necessary to limit the power of wind power cluster due to the restriction of transmission channel, the difference of power forecasting and regulation capacity of each wind farm should be considered. Considering the power forecasting deviation and the uncertainty of regulation capacity, a day-ahead power dispatching model of wind power cluster combining the opportunity constrained programming and opportunity constrained goal programming is constructed, and the sampling and sequencing method is adopted to transform the uncertain variables into deterministic variables for solving the model. The wind power cluster in a region of North China is taken for example analysis, and results show that on the basis of satisfying the requirement of expected dispatching electricity quantity ratio, compared with the traditional model, the proposed model can effectively reduce the wind abandon rate and the shortage of electricity quantity when the system load is unbalanced.

Key words: wind power cluster; power allocation; chance constrained programming; chance constrained goal programming

(上接第109页 continued from page 109)

Power reserve control method of wind turbine units based on periodic maximum power point measurement

XIN Yue¹, PENG Qiao¹, LIU Tianqi¹, YIN Yue¹, HAN Huachun², WANG Yang³, WANG Zufeng⁴

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

3. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550007, China;

4. Liupanshui Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Liupanshui 553537, China)

Abstract: The wind turbine units usually operate in the maximum power output mode and cannot provide emergency power support for the disturbed power grid. Reserving part of the output power in the steady state can improve the support capability of the wind turbine units in the active network. Therefore, a power reserve control(PRC) method for wind turbine units based on periodic maximum power point(MPP) measurement is proposed. The real-time MPP of the wind turbine units is detected by periodically executing the maximum power point tracking(MPPT) program. Once the MPP is measured, the PRC mode reference value can be determined and switched to direct power control. The pseudo monotonic rotating speed-mechanical power curve is set to make the wind turbine units operate stably at the overspeed power reserve point, and the energy storage device is applied to suppress the peak power fluctuation introduced by the MPP measurement. The simulative results show that the proposed control method can accurately measure the MPP of the wind turbine units and realize PRC under the conditions of constant and variable wind speeds. Moreover, the primary frequency regulation performance of the wind turbine units with the proposed method is better than that of the traditional PRC.

Key words: wind turbine units; power reserve control; periodic measurement; maximum power point tracking; pseudo monotonic curve; peak power suppression

表 A1 各火电机组发电成本函数的系数 Table A1 Coefficient of power generation cost function of each thermal power unit

机组	发电成本二次系数	发电成本一次系数	发电成本常数	机组容量/ (MV•A)
1	0.0520	286	2483.0	1305
2	0.0325	234	4322.5	600
3	0.0325	234	4322.5	350
4	0.0325	234	4322.5	350
5	0.0520	286	2483.0	350
6	0.0325	234	4322.5	600

(1) 风电场功率预测误差符合 Logistic 分布, Logistic 分布的函数 $F(\Delta p | \sigma, \mu)$ 为:

$$F(\Delta p \mid \sigma, \mu) = \left[1 + e^{-\Delta p/(\mu\sigma)}\right]^{-1}$$
(A1)

式中: Δp 为偏差功率; σ 为尺度参数; μ 为位置参数。

(2) 风电场出力调节偏差符合广义极值分布,广义极值分布的函数 $F(\Delta p | k, \sigma, \mu)$ 为:

$$F\left(\Delta p \mid k, \sigma, \mu\right) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + k \left(\frac{\Delta p - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{k+1}{k}} e^{-\left[1 + k \left(\frac{\Delta p - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{k}}}$$
(A2)

式中: k 为形状参数。

(3)负荷预测误差负荷正态分布,正态分布函数 $F(\Delta p | \sigma, \mu)$ 为:

$$F(\Delta p \mid \sigma, \mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\Delta p - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$
(A3)



图 A1 风电场功率预测误差概率密度函数 Fig.A1 Probability density function of wind farm power prediction error



表 A3 风电场出力调节偏差概率密度函数参数 Table A3 Parameters of probability density function of wind farm output regulation deviation





图 A4 输电通道潮流对比图 Fig.A4 Power flow comparison diagram of transmission channel