

DOI: 10.7667/PSPC161112

# 求解含风电场机组组合问题的透视割平面邻域搜索算法

全 然<sup>1</sup>, 张 健<sup>2</sup>, 史志鸿<sup>3</sup>

(1. 河南工业大学理学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省浙川电力公司, 河南 南阳 474450;  
3. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 提出一种求解含风电场机组组合(Unit Commitment, UC)问题的透视割平面邻域搜索(Perspective Cut Neighborhood Search, PC-NS)算法。基于PC建立了含风电场UC问题的混合整数线性规划模型。以不考虑误差场景UC问题的最优解为中心构造邻域, 在此邻域内搜索以获得含风电场UC问题的可行解。以此可行解为中心构造邻域, 在此邻域内搜索以获得含风电场UC问题高质量的次优解。最后进行数值仿真, 结果表明, 所提算法能有效求解含风电场UC问题。和其他方法相比, PC-NS算法获得了更好的次优解, 而且用时大大减少。

**关键词:** 风电场; 机组组合问题; 透视割平面; 邻域搜索

## A perspective cut neighborhood search method for unit commitment with volatile wind power

QUAN Ran<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, SHI Zhihong<sup>3</sup>

(1. College of Science, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Xichuan Electric Power Company, Nanyang 474450, China; 3. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** A perspective cut neighborhood search (PC-NS) method is proposed for unit commitment (UC) with volatile wind power. Firstly, a mixed integer linear programming formulation based on PC is presented for UC with wind power. Then, a neighborhood is built on the solution of UC without considering wind power to find the feasible solution of UC with wind power. After that, based on the feasible solution, another neighborhood is constructed to get high-quality sub-optimal solutions for UC with wind power. At last, the proposed method is tested and the numerical results indicate that the PC-NS is efficient for solving UC with wind power. When compared with other methods, the presented PC-NS can yield better sub-optimal solutions and the running time can be greatly reduced.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71201049 and No. 51407037).

**Key words:** wind power; unit commitment; perspective cut; neighborhood search

## 0 引言

风电是一种技术成熟的可再生能源, 与传统燃煤为主的火电相比, 具有无污染、成本低的优势。合理利用风电可有效减少污染物排放, 符合我国节能减排政策。然而, 风电具有随机性, 给电力系统的安全经济运行带来了极大挑战。近年来, 含风电场机组组合(Unit Commitment, UC)问题的研究已成为电力系统发电调度领域的热点之一<sup>[1-10]</sup>。

由于难以准确预测风电出力, 人们主要采用两种方式来应对风电的随机性。一种方式是增加备用容量<sup>[1]</sup>。为了确保系统的安全性, 合适的备用容量

难以精确计算, 往往导致获得的备用容量偏于保守, 限制了其实用性。另一种更可取的方式是基于场景法, 建立随机UC模型来模拟风电的随机性。文献[5]建立了基于风电和储能系统的UC模型, 并采用分支定界法求解。文献[6]基于极限场景集的场景法, 建立了多风电场并网时安全约束UC模型, 并提出了求解模型的混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)解法。文献[7]建立了风电与抽水储能协同调度的UC模型, 并应用Benders分解法求解。文献[8]基于Benders分解, 提出了求解含风电场随机UC问题的动态削减多切割方法。文献[9]建立了多时间尺度下协调UC的含并网风电电力系统旋转备用预留容量的优化模型, 并采用优先顺序法和粒子群算法进行求解。文献[10]建立了规模化电

基金项目: 国家自然科学基金项目(71201049, 51407037)

动汽车与风电协调调度的UC模型。

场景法能较好模拟风电的随机性, 然而, 随着场景数的增加, 随机 UC 问题产生的确定性 MILP 模型的规模会急剧膨胀。这不仅给计算机内存空间提出了更高要求, 而且给 MILP 求解器带来了巨量计算, 使得问题求解变得异常困难。为了减轻计算负担, 一方面, 可通过缩减场景数量来实现<sup>[11]</sup>, 但是, 这降低了计算精度; 另一方面, 可通过设计高效的算法来实现。文献[6]通过引入发电机功率分布因子, 并利用极限场景集对风电出力取值空间的完全代表性, 减小了计算量。文献[8]基于 Benders 分解算法, 利用动态削减多切割方法来提高求解效率。

