

考虑风电不确定性的中长期合同电量分解

刘 军¹, 龚建荣², 孙 瑜², 夏梓秣³, 袁 超³

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江电力交易中心有限公司, 浙江 杭州 310000; 3. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210000)

摘 要: 中长期合同电量交易是中国新一轮电改初期主要的交易形式。由于风电的不确定性, 中长期合同电量分解面临着巨大的挑战。在此背景下, 提出考虑风电不确定性的中长期合同电量分解算法, 建立发电成本、电量偏移和碳排放最小的日前电量分解优化模型, 并通过归一化加权法将其转化为单目标模型, 再通过修正算法解决实际发电量与计划电量的偏差问题。算例表明, 该分解算法可在实现节能减排、电量偏差最小的同时, 保证分解结果公平可行。

关 键 词: 不确定性; 合同分解; 滚动修正; 节能减排

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.010 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2021)03-0084-08

Mid-long term contract energy decomposition considering wind power uncertainty

LIU Jun¹, GONG Jianrong², SUN Yu², XIA Zimo³, YUAN Chao³

(1. Economic Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Zhejiang Power Exchange Center Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. College of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210000, China)

Abstract: Mid-long term contract energy transaction is the main form of transaction in the early stage of new round electricity reform. Due to the uncertainty of wind power, mid-long term contract energy decomposition faces enormous challenges. To solve this problem, a mid-long term contract energy decomposition algorithm considering the uncertainty of wind power is proposed. An optimization model for a day-ahead energy decomposition with minimum generation costs, power offsets, and carbon emissions is established and transformed into a single-objective model through a normalized weighting method. Then the issue of the deviation between the actual energy generation and the planned energy is solved through an amendment algorithm. As the case study shows, the decomposition algorithm can achieve energy-saving and emission reduction, and minimize the deviation of energy, while ensuring that the decomposition result is fair and feasible.

Key words: uncertainty; contract decomposition; rolling amendment; energy-saving and emission reduction

中国新一轮电力市场改革初期, 中长期交易主要采取合同电量交易形式。中长期合同电量分解是

中长期电量交易与现货电力交易兼容与衔接中的一个关键问题。中长期合同电量分解是指根据负荷预

测曲线、燃料受限情况、机组检修等因素将年度合同电量向各月度分配,以及将月度合同电量向周或各日、时段分配。由于检修变更、机组故障、一次能源限制等问题,实际发电量与分解出的计划电量往往存在偏差,因此还需要对分解方案进行滚动修正。合同电量分解得不得当,将会造成完成偏差大、执行困难及调峰能力不足等一系列问题。恰当的合同电量分解能够大大减少电网调度的复杂性,降低实时市场的价格波动,对各个电厂参与日前市场和实时市场的公平竞争,对电力市场的稳定性有着重要的作用^[1]。

目前,诸多学者对中长期合同电量分解进行了大量的研究。文献[2]提出一种确定性合约电量分解算法,并将其应用于浙江电力市场,将年合同电量直接分解到各个发电厂每个时段;文献[3]给出数学模型表达式并对电厂收益和风险进行分析;文献[4]提出一种合同电量分解的通用模型和算法,采用进度系数指标来反应发电厂完成发电指标的进度,以进度系数的方差最小为目标函数进行优化;文献[5]提出公平性判据;文献[6]给出合同电量分解结果的评估方法;文献[7]提出一种滚动修正算法对实际运行出现的偏差电量进行修正。

然而现阶段火电为主的发电方式在消耗大量化石燃料的同时造成了严重的环境污染,致使环境与资源的矛盾日益突出^[8]。同时由于拥有巨大的环境和社会效益,风电越来越受到人们的欢迎和重视。文献[9]建立了含风电的节能减排调度模型;文献[10]提出了风气互补发电系统优化调度模型;文献[11]将风电和PHEVs加以考虑,建立了节能减排机组调度模型;文献[12]建立了含风电场的电网安全经济优化调度模型。但这些研究并未涉及风电对中长期合同电量分解的影响。在优先消纳风电的情况下,风电出力的不确定性极大地增加了常规机组调度的不确定性,造成实际发电量与合同电量分解电量的较大偏差,给合同电量分解带来了巨大的挑战。文献[13]提出了一种在超前计划调度中考虑风电的时序渐进滚动修正调度模型,将中长期调度和短期调度通过电量为纽带进行联系的方式,为上述问题的解决提供了一定的思路。

