

## 基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行调度模型

张刘冬<sup>1</sup>,袁宇波<sup>1</sup>,孙大雁<sup>2,3</sup>,袁晓冬<sup>1</sup>,李强<sup>1</sup>,苏大威<sup>3</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 211103;

2. 河海大学 能源与电气工程学院,江苏 南京 211100;3. 国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 210024)

**摘要:**为了全面和准确地考虑风电出力的不确定性和消纳能力,并兼顾系统运行的经济性和可靠性,通过在风电不确定区间可优化的鲁棒区间经济调度模型中引入常规机组和储能系统运行状态的离散决策变量,建立风储联合运行的双层鲁棒区间机组组合模型。针对连续变量和离散变量间存在耦合关系,导致计算过程中对偶转换失效而使模型难以求解的问题,提出基于 Benders 分解算法的两阶段迭代求解策略。仿真分析表明,所提模型在确定风储联合运行方式时,能更全面地考虑风电不确定性及消纳能力对系统运行经济性和可靠性的影响。

**关键词:**风力发电;储能系统;鲁棒区间优化;机组组合;Benders 分解

**中图分类号:**TM 761;TM 614

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.009

### 0 引言

由于风电的随机性和低可预测性以及源网的不协调发展,许多国家和地区的弃风现象比较严重。通过将储能系统(包括电化学储能装置、抽水蓄能机组等)与风电场联合运行,提升风电的消纳水平受到了广泛关注<sup>[1]</sup>。当前国内外学者<sup>[2-9]</sup>在风储联合运行的优化调度方面已进行了大量的研究工作。

针对风电不确定性的不同处理方式,可将其归纳为4类方法:确定性方法<sup>[2-3]</sup>、模糊数学方法<sup>[4]</sup>、随机规划方法<sup>[5-6]</sup>和鲁棒优化方法<sup>[7-9]</sup>。其中,确定性方法虽简单,但忽略了风电出力不确定性的影响,难以兼顾风储联合运行的经济性和可靠性。文献[4]提出了基于相关机会目标规划的风光储联合运行调度策略,但将风电的出力表示为确定性功率值和具有模糊性的误差值之和需要进一步商榷。随机规划方法<sup>[5-6]</sup>依据风电功率预测误差,模拟未来风电的出力场景,但实际运行中难以准确获取风电预测误差概率分布,并且为了达到较高的求解精度需要抽样出海量场景,限制了其大规模应用场合。鲁棒优化方法采用不确定参数集描述风电的不确定性,该区间集合在实际中容易获得,而且模型求解效率高,求解结果考虑了最极端情况,安全性可以保证。但文献[7-9]尚无法从系统旋转备用约束和网络安全约束方面优化风电波动区间,难以全面和准确地考虑风电消纳能力对常规机组和储能系统运行方式的影响。

为此,本文在不确定区间可优化的双层鲁棒区间经济调度模型<sup>[10]</sup>中加入常规机组和储能系统运行状态的离散决策变量,构建风储联合运行的双层鲁棒区间机组组合模型,并提出基于 Benders 分解算法的两阶段迭代求解策略。具体地,通过将离散和连续变量分别作为第1阶段和第2阶段的决策变量,消除两者间的耦合关系,再根据线性对偶理论,将构建的双层模型等效转化为单层两阶段模型,并利用 Benders 分解算法对两阶段模型进行逐次交替迭代求解。在含风电场的 IEEE-RTS 26 机测试系统上进行蒙特卡洛仿真,验证了所提模型及算法的有效性和优越性。

### 1 风储联合运行的鲁棒区间调度模式

在如图1所示的风储联合运行的鲁棒区间调度模式中,首先风电场在日前向调控中心上报各自的风电功率预测值及其波动范围,形成计及风电不确定性的风电功率预测区间 $[p_{wt}^w, \bar{p}_{wt}^w]$ 。调控中心以保证系统物理约束和安全约束为前提,根据该区间以