为了提高求解效率, 本文基于 UC 问题特点以及透视割平面(Perspective Cut, PC)<sup>[12]</sup>、邻域搜索(Neighborhood Search, NS)<sup>[13-15]</sup>, 提出一种求解含风电场 UC 问题的 PC-NS 算法。和其他算法相比, 所提 PC-NS 算法能有效减小计算量, 可显著提高求解效率。

## 1 含风电场 UC 问题的数学模型

含风电场 UC 问题要优化的目标为

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\alpha_i u_{i,t} + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i (P_{i,t})^2 + C_{i,t}] \quad (1)$$

式中:  $T$  表示时段总数;  $N$  表示机组总数;  $\alpha_i u_{i,t} + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i (P_{i,t})^2$  表示机组  $i$  在  $t$  时段的煤耗费用, 常数  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  为二次函数的系数, 0-1 变量  $u_{i,t}$  表示机组  $i$  在  $t$  时段的开停机状态, 值为 1 表示开机状态, 值为 0 表示停机状态,  $P_{i,t}$  表示机组  $i$  在  $t$  时段的出力;  $C_{i,t}$  表示机组  $i$  的启动费用。

(a) 含风电场 UC 问题预测场景下的限制条件为

1) 机组出力限制

$$u_{i,t} \underline{P}_i \leq P_{i,t} \leq u_{i,t} \bar{P}_i, \quad \forall i, t \quad (2)$$

式中,  $\underline{P}_i, \bar{P}_i$  分别为机组  $i$  的最小及最大出力限制。

2) 系统的功率平衡限制

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{j=1}^W P_{w,j,t} - P_{D,t} = 0, \quad \forall t \quad (3)$$

式中:  $W$  为风电场总数;  $P_{w,j,t}$  为风电场  $j$  在  $t$  时段的预测出力;  $P_{D,t}$  为  $t$  时段的系统负荷。

3) 机组的启停时间限制<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} \sum_{s=t-\underline{T}_{\text{on},i}+1}^t v_{i,s} - u_{i,t} \leq 0, \quad \forall i, t \in [\underline{T}_{\text{on},i}+1, T] \\ \sum_{s=t-\underline{T}_{\text{off},i}+1}^t z_{i,s} + u_{i,t} \leq 1, \quad \forall i, t \in [\underline{T}_{\text{off},i}+1, T] \\ v_{i,t} - z_{i,t} = u_{i,t} - u_{i,t-1}, \quad \forall i, t \\ 0 \leq v_{i,t} \leq 1, \quad 0 \leq z_{i,t} \leq 1, \quad \forall i, t \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $v_{i,t}, z_{i,t}$  均为 0-1 状态转移变量, 若机组  $i$  在  $t$  时段启动, 则  $v_{i,t}$  取值为 1, 否则取值为 0; 若机组  $i$  在  $t$  时段关机, 则  $z_{i,t}$  取值为 1, 否则取值为 0;  $\underline{T}_{\text{on},i}, \underline{T}_{\text{off},i}$  分别为机组  $i$  的最小开机与最小停机时间。

4) 系统的旋转备用限制

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} \bar{P}_i + \sum_{j=1}^W P_{w,j,t} \geq P_{D,t} + R_t, \quad \forall t \quad (5)$$

式中,  $R_t$  为系统在第  $t$  时段的旋转备用。

5) 启动费用限制<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} C_{i,t} \geq C_{\text{hot},i} v_{i,t}, \quad \forall i, t \\ C_{i,t} \geq C_{\text{cold},i} \left[ v_{i,t} - \sum_{l=t-\underline{T}_{\text{off},i}-\underline{T}_{\text{cold},i}}^t z_{i,l} \right], \quad \forall i, t \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $C_{\text{hot},i}$  和  $C_{\text{cold},i}$  分别为机组  $i$  的热、冷启动费用;  $\underline{T}_{\text{cold},i}$  为机组  $i$  的冷启动时间。