该文针对当前中国风电作为优先发电计划,不

参与市场交易且全额消纳的现状,首先将中长期电量分解和日前调度相融合,提出考虑风电不确定性的常规机组中长期合同电量分解方法。然后在中长期时间尺度下,将风电预测发电量作为确定性因素进行常规机组合同电量分解。在日前调度中考虑风电不确定性以常规机组能耗成本最低、合同电量偏差最小以及碳排放最小为目标实现风电的优先消纳,并通过修正算法在合同剩余时段滚动修正实际发电量与计划电量的偏差。最后通过算例验证算法的合理性及有效性。

1 计及风电的中长期时间尺度电量分解算法

中长期合同电量分解中的年—月度分配、月—周分配以及周一日的时间尺度较大,常规机组有充裕的时间针对风电不确定性造成的电量偏差进行调整,因此该过程中将风电预测发电量作为确定性因素进行考量。现以年—月度分配为例说明,月一周和周一日的分配算法步骤与此类似。

算法采用逐段分解的思想,在每个时间单元的分解,保持该时间单元各个机组发电利用率尽可能接近。分解算法步骤如下。

1) 初始化参数,令 $t=1$, 其中, t 为时间单元数。

2) 进行第 1 阶段分配。即求解时间单元 t 内各机组最少应分解的电量,保证各机组获得最少应分解的电量。一个时间单元内各机组最少应分解的电量为

$$W'_{it} = \max\{0, m_{it}, W_i - \sum_{t=1}^{t_0-1} W_{it} - \sum_{t=t_0+1}^T M_{it}\} \quad (1)$$

式中 W'_{it} 为机组 i 在时间单元 t 内的最小分解电量; m_{it} 为机组 i 在时间单元 t 内的最小上网电量; M_{it} 为机组 i 在时间单元 t 内的最大上网电量; W_i 为机组 i 的总合同电量; W_{it} 为机组 i 在 t 时间单元内分得的电量。

3) 进行第 2 阶段分配。除去风电场预测发电量和第 1 阶段分配的电量,将时间单元 t 内剩余可分解的电量按照一定比率分配给各个机组以保证各机组发电利用率尽可能接近。第 2 阶段分配为

$$W''_{it} = \frac{k'_{it}}{\sum_{i=1}^N k'_{it}} \cdot (Q_t - Q_t^{\text{wind}} - \sum_{i=1}^N W'_{it}) \quad (2)$$

式中 Q_t 为时间单元 t 内总负荷电量; Q_t^{wind} 为时间单元 t 的风电场预测发电量; k'_{it} 为机组 i 剩余量分配比重, 即

$$k'_{it} = \frac{(W_i - W'_{it} - \sum_{t=1}^{t_0-1} W_{it})}{\sum_{t=t_0}^T M_{it}} \cdot (M_{it} - W'_{it}) \quad (3)$$

所以机组 i 在时间单元 t 分得的总电量为

$$W_{it} = W'_{it} + W''_{it} \quad (4)$$

在经过第 3 步骤的分解之后, 由于最大上网电量的约束, 如果通过剩余量的分配比重 k'_{it} 分配后, 最终获得的 W_{it} 超过了最大上网电量 M_{it} , 则时间单元 t 内机组 i 的合同电量就取最大上网电量 M_{it} 。但是这样处理会导致合同电量还有剩余, 因此需要将剩余量分解到其他还有发电能力的机组。

4) 修正各个发电厂剩余的待分解合约电量后, t 加 1, 然后返回第 2 步骤直到所有时间单元全部分解完毕。

该中长期合同电量分解算法计及了风电, 可以保证在考虑了检修、热电联产等因素的前提下将合同电量均匀地分解到各个机组的各个时间单元。

2 考虑风电不确定性的日前电量分解优化模型

2.1 目标函数

通过上节的分解算法将电量逐步分解到日, 在日前充分考虑风电的不确定性, 基于风电优先全额消纳的原则, 综合考虑发电成本、电量偏移以及碳排放最小而对常规机组进行日前电量分解优化。