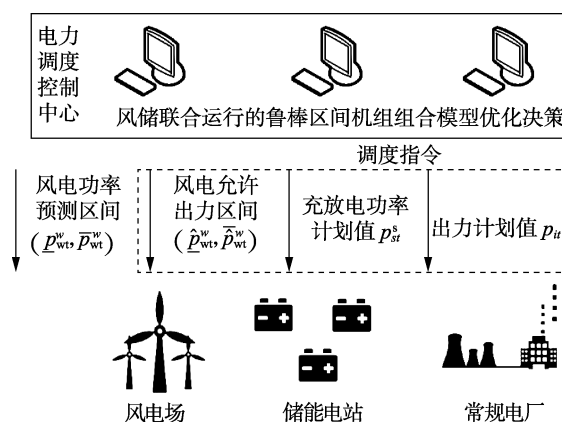


图1 风储联合运行的鲁棒区间调度模式示意图

Fig.1 Schematic diagram of robust interval dispatch mode for joint operation of wind-storage system

收稿日期:2018-01-09;修回日期:2018-08-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0903300);国家电网公司科技项目(5210EF17001C)

Project supported by the National Key Technology R&D Program of China(2017YFB0903300) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5210EF17001C)

及负荷预测信息进行鲁棒区间调度决策,计算各风电场的风电出力允许区间 $[\hat{p}_{wt}^w, \bar{p}_{wt}^w]$ 、储能电站的充放电功率计划值 $p_{st}^s$ 以及常规机组的出力计划值 $p_{it}$ 。然后,调控中心将计算结果作为调度指令下发。当实际可用风电功率在允许出力区间 $[\hat{p}_{wt}^w, \bar{p}_{wt}^w]$ 内或小于 $\hat{p}_{wt}^w$ 时,风电场运行于最大功率点跟踪模式,最大限度地捕获风能;当实际可用风电功率大于 $\bar{p}_{wt}^w$ 时,风电场将其出力控制为 $\bar{p}_{wt}^w$ 。该方法不仅有利于风电消纳,而且易被调度运行人员理解和接受,具有实际可操作性。

## 2 双层鲁棒区间机组组合模型

### 2.1 目标函数

风储联合运行调度模型一般以最小化常规机组的发电成本 $F_{GC}$ 、储能系统运行成本 $F_{SC}$ 以及弃风惩罚成本 $F_{WC}$ 为目标函数,如式(1)所示。

$$\min \{F_{GC} + F_{SC} + F_{WC}\} \quad (1)$$

常规机组的发电成本包括出力成本、旋转备用成本以及开停机成本3个部分:

$$F_{GC} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{k=1}^{N_K} (c_{kit} p_{kit} + c_{\min,i} u_{it}) + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_I} (c_{ru,i} r_{it}^u + c_{rd,i} r_{it}^d) + \left[ \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_I} c_{su,i} u_{it} (1 - u_{it-1}) + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_I} c_{sd,i} u_{it-1} (1 - u_{it}) \right] \quad (2)$$

其中, $N_T$ 为机组组合的总时段数目; $N_I$ 和 $N_K$ 分别为常规机组数目和常规机组的二次凸函数出力成本经线性化后的分段数目; $c_{ki}$ 和 $c_{\min,i}$ 分别为常规机组 $i$ 的出力成本经线性化后的第 $k$ 段成本斜率和最小出力成本,并满足 $c_{1i} \leq c_{2i} \leq \dots \leq c_{N_{Ki}}$ ;  $p_{kit}$ 为第 $t$ 时段常规机组 $i$ 在第 $k$ 段的有功出力;二元整型变量 $u_{it}$ 表示第 $t$ 时段机组 $i$ 的运行和停运2种状态; $r_{it}^u$ 和 $r_{it}^d$ 分别为第 $t$ 时段机组 $i$ 提供的上、下旋转备用容量; $c_{ru,i}$ 和 $c_{rd,i}$ 分别为机组 $i$ 的上、下备用成本系数; $c_{su,i}$ 和 $c_{sd,i}$ 分别为机组 $i$ 的开机和停机成本系数。

$F_{SC}$ 包括充放电成本和循环成本:

$$F_{SC} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{s=1}^{N_S} \{c_{sc,s} p_{st}^{s,c} + c_{sd,s} p_{st}^{s,d} + c_{\delta,s} [I_{st}^{s,c} (1 - I_{st-1}^{s,c}) + I_{st}^{s,d} (1 - I_{st-1}^{s,d})]\} \quad (3)$$