6) 机组出力的爬坡限制

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq u_{i,t-1} P_{\text{up},i} + v_{i,t} P_{\text{start},i}, \quad \forall i, t \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq u_{i,t} P_{\text{down},i} + z_{i,t} P_{\text{shut},i}, \quad \forall i, t \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{up},i}, P_{\text{down},i}$  分别为机组  $i$  的爬坡及滑坡出力速率限制;  $P_{\text{start},i}, P_{\text{shut},i}$  分别为机组  $i$  的开机及停机出力速率限制。

(b) 含风电场 UC 问题误差场景下的限制条件为

1) 系统的功率平衡限制

$$\sum_{i=1}^N P_{s,i,t} + \sum_{j=1}^W P_{w,s,j,t} - P_{D,t} = 0, \quad \forall t, s \quad (8)$$

式中:  $P_{s,i,t}$  为第  $s$  个误差场景下火电机组  $i$  在  $t$  时段的出力;  $P_{w,s,j,t}$  为第  $s$  个误差场景下第  $j$  个风电场在  $t$  时段的出力。

2) 系统的旋转备用限制

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} \bar{P}_i + \sum_{j=1}^W P_{w,s,j,t} \geq P_{D,t} + R_t, \quad \forall t, s \quad (9)$$

3) 机组出力限制

$$u_{i,t} \underline{P}_i \leq P_{s,i,t} \leq u_{i,t} \bar{P}_i, \quad \forall s, i, t \quad (10)$$

4) 机组出力的爬坡限制

$$-\Delta i \leq P_{i,t} - P_{s,i,t} \leq \Delta i, \quad \forall s, i, t \quad (11)$$

式中,  $\Delta i$  为火电机组  $i$  的爬坡速率限制。

## 2 含风电场 UC 问题的 MILP 模型

显然, 前述含风电场 UC 问题式(1)~式(11)等价于下面问题。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\zeta_{i,t} + C_{i,t}] \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \zeta_{i,t} \geq \alpha_i u_{i,t} + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i (P_{i,t})^2 \\ \text{式(2)~式(11)} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

在文献[12]中, Frangioni等利用式(12)中的约束条件(2)及  $\zeta_{i,t} \geq \alpha_i u_{i,t} + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i (P_{i,t})^2$ , 建立了问题(12)如下的透视割平面。

$$\begin{aligned} \zeta_{i,t} & \geq (2\gamma_i P_i^{(k)} + \beta_i) P_{i,t} + (\alpha_i - \gamma_i (P_i^{(k)})^2) u_{i,t} \\ k & = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $P_i^{(k)} \in [\underline{P}_i, \bar{P}_i]$ 。从而由式(12)和式(13)可得含风电场UC问题如下的MILP模型。

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\zeta_{i,t} + C_{i,t}] \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \zeta_{i,t} \geq (2\gamma_i P_i^{(k)} + \beta_i) P_{i,t} + (\alpha_i - \gamma_i (P_i^{(k)})^2) u_{i,t} \\ k = 1, \dots, K \\ \text{式(2)~式(11)} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

### 3 求解 MILP 的 NS 方法

NS是获取MILP问题高质量次优解的一种有效方法<sup>[13-15]</sup>, 无论是在商业MILP求解器(如CPLEX, GUROBI)还是在非商业MILP求解器(如SCIP)中都得到了广泛应用, 能显著提高问题的求解效率。

考虑一般的MILP:

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x + h^T y \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} Ax + Dy \leq b \\ x \in R^n, y \in \{0, 1\}^m \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

记其连续松弛(Continuous Relaxation, CR)问题为(15)-CR, 设  $(x^1, y^1)$  为(15)-CR的最优解。

文献[13]提出了一种求解(15)可行解的松弛强迫邻域搜索算法(relaxation enforced NS), 其具体做法为: 利用(15)-CR的最优解  $(x^1, y^1)$  构造集合  $Q = \{j \mid y_j^1 \in \{0, 1\}\}$ , 进而通过求解如下MILP子问题

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x + h^T y \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} Ax + Dy \leq b \\ x \in R^n, y \in \{0, 1\}^m, y_j = y_j^1, \forall j \in Q \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