针对风电不确定性, 采用场景法构建最小化常规机组发电成本和电量偏移的目标函数为

$$F_1 = \min \sum_{s=1}^S \rho_s \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_{i,t} \delta_i^s + \epsilon_{i,t} + M \sum_{i=1}^N \Delta \omega_i^s \right) \quad (5)$$

式中 ρ_s 为风电出力场景 s 的发生概率; $c_{i,t}$ 为常规机组状态标志, 开启为 1, 关闭为 0; δ_i^s 为机组 i 在场景 s 下的能耗成本; $\epsilon_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的启停成本; $\Delta \omega_i^s$ 为机组 i 在场景 s 下的电量偏差; M 为电量偏移惩罚系数; i 为机组编号, $i=1, 2, \dots, N$; t 为时间单元变量, $t=1, 2, \dots, T$; s 为场景编号, $s=1,$

$2, \dots, S$ 。

机组 i 在场景 s 下的能耗成本为

$$\delta_i^s = \alpha_i + \beta_i p_i^{ts} + \gamma_i (p_i^{ts})^2 \quad (6)$$

式中 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为机组 i 的耗量特性参数; p_i^{ts} 为机组 i 在场景 s 下第 t 时段的计划出力。

机组 i 的启停成本为

$$\epsilon_{i,t} = b_i c_{i,t} (1 - c_{i,t-1}) + g_i c_{i,t-1} (1 - c_{i,t}) \quad (7)$$

式中 b_i 为常规机组 i 的开机成本; g_i 为常规机组 i 的关机成本。

机组 i 在场景 s 下的电量偏移为

$$\Delta \omega_i^s = \left| \sum_{t=1}^T p_i^{ts} - \omega_i^d \right| \quad (8)$$

式中 ω_i^d 为通过中长期时间尺度电量分解算法分解得到的机组 i 一天内可分解电量。

同样基于风电出力不确定性场景, 构建最小化常规机组碳排放的目标函数为

$$F_2 = \min \sum_{s=1}^S \rho_s \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_{i,t} [\alpha_{ci} + \beta_{ci} p_i^{ts} + \gamma_{ci} (p_i^{ts})^2] \right\} \quad (9)$$

式中 $\alpha_{ci}, \beta_{ci}, \gamma_{ci}$ 为机组 i 的碳排放系数。

2.2 约束条件

根据机组信息、风电场功率信息以及负荷信息, 制定日前电量分解的约束条件: 有功功率约束、机组出力上下限约束、机组爬坡率约束、系统向上向下旋转备用约束。

1) 有功功率约束。

$$\sum_{i=1}^N p_i^{ts} + \sum_{k=1}^{N_w} p_{wkt}^s = Q_t^d \quad (10)$$

式中 p_{wkt}^s 为场景 s 下风电场 k 第 t 时段的功率; Q_t^d 为第 t 时段的日前负荷预测。

2) 机组出力上下限约束。

$$P_i^{\min} \leq p_i^{ts} \leq P_i^{\max} \quad (11)$$

式中 P_i^{\max}, P_i^{\min} 分别为机组 i 的出力上下限。

3) 机组爬坡率约束。

$$p_i^{ts} - p_i^{(t-1)s} \leq R_{Ui} c_{i,t} + S_{Ui} (c_{i,t} - c_{i,t-1}) \quad (12)$$

$$p_i^{(t-1)s} - p_i^{ts} \leq R_{Di} c_{i,t} + S_{Di} (c_{i,t-1} - c_{i,t}) \quad (13)$$

式中 $R_{Ui}, R_{Di}, S_{Ui}, S_{Di}$ 分别为常规机组 i 的爬坡速率、滑坡速率、开机爬坡速率和停机爬坡速率。

4) 系统向上向下旋转备用约束。

$$\sum_{i=1}^{NT} U_i^t c_i^t \geq R^t + R_1 (p_{wkt}^s) \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{NT} D_i^t c_i^t \geq R_2(p_{wkt}^s) \quad (15)$$