其中, $N_S$ 为储能系统数目; $p_{st}^{s,c}$ 、 $p_{st}^{s,d}$ 分别为第 $t$ 时段储能系统 $s$ 的充电功率和放电功率; $c_{sc,s}$ 、 $c_{sd,s}$ 分别为相应的充、放电功率成本系数; $I_{st}^{s,c}$ 、 $I_{st}^{s,d}$ 分别表示第 $t$ 时段储能系统 $s$ 是否处于充电和放电状态的二元整型变量; $c_{\delta,s}$ 为循环成本系数。

为了最大限度地减少弃风,需要对预测出力上下界与允许出力上下界之间的偏差进行惩罚,惩罚成本的表达式为:

$$F_{WC} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{w=1}^{N_W} V_w [(\bar{p}_{wt}^w - \hat{p}_{wt}^w) + (\hat{p}_{wt}^w - \underline{p}_{wt}^w)] \quad (4)$$

其中, $N_W$ 为风电场数目; $V_w$ 为对风电场 $w$ 的上下界偏差惩罚成本系数。

### 2.2 约束条件

a. 功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_I} \left( u_{it} p_{\min,i} + \sum_{k=1}^{N_K} p_{kit} \right) + \sum_{w=1}^{N_W} p_{wt}^w + \sum_{s=1}^{N_S} p_{st}^s = \sum_{j=1}^{N_J} L_{f,jt} \quad (5)$$

其中, $N_J$ 为系统负荷节点数目; $L_{f,jt}$ 为第 $t$ 时段节点 $j$ 的负荷预测值; $p_{it} = u_{it} p_{\min,i} + \sum_{k=1}^{N_K} p_{kit}$ 和 $p_{\min,i}$ 分别为第 $t$ 时段常规机组 $i$ 的有功出力和最小出力; $p_{wt}^w$ 为第 $t$ 时段风电场 $w$ 的经济最优出力计划; $p_{st}^s = p_{st}^{s,d} - p_{st}^{s,c}$ 。

b. 常规机组的出力上下限约束。

$$\begin{cases} 0 \leq p_{1it} \leq u_{it} (p_{g,1i} - p_{\min,i}) \\ 0 \leq p_{2it} \leq u_{it} (p_{g,2i} - p_{g,1i}) \\ \vdots \\ 0 \leq p_{N_{Ki}t} \leq u_{it} (p_{\max,i} - p_{g,(N_K-1)i}) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $p_{\min,i}$ 、 $p_{g,1i}$ 、 $p_{g,2i}$ 、 $\dots$ 、 $p_{g,(N_K-1)i}$ 和 $p_{\max,i}$ 为将常规机组 $i$ 的出力范围 $[p_{\min,i}, p_{\max,i}]$ 线性化 $N_K$ 段后的功率分点。

c. 常规机组的最小开停机时间约束。

引入机组 $i$ 在初始阶段需保持开机状态的调度时段数,记为 $U_{Ti}$ ,计算式如下:

$$U_{Ti} = \max \{0, \min [N_T, (T_{\min,i}^{\text{on}} - T_{i0}^{\text{on}}) u_{i0}]\} \quad (7)$$

其中, $T_{\min,i}^{\text{on}}$ 为机组 $i$ 的最小开机时间; $T_{i0}^{\text{on}}$ 为机组 $i$ 在调度开始时已经开机的时间; $u_{i0}$ 为机组 $i$ 的初始运行状态。由于机组只要在开机状态就须满足最小开机时间才能停机,因此该约束可写为:

$$u_{it} = 1 \quad t = 1, 2, \dots, U_{Ti} \quad (8)$$

$$s_{it} T_{\min,i}^{\text{on}} \leq \sum_{\tau=t}^{t+T_{\min,i}^{\text{on}}-1} u_{i\tau} \quad t = U_{Ti} + 1, \dots, N_T - T_{\min,i}^{\text{on}} + 1 \quad (9)$$

$$s_{it} (N_T - t + 1) \leq \sum_{\tau=t}^{N_T} u_{i\tau} \quad t = N_T - T_{\min,i}^{\text{on}} + 2, \dots, N_T \quad (10)$$