来获得(15)的可行解。其实质是将(15)中的部分整数变量固定在整数值处, 进而求解(15)来获得其可行解, 这相当于在这些整数值为中心的邻域内进行搜索。此邻域搜索既可以减小所求问题的规模, 又可以更快地找到问题较高质量的可行解。

### 4 含风电场 UC 问题的 PC-NS 算法

随着场景数的增多, 含风电场UC问题MILP模型(14)的规模会随之急剧增大, 即使利用先进的MILP求解器CPLEX也难以在合理的计算时间内获得其较高质量的近似解。为提高求解(14)的效率, 可以利用第三部分中的NS方法, 先将问题(14)中的一部分整数变量  $u_{i,t}$  固定在整数值处, 再求解(14), 如此, 可减小问题的规模, 提高求解效率。

结合含风电场UC问题(14)的约束条件以及文献[13-15]中的NS方法, 本文提出一种求解问题(14)的PC-NS算法, 主要分为两步。第一步是利用不考虑误差场景UC问题的最优解为中心构造邻域, 进而在该邻域内搜索以获得含风电场UC问题的可行解; 第二步, 以第一步所得可行解为中心构造邻域, 在该邻域内搜索以获得含风电场UC问题高质量的近似解, 具体详见下文讨论。

首先讨论PC-NS算法的第一步。当不考虑误差场景下的约束条件时, (14)即为

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\zeta_{i,t} + C_{i,t}] \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \zeta_{i,t} \geq (2\gamma_i P_i^{(k)} + \beta_i) P_{i,t} + (\alpha_i - \gamma_i (P_i^{(k)})^2) u_{i,t} \\ k = 1, \dots, K \\ \text{式(2)~式(7)} \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

易见, (17)实质上是一个传统的UC问题, 和(14)相比规模要小很多, 用软件包CPLEX求解时可以在较短时间内获得高质量的近似解。记(17)最优解中的整数变量值为  $\mathbf{u}^*$ , 集合  $S_{\text{on}} = \{(i, t) \mid u_{i,t}^* = 1\}$ , 然后将(14)的部分整数变量固定在整数值处, 求解(14), 即求解如下问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\zeta_{i,t} + C_{i,t}] \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \zeta_{i,t} \geq (2\gamma_i P_i^{(k)} + \beta_i) P_{i,t} + (\alpha_i - \gamma_i (P_i^{(k)})^2) u_{i,t} \\ k = 1, \dots, K \\ \text{式(2)~式(11)} \\ u_{i,t} = 1, (i, t) \in S_{\text{on}} \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

这相当于在  $\mathbf{u}^*$  为中心的邻域内进行邻域搜索以获得含风电场UC问题的可行解。

从数学上来说, 式(18)相当于把式(14)中的部分整数变量固定在整数值处进行求解, 此即第三部分的NS方法。从物理意义上来说, 问题(18)相当于将传统UC问题(17)中处于运行状态的机组在含风电场UC问题(14)中仍保持运行状态, 为了应对风电的随机性, 即满足误差场景, 将式(17)中处于关机状态的

机组在式(14)中处于自由状态, 然后在这些自由状态变量形成的邻域中搜索以投入机组, 获得式(14)的可行解。此过程即下文的算法步骤Step 1至Step 2。

然后讨论PC-NS算法的第二步。由于前述算法第一步所得可行解的质量不一定很高, 为得到问题(14)高质量的次优解, 所以算法第二步以第一步获得的可行解为中心构造邻域。构造邻域时, 首先针对每台机组确定可行解中机组开停机状态发生改变的相邻两个时段, 让这两个相邻时段向前或向后的 $\delta$ 个时段的机组状态都处于自由状态。其次确定可行解在前 $\delta$ 个时段或后 $\delta$ 个时段保持开机的机组, 进而让前 $\delta$ 个时段或后 $\delta$ 个时段的机组状态都处于自由状态。最后在这些自由状态变量形成的邻域中进行搜索以获得问题(14)高质量的次优解。此过程即下文算法步骤Step 3至Step 13。表1给出一个2机组12时段系统所构造的 $\delta$ -邻域( $\delta = 2$ ), 其中阴影部分为自由变量, 这意味着算法第二步将在这些自由变量形成的邻域中进行搜索。