$$U_i^t = \min(d\% p_{i\max}, p_{i\max} - p_i^{ts}) \quad (16)$$

$$D_i^t = \min(d\% p_{i\max}, p_i^{ts} - p_{i\min}) \quad (17)$$

$$R_2(p_{wkt}^s) = R_1(P_w^{ts}) = e\% p_{wkt}^s \quad (18)$$

式中 U_i^t 、 D_i^t 为火电机组 i 在 t 时段所提供的向上、向下旋转备用; $d\%$ 为机组最大容量比例; $R_1(p_{wkt}^s)$ 、 $R_2(p_{wkt}^s)$ 为 t 时段风电 p_{wkt}^s 加入系统所需的附加向上、向下备用; $e\%$ 为风电加入所需的附加备用的一次函数系数,假设风力机组不提供备用,系统所需备用均由火电机组提供; R^t 为 t 时段系统不含风电时向上旋转备用总容量,系统旋转备用需求和系统风力发电密切相关,需同时考虑。这些复杂约束条件使得含风电场机组组合问题的求解异常困难。

2.3 多目标优化模型的转化

对于偏差电量,采取电量偏移惩罚系数使其单位与发电成本一致。对于碳排放,采取归一化法将发电成本、电量偏移目标与碳排放目标去量纲,之后对2个目标设置权重,最后累加获得单目标优化模型。权重体现了对不同目标的侧重程度,改变权重可以获得不同的优化方案。

1) 发电成本与电量偏移目标的处理。

改进后的新目标函数为

$$V_1 = \left(\frac{F_1 - F_{1\min}}{F_{1\min}} \right)^2 \quad (19)$$

式中 $F_{1\min}$ 为满足2.2节约束条件的 F_1 单目标最优值。

2) 碳排放目标的处理。

改进后的新目标函数为

$$V_2 = \left(\frac{F_2 - F_{2\min}}{F_{2\min}} \right)^2 \quad (20)$$

式中 $F_{2\min}$ 为满足2.2节约束条件的 F_2 单目标最优值。

将改进后的2个目标函数分别乘以权重再进行累加就可以获得最终的单目标优化模型,模型的目标函数为

$$f = \min(\varphi_1 V_1 + \varphi_2 V_2) \quad (21)$$

式中 f 为改进后的总目标; φ_1 为发电成本和电量偏差所占权重; φ_2 为碳排放所占权重,满足 $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$,权重由决策者决定。

3 合同电量修正算法

在实际运行时由于应对风电波动、机组故障、检修变更等原因,常规机组的实际发电量与分解的计划发电量可能不相等,需要在合同执行过程中对偏差电量进行滚动修正,使其分配到后续时间段。修正算法的步骤如下。

1) 假设 t' 为实际发电量与计划发电量出现偏差的时间单元的下一个时间单元。

2) 对机组 i 在 $t' - 1$ 时间单元实际发电量与计划发电量的偏差进行自耦修正。所谓自耦修正即将某一机组的偏差电量分配给该机组的后续时间单元。自耦修正公式为

$$W_{it}^n = \frac{W_{it}^{n-1}}{\sum_{t=t'}^T W_{it}^{n-1}} \cdot \Delta W_{it'-1}^{n-1} + W_{it}^{n-1} \quad (22)$$

式中 n 为修正计数器,每进行一次修正计数器加1,第1次修正时 $n=1$; W_{it}^{n-1} 为第 $n-1$ 次修正后机组 i 在 t' 时间单元内的电量,当 $n=1$ 时即为计划电量; $\Delta W_{it'-1}^{n-1}$ 为第 $n-1$ 次修正后机组 i 出现偏差的时间单元的偏差量; W_{it}^n 为第 n 次修正后机组 i 在时间单元 t 的电量,其中 $t = t', \dots, T$ 。

3) 对自耦修正导致的各个时间单元内负荷电量约束的偏差进行互耦修正。所谓互耦修正即将某一机组的偏差电量分配给该时间单元的其他机组。互耦修正的公式为

$$W_{it}^{n+1} = W_{it}^n \cdot \frac{Q_t^{z-1} - Q_t^{\text{wind}}}{Q_t^z} \quad (23)$$

式中 z 为自耦修正计数器,每进行一次自耦修正计数器加1,第1次自耦修正时 $z=1$; Q_t^{z-1} 为第 $z-1$ 次自耦修正时间单元 t 的总负荷电量; Q_t^z 为第 z 次自耦修正后时间单元 t 的总负荷电量; Q_t^{wind} 为时间单元 t 的风电场预测发电量; W_{it}^{n+1} 为第 $n+1$ 次修正后机组 i 在 t 时间单元的电量。