表 1 2-邻域举例

Table 1 An instance of a 2-neighborhood

机组	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

下面给出PC-NS算法的具体步骤:

Step 1 求解(17), 记其最优解中机组启停状态为 $\mathbf{u}^*$ , 集合 $S_{on} = \{(i, t) | u_{i,t}^* = 1\}$ 。

Step 2 求解(18), 记其最优解中机组启停状态为 $\mathbf{u}^*$ 。

Step 3 置 $I_{Free} = \emptyset, \delta = 2, i = 1$ ; 置 $N \times T$ 矩阵 $\mathbf{u}^M$ 的第 $i$ 个行向量为 $\mathbf{u}_i^M = (u_{i,t}^M), \mathbf{u}_i^M = (u_{i,1}^*, u_{i,2}^*, \dots, u_{i,T}^*)$ 。

Step 4 置 $t = 1$ 。

Step 5 若 $t = 1$ 且 $u_{i,t}^M = u_{i,t+1}^M = \dots = u_{i,t+\delta-1}^M = 1$ , 则置 $I_{Free} = I_{Free} \cup \{(i, t), (i, t+1), \dots, (i, t+\delta-1)\}$ ; 若 $t = T$ 且 $u_{i,t-\delta+1}^M = u_{i,t-\delta+2}^M = \dots = u_{i,t}^M = 1$ , 则置 $I_{Free} = I_{Free} \cup \{(i, t-\delta+1), (i, t-\delta+2), \dots, (i, t)\}$ 。

Step 6 若 $t < T$ 且 $u_{i,t}^M + u_{i,t+1}^M = 1$ , 则置 $j = 0$ , 进入Step 7; 否则进入Step 11。

Step 7 若 $j < \delta$ 且 $t - j > 0$ , 则置 $I_{Free} = I_{Free} \cup \{(i, t - j)\}$ ; 否则置 $j = 1$ , 进入Step 9。

Step 8 置 $j = j + 1$ , 进入Step 7。

Step 9 若 $j \leq \delta$ 且 $t + j \leq T$ , 则置 $I_{Free} = I_{Free} \cup \{(i, t + j)\}$ ; 否则进入Step 11。

Step 10 置 $j = j + 1$ , 进入Step 9。

Step 11 若 $t < T$ , 则置 $t = t + 1$ , 进入Step 5。

Step 12 若 $i < N$ , 则置 $i = i + 1$ , 进入Step 4。

Step 13 置(14)中 $u_{i,t} = u_{i,t}^*, \forall (i, t) \notin I_{Free}$ , 求解(14), 记其最优解中机组启停状态为 $\mathbf{u}^*$ 。

Step 14 利用 $\mathbf{u}^*$ 进行经济调度获得发电费用。

## 5 数值仿真

在 Matlab R2011B 环境下调用 CPLEX 12.5 求解 PC-NS 算法中所涉及的 MILP 和经济调度问题, CPLEX 求解 MILP 的最大运行时间设置为 6 h, 即 21600 s。计算机硬件配置为: Intel Core i5-4590 3.30 GHz, 32 GB RAM。

本文基于 100 机组系统进行数值仿真, 系统含有 100 台火电机组和一个大型风电场, 100 机组系统的具体数据详见文献[17]。假设风电出力服从正态分布, 数学期望取预测场景下风电出力, 标准差取 0.3。首先采用拉丁超立方方法进行抽样<sup>[18]</sup>, 并结合 Cholesky 分解技术<sup>[19]</sup>产生 1000 场景; 然后采用前代消除技术<sup>[20]</sup>, 产生 10 个、100 个误差场景。

表 2 和表 3 给出了 CPLEX 精度为 0.005 时的计算结果比较, 表中“PC”表示文献[12]中的方法, 即直接求解(14)或(17), “OAM”表示文献[21]中的外逼近方法, 每次迭代需求解一个 MILP 和一个二次规划。表 2 和表 3 显示, 不计误差场景时, OAM 在更少的计算时间内获得了更好的次优解。由于没有考虑误差场景下的约束条件, 预测场景下 UC 问题的规模要小的多, 所以三种方法的求解时间和发电总费用都显著少于考虑误差场景时的求解时间和发电费用。从表 2 可以看出来, 对于含 10 个误差场景的 UC 问题, 算法 PC 获得了最少的发电费用, 但和所提算法 PC-NS 相比, 两者相差不大; 对于含 100 个

表 2 精度为 0.005 时发电费用比较

Table 2 Comparison of costs with gap 0.005

算法	s		
	预测场景	误差场景	
	0 场景	10 场景	100 场景
OAM	5,458,627	5,538,695	5,577,849
PC	5,463,532	5,535,353	5,578,221
PC-NS	5,463,532	5,535,802	5,576,288

表 3 精度为 0.005 时计算时间比较

Table 3 Comparison of times with gap 0.005

算法	s		
	预测场景	误差场景	
	0 场景	10 场景	100 场景
OAM	1.5	85.8	5094.1
PC	2.4	123.5	7520.2
PC-NS	2.4	43.2	2096.8

误差场景的 UC 问题, 所提算法获得了最少的发电费用。然而, 表 3 显示, 对于 10、100 两种场景下的 UC 问题, 所提算法所用求解时间要远远少于 PC 和 OAM 的求解时间, 显示了所提算法的优越性。

为了进一步验证算法 PC-NS 的有效性, 表 4 和表 5 给出了 CPLEX 取更高精度 0.0005 时的计算结果比较。从表 4 可以看到, 不计误差场景时, OAM 在更少的计算时间内获得了更好的次优解, 但三种算法得到的次优解的质量差别不大。类似于精度为 0.005 时的结果, 预测场景下 UC 问题的求解时间和发电总费用都显著少于考虑误差场景时的求解时间和发电费用。表 4 和表 5 显示, 对于含 10 个误差场景的 UC 问题, 三种算法的发电费用相差不大; 对于含 100 个误差场景的 UC 问题, 三种算法获得的发电费用相当。然而, 由表 5 可知, 对于两种场景下的 UC 问题, 所提算法所用求解时间要远远少于 PC 和 OAM 的求解时间, 进一步显示了所提算法的优越性。需要说明的是, 算法 OAM 在求解 100 场景的 UC 问题时, 在设置的 21 600 s 的限制时间内没有达到 0.0005 的计算精度。

表 4 精度为 0.0005 时发电费用比较  
Table 4 Comparison of costs with gap 0.0005

算法	s		
	预测场景	误差场景	
	0 场景	10 场景	100 场景
OAM	5,449,531	5,531,330	5,573,275
PC	5,449,884	5,530,970	5,573,374
PC-NS	5,449,884	5,531,084	5,573,330

表 5 精度为 0.0005 时计算时间比较  
Table 5 Comparison of times with gap 0.0005

算法	s		
	预测场景	误差场景	
	0 场景	10 场景	100 场景
OAM	2.8	327.0	21907.3
PC	7.8	251.3	17358.6
PC-NS	7.8	60.9	2270.4

## 6 结论

提出一种求解含风电场 UC 问题的 PC-NS 算法。基于 PC, 建立了含风电场 UC 问题的 MILP 模型。以传统 UC 问题的最优解为中心构造邻域以获得含风电场 UC 问题的可行解。再以此可行解为中心构造  $\delta$ -邻域以获得问题高质量的次优解。数值仿真结果表明, 所提算法能有效求解含风电场 UC 问题。和其他方法相比, PC-NS 算法在用时大幅减少的情况下获得了更好的次优解。