4) 更新时间单元为 $t' + 1$,并返回第2步骤直到所有时间单元全部修正完毕。

该滚动修正策略既可使实际发电计划与理想发电计划偏差最小,又可满足机组年度合同电量与月度

负荷平衡等式约束条件,以及机组技术出力限制不等式条件,在大大减少运算量的同时,还能达到合同电量分解结果最优性的要求^[14]。

4 算例分析

针对前面所述算法和模型,参考文献[15-17],其

火电机组参数、相关排放系数及风电场相关数据如表 1 所示,此外根据中国某省实际数据设置机组合同电量、机组受限量以及系统各日负荷量等参数,设系统中有 10 台火电机组和 1 台风电场,假设机组最大容量比例 $d\%$ 取 20%,风电加入所需的附加备用的一次函数系数 $e\%$ 取 20%。表 2 为机组电量受限表,表 3 为系统各日负荷电量表,图 1 为风电出力预测结果。

表 1 各机组数据

Table 1 Unit data

机组	$R_U/$ (MW/h)	$R_D/$ (MW/h)	$\alpha_c/$ (kg/h)	$\beta_c/$ (kg/(MW·h))	$\gamma_c/$ (kg/(MW ² ·h))	α	β	γ	W/ (MW·h)
1	130	130	130	-2.86	0.022	28.0	0.143 0	0.000 13	161 280
2	130	130	132	-2.72	0.020	20.0	0.108 5	0.000 13	161 280
3	60	60	137.70	-2.94	0.044	13.1	0.400 0	0.000 29	201 600
4	60	60	130	-2.35	0.058	11.0	0.376 0	0.000 28	446 800
5	90	90	125	-2.36	0.065	10.0	0.501 5	0.000 21	198 660
6	40	40	110	-2.28	0.080	10.0	0.810 1	0.000 36	156 240
7	40	40	135	-2.36	0.075	10.3	0.812 0	0.000 36	416 640
8	40	40	157	-1.29	0.082	9.0	1.203 0	0.003 10	300 000
9	40	40	160	-1.14	0.090	8.1	1.203 0	0.003 11	252 000
10	40	40	137.70	-2.14	0.084	8.1	1.403 0	0.003 12	554 000

表 2 机组电量限制

Table 2 Unit power limit

日期	机组	受限量/h	原因
1	1	10	检修
1	9	12	水电电量受限
2	5	5	供暖
4	10	8	燃料受限
7	8	15	检修

表 3 系统各日负荷电量

Table 3 System daily load

日期	电量/(MW·h)	日期	电量/(MW·h)
1	417 320	5	434 180
2	427 600	6	364 770
3	440 890	7	325 200
4	438 540		

为简化整体流程,仿真算例中以周合同电量向日分解再进行日前分解优化为例,进行验证。

1) 不考虑滚动修正的分解。

不考虑滚动修正的分解结果如表 4 所示。从表 4 可以看到,各机组在各日所分得的合同电量之和等于其待分解合同电量;各日各机组分得的合约电量之

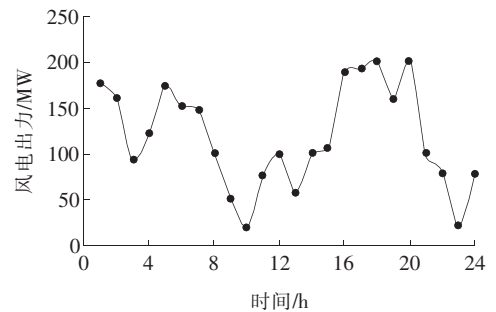


图 1 风电出力预测结果

Figure 1 Wind power output prediction results

和等于该日总负荷电量;检修与热电联产也被加以考虑,如机组 1 在第 1 天检修,分解的电量不超过该日最大上网电量;在各个时间单元,各机组的发电利用率均与平均发电利用率接近。