## 参考文献

- [1] WANG J, SHAHIDEHPOUR M, LI Z. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1327.
- [2] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp. DOI 10.1186/s41601-016-0016y
- [3] 夏澍, 顾劲岳, 葛晓琳, 等. 风光联合优化配置的多目标机会约束规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 35-40. XIA Shu, GU Jinyue, GE Xiaolin, et al. Multiobjective chance-constrained programming method for wind generations and photovoltaic allocating[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 35-40.
- [4] 郭小璇, 龚仁喜, 鲍海波, 等. 含新能源电力系统机会约束经济调度的二阶锥规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 43(22): 85-91. GUO Xiaoxuan, GONG Renxi, BAO Haibo, et al. Second-order cone programming method of chance constrained economic dispatch considering renewable energy sources[J]. Power System Protection and Control, 2016, 43(22): 85-91.
- [5] 谢毓广, 江晓东. 储能系统对含风电的机组组合问题影响分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 19-24. XIE Yuguang, JIANG Xiaodong. Impact of energy storage system on the unit commitment problem with volatile wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 19-24.
- [6] 叶荣, 陈皓勇, 王钢, 等. 多风电场并网时安全约束机组组合的混合整数规划解法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 29-33. YE Rong, CHEN Haoyong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming method for security-constrained unit commitment with multiple wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 29-33.
- [7] KHODAYAR M, SHAHIDEHPOUR M, WU L. Enhancing the dispatchability of variable wind generation by coordination with pumped-storage hydro units in stochastic power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2808-2818.
- [8] 赵文猛, 刘明波. 求解含风电场随机机组组合问题的动态削减多切割方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 26-33. ZHAO Wenmeng, LIU Mingbo. A dynamic reduction

- based multi-cut method for solving stochastic unit commitment with wind farm integration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(9): 26-33.
- [9] 卢鹏铭, 温步瀛, 江岳文. 基于多时间尺度协调机组组合的含风电系统旋转备用优化研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(5): 94-100.  
LU Pengming, WEN Buyang, JIANG Yuewen. Study on optimization of spinning reserve in wind power integrated power system based on multiple timescale and unit commitment coordination[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(5): 94-100.
- [10] 汪春, 吴可, 张祥文, 等. 规模化电动汽车和风电协同调度的机组组合问题研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(11): 41-48.  
WANG Chun, WU Ke, ZHANG Xiangwen, et al. Unit commitment considering coordinated dispatch of large scale electric vehicles and wind power generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(11): 41-48.
- [11] DUPACOV J, WE-KUSKA N, MISCH W. Scenario reduction in stochastic programming: an approach using probability metrics[J]. *Mathematical Programming*, 2003, 95(3): 493-511.
- [12] FRANGIONIA A, GENTILE C, LACLANDRA F. Tighter approximated MILP formulations for unit commitment problems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(1): 105-113.
- [13] BERTHOLD T. Primal heuristics for mixed integer programs[M]. Berlin: Technische Universität Berlin, 2006.
- [14] DANNA E, ROTHBERG E, LE PAPE C. Exploring relaxation induced neighborhoods to improve MIP solutions[J]. *Mathematical Programming*, 2005, 102: 71-90.
- [15] TOBIAS A. Constraint integer programming[D]. Berlin: Technische Universität Berlin, 2007.
- [16] JABR R. Tight polyhedral approximation for mixed-integer linear programming unit commitment formulations[J]. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2012, 6(11): 1104-1111.
- [17] SENJYU T, SHIMABUKURO K, UEZATO K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 882-888.
- [18] LOH W. On Latin hypercube sampling[J]. *The Annals of Statistics*, 1996, 24(5): 2058-2080.
- [19] 谢毓广. 计及网络安全约束和风力发电的机组组合问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.  
XIE Yuguang. Research on the unit commitment problem with security-constraints and wind power[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [20] HEITSCH H, MISCH W. Scenario reduction algorithms in stochastic programming[J]. *Computational Optimization and Applications*, 2003, 24(2/3): 187-206.
- [21] 全 然, 简金宝, 郑海艳. 基于外逼近方法的中期机组组合问题[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(11): 24-28, 103.  
QUAN Ran, JIAN Jinbao, ZHENG Haiyan. Medium term unit commitment based on outer approximation method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(11): 24-28, 103.

收稿日期: 2016-07-20; 修回日期: 2016-10-27

作者简介:

全 然(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为混合整数规划及其在电力系统经济调度中的应用; E-mail: quanran2003@163.com

史志鸿(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化方面的研究工作。

(编辑 张爱琴)