2) 考虑实际发电量与计划发电量存在偏差。

假设每台机组每个时段的实际发电量与表 4 分解结果有 $\pm 5\%$ 以内的随机偏差,进行滚动修正后的结果如表 5 所示。从表 5 看出,经过滚动修正后,各机组在各日所分得的合同电量之和依旧等于其待分解合同电量,各日各机组分得的合约电量之和依旧等于该日总负荷电量。

表 4 不考虑滚动修正的分解结果

Table 4 Decomposition result regardless of the rolling correction

机组	各日分解得到的合同电量/(MW·h)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	14 175.5	25 131.5	26 099.4	27 840.7	25 666.1	21 698.5	20 668.4
2	22 854.3	23 648.8	24 559.6	26 198.2	24 151.8	20 418.4	19 449.0
3	28 567.9	29 560.9	30 699.5	32 747.7	30 189.8	25 522.9	24 311.2
4	63 314.2	65 515.1	68 038.3	72 577.8	66 908.6	56 565.7	53 880.2
5	28 151.3	31 613.5	29 720.3	31 703.3	29 226.9	24 690.1	23 554.6
6	22 140.1	22 909.7	23 792.1	25 379.5	23 397.1	19 655.3	18 966.2
7	59 040.4	61 092.7	63 445.6	67 678.7	62 392.2	52 460.7	50 529.9
8	46 679.6	48 309.8	50 134.3	53 303.1	48 403.5	39 147.9	14 021.8
9	49 966.3	34 515.6	35 845.0	38 236.5	35 249.8	29 800.8	28 386.0
10	82 430.4	85 302.4	88 555.9	62 874.4	88 594.4	74 808.7	71 432.8

表 5 滚动修正后的结果

Table 5 Result after rolling correction

机组	各日分解得到的合同电量/(MW·h)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	13 133.3	24 948.7	26 217.6	27 843.4	25 932.1	22 231.2	20 973.4
2	18 883.3	24 252.3	24 920.1	27 122.1	24 813.4	21 086.7	20 202.2
3	27 590.1	30 482.2	32 097.8	33 235.4	29 048.9	25 498.9	23 650.1
4	64 141.1	65 212.2	67 526.5	73 137.6	66 651.2	55 854.5	54 280.1
5	27 805.5	31 403.3	29 819.8	31 213.2	29 722.1	25 285.6	23 414.5
6	21 733.3	22 852.2	23 687.6	25 737.8	23 638.9	19 312.1	19 281.2
7	57 176.6	61 555.6	64 269.8	67 028.9	62 471.2	53 472.3	50 669.8
8	50 109.9	47 753.4	48 569.8	52 682.3	48 742.3	38 020.1	14 125.4
9	50 456.6	33 944.2	35 241.5	37 957.6	35 614.3	29 622.1	29 166.5
10	86 293.4	85 198.8	88 546.5	62 586.7	87 550.1	74 390.1	69 437.6

3) 日前电量分解优化。

对第 7 天的分解结果进行日前分解优化,基于节能减排与偏差最小的含风电场日前调度机组组合模型的惩罚系数设为 100 \$/MW。通过遗传算法求得系统发电成本与电量偏差目标、碳排放目标的单目标的最优值 F_{1min} 和 F_{2min} 分别为 405 164 \$ 和 15 787 t。表 6 给出了不同权重下,对式(19)通过归一化加权得到的新目标函数 f 进行优化求解的结果。

表 6 中, $\varphi_1=1$ 、 $\varphi_2=0$ 即为考虑发电成本和电量偏差的单目标优化; $\varphi_1=0$ 、 $\varphi_2=1$ 即为仅考虑碳排放的单目标优化。在发电成本、电量偏移及碳排放协调优化中,随着 φ_1 权重的减小, φ_2 权重的增加,系统的运行成本不断增加,碳排放量不断减少。由于环保等政策变化,导致决策者决策因素变化,因

此权重可根据情况需求做出相应设定。若取 φ_1 和 φ_2 分别为 0.7 和 0.3,则日前最优分解方案如表 7 所示。

表 6 不同权重函数值

Table 6 Different weight function values

权重	发电电量、偏移成本/\$	排放/t
(1,0)	407 851	17 622
(0.9,0.1)	411 370	16 524
(0.8,0.2)	412 954	16 410
(0.7,0.3)	414 150	16 236
(0.6,0.4)	414 260	16 154
(0.5,0.5)	415 030	16 114
(0.4,0.6)	417 265	16 090
(0.3,0.7)	417 900	16 007
(0.2,0.8)	420 230	15 958
(0.1,0.9)	421 124	15 937
(0,1)	431 680	15 897

表7 火电机组优化出力
Table 7 Thermal power unit optimization output

时段	出力/MW									
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
1	0	259.466	0	84.005	0	0	79.937	0	48.289	48.301
2	207.345	195.193	0	31.196	0	0	81.483	0	44.680	30.102
3	212.291	184.815	0	89.488	51.356	42.080	78.084	27.753	22.886	46.242
4	193.101	224.305	54.838	75.046	55.450	37.181	78.043	36.039	35.114	36.878
5	213.930	196.372	86.404	70.412	27.165	24.022	82.238	50.697	41.074	32.681
6	240.331	224.927	65.935	89.983	81.020	45.406	71.956	26.042	52.132	52.263
7	247.604	289.306	72.670	123.177	54.047	46.955	47.957	29.339	54.501	39.439
8	220.275	304.240	113.366	75.191	117.382	49.447	77.572	33.496	54.869	54.157
9	271.425	361.218	110.258	127.697	126.315	49.571	79.847	22.062	46.741	54.862
10	359.414	400.611	116.984	124.644	74.694	70.924	82.524	50.477	54.666	45.059
11	287.771	391.466	115.346	128.046	131.615	70.826	80.820	54.930	54.878	54.298
12	351.586	415.982	114.898	98.970	103.232	71.858	84.742	49.137	54.895	54.696
13	313.559	420.946	100.757	129.653	90.334	58.358	80.857	36.864	53.943	54.723
14	335.818	340.065	95.718	127.040	45.300	58.968	71.408	22.993	47.602	50.084
15	293.034	300.667	102.557	72.065	74.717	42.611	72.444	31.240	50.035	48.625
16	176.427	220.631	52.949	110.705	73.928	60.344	77.944	16.168	36.020	44.880
17	189.712	222.088	72.039	101.032	37.657	28.706	69.011	19.671	44.029	31.050
18	224.234	271.510	45.553	60.568	54.810	57.973	66.369	16.895	54.557	47.527
19	233.470	317.349	81.470	98.771	59.719	35.306	57.899	52.043	49.370	54.597
20	227.359	354.583	127.608	123.454	105.543	50.165	84.131	23.688	53.266	50.196
21	275.206	329.683	101.868	72.894	133.962	47.261	80.008	44.724	54.891	54.501
22	201.398	289.772	98.692	117.655	74.079	30.736	79.205	33.171	41.035	54.251
23	163.962	266.498	47.684	79.968	74.347	55.055	84.615	21.925	35.470	50.471
24	160.417	164.466	75.973	62.198	73.049	26.869	69.998	11.570	36.504	38.952

5 结语

该文针对年一月一周一日等不同时间尺度,提出了考虑风电不确定性的常规机组中长期合同电量分解算法。通过算例分析可以得到以下结论:

1)所提分解算法拥有求解速度快、分解结果公平可行的优点;

2)分解算法实现了计及发电成本、电量偏移以及碳排放的协调优化;

3)修正算法采用自耦和互耦滚动修正的方式有效解决了实际发电量与计划发电量的偏差问题。

随着中国电力市场改革的推进,可再生能源电力将逐步参与市场交易,中长期合同电量分解也将面临新的挑战,后续研究将对此进行探索,为电力市场的稳定提供相关建议。

参考文献:

- [1] 刘德旭,刘艳,潘永旗,等. 基于可再生能源发电优先消纳的电力电量平衡模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2020,36(1):64-71.
LIU Dexu, LIU Yan, PAN Yongqi, et al. Research on power balance model based on priority consumption of renewable energy power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 64-71.
- [2] 戴铁潮,张丹. 确定性合约电量分解算法在浙江发电市场的应用[J]. 华东电力, 2000, 28(10): 7-9.
DAI Tiechao, ZHANG Dan. Application of resoluting computation of decisive contract electric energy in Zhejiang generation power market[J]. East China Electric Power, 2000, 28(10): 7-9.
- [3] 赵学顺,戴铁潮,黄民翔. 电力市场中风险规避问题的研究(二)——差价合约分析系统的实现[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 16-19.
ZHAO Xueshun, DAI Tiechao, HUANG Mingxiang.

- Study on risk evasion in electricity marketpart two-implementation of an analytical system of the contract for differences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(8): 16-19.
- [4] 黎灿兵,胡亚杰,赵弘俊,等. 合约电量分解通用模型与算法[J]. 电力系统自动化,2007,31(11):26-30.
LI Canbing, HU Yajie, ZHAO Hongjun, et al. General model and algorithm for contract energy decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (11):26-30.
- [5] 陈建华,张宁,戴铁潮,等. 确定性电量分解算法实证分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(2):21-25.
CHEN Jianhua, ZHANG Ning, DAI Tiechao, et al. Empirical analysis on the deterministic contract decomposition algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(2): 21-25.
- [6] 陈雨果,王一,李嘉龙,等. 双边交易合约电量的分解模型与结果评估[J]. 南方电网技术,2015,9(8):32-37.
CHEN Yuguo, WANG Yi, LI Jialong, et al. Bilateral energy trade contract decomposition model and results evaluation [J]. Southern Power System Technology, 2015,9(8):32-37.
- [7] 温丽丽,刘俊勇,吴志云,等. 基于月度滚动修正的合同电量分解算法与应用[J]. 现代电力,2008,25(1):82-87.
WEN Lili, LIU Junyong, WU Zhiyun, et al. Study and application of resolution algorithm of contract volume based on monthly rolling amendment[J]. Modern Electric Power, 2008,25(1): 82-87.
- [8] 赵东元,胡楠,傅靖,等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(24):1-8.
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(24):1-8.
- [9] 李有亮,张炜,彭伟,等. 风电并网后的电力系统节能减排优化调度[J]. 电器与能效管理技术,2018(7):78-82.
LI Youliang, ZHANG Wei, PENG Wei, et al. Energy-saving and emission-reduction dispatching of power system with wind power Integration[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(7):78-82.
- [10] 周计晨,吕胤杰,杨诚之,等. 考虑风电出力不确定性的分布鲁棒主备协同优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(20):66-73.
ZHOU Jichen, LV Yinjie, YANG Chengzhi, et al. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve dispatch considering uncertain wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2020,48 (20):66-73.
- [11] 陈庆攀,刘洋,许立雄,等. 含风电的电力系统鲁棒优化调度[J]. 电测与仪表,2020,57(8): 78-84.
CHEN Qingpan, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Robust optimal dispatch of power system containing wind power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020,57(8): 78-84.
- [12] 池喜洋,竺炜,刘长富,等. 含大型风电场的电网安全经济优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33 (1):125-131.
CHI Xiyang, ZHU Wei, LIU Changfu, et al. Security and economic optimization dispatch for power grid integrating large-scale wind farm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018,33(1): 125-131.
- [13] 董京营,高红均,刘俊勇,等. 风电接入下的时序渐进滚动修正调度模型[J]. 可再生能源, 2017, 35 (11): 1711-1718.
DONG Jingying, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. The gradually time-sequential rolling revising dispatch model with wind power integration[J]. Renewable Energy Resources, 2017,35(11): 1711-1718.
- [14] 王冠群,刘锋,梅生伟,等. 合同电量优化分解模型及算法[J]. 电机与控制学报,2012,16(7): 58-64.
WANG Guanqun, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Optimization model and algorithm for contract energy decomposition[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(7): 58-64.
- [15] Ongsakul W, Petcharaks N. Unit commitment by enhanced adaptive lagrangian relaxation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004,19(1): 620-628.
- [16] 任德江,吴杰康,毛骁,等. 考虑风电消纳的综合能源系统源荷协调运行优化方法[J]. 智慧电力, 2019, 47 (9): 37-44.
REN Dejiang, WU Jiekang, MAO Xiao, et al. Optimal method for source-load coordinated operation of integrated energy system considering wind power absorption[J]. Smart Power, 2019,47(9):37-44.
- [17] 王源,南海鹏,关欣. 风水储微电网优化调度策略研究[J]. 高压电器, 2020,56(5):216-222.
WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin. Optimal scheduling strategy of wind-hydro-storage micro-grid [J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(5):216-222.