其中, $s_{it}$ 为二元整型变量,机组 $i$ 在第 $t$ 时段处于开机过程时其值为1,否则为0。

同理,引入机组 $i$ 在初始阶段需保持停机状态的调度时段数,记为 $D_{Ti}$ ,计算式如下:

$$D_{Ti} = \max \{0, \min [N_T, (T_{\min,i}^{\text{off}} - T_{i0}^{\text{off}}) (1 - u_{i0})]\} \quad (11)$$

其中,  $T_{\min,i}^{\text{off}}$  为机组  $i$  的最小停机时间;  $T_{i0}^{\text{off}}$  为机组  $i$  在初始已经停机的时间。由于机组只要在停机状态就必须满足最小停机时间才能开机,因此该约束可写为:

$$u_{it} = 0 \quad t = 1, 2, \dots, D_{Ti} \quad (12)$$

$$(1-d_{it})T_{\min,i}^{\text{off}} \geq \sum_{\tau=t}^{t+T_{\min,i}^{\text{off}}-1} u_{i\tau} \quad t = D_{Ti} + 1, \dots, N_T - T_{\min,i}^{\text{off}} + 1 \quad (13)$$

$$(1-d_{it})(N_T - t + 1) \geq \sum_{\tau=t}^{N_T} u_{i\tau} \quad t = N_T - T_{\min,i}^{\text{off}} + 2, \dots, N_T \quad (14)$$

其中,  $d_{it}$  为二元整型变量, 机组  $i$  在第  $t$  时段处于停机过程时其值为 1, 否则为 0。  $s_{it}$ 、 $d_{it}$  和  $u_{it}$  满足如下关系:

$$s_{it} - d_{it} = u_{it} - u_{it-1} \quad (15)$$

$$s_{it} + d_{it} \leq 1 \quad (16)$$

此外, 目标函数式(1)中机组  $i$  的开机和停机成本则可分别线性化为  $c_{su,i}s_{it}$  和  $c_{sd,i}d_{it}$ 。

#### d. 旋转备用约束。

$$r_{it}^u \leq \min(u_{it}p_{\max,i} - p_{it}, u_{it}r_i^u \Delta T) \quad (17)$$

$$r_{it}^d \leq \min(p_{it} - u_{it}p_{\min,i}, u_{it}r_i^d \Delta T) \quad (18)$$

其中,  $r_i^u$  和  $r_i^d$  分别为机组  $i$  在单位时段内的上、下爬坡速率;  $\Delta T$  为每个调度时段的时长。

违反常规机组的旋转备用约束会导致弃风。从系统动态响应能力的角度分析, 风电功率突变会减小常规机组的旋转备用容量, 导致系统安全水平降低, 因而该场景也就越恶劣, 由此构成判别最恶劣场景的式(19)——(22)。

$$\begin{cases} R_t^u = \min_{p_{wt}^{w,1}} \left( \sum_{i=1}^{N_I} p_{it} + \sum_{i=1}^{N_I} r_{it}^u + \sum_{w=1}^{N_W} p_{wt}^{w,1} - \sum_{j=1}^{N_J} L_{t,jt} \right) \\ \text{s.t.} \quad \hat{p}_{wt}^w \leq p_{wt}^{w,1} \leq \bar{p}_{wt}^w \quad \forall w \in W \end{cases} \quad (19)$$

$$R_t^u \geq R_{\min,t}^u \quad (20)$$

$$\begin{cases} R_t^d = \min_{p_{wt}^{w,2}} \left( \sum_{j=1}^{N_J} L_{t,jt} - \sum_{i=1}^{N_I} p_{it} + \sum_{i=1}^{N_I} r_{it}^d - \sum_{w=1}^{N_W} p_{wt}^{w,2} \right) \\ \text{s.t.} \quad \hat{p}_{wt}^w \leq p_{wt}^{w,2} \leq \bar{p}_{wt}^w \quad \forall w \in W \end{cases} \quad (21)$$

$$R_t^d \geq R_{\min,t}^d \quad (22)$$

其中,  $W$  为风电场集合;  $R_t^u$  和  $R_t^d$  分别为第  $t$  时段最恶劣场景下系统提供的上、下旋转备用容量;  $p_{wt}^{w,1}$  和  $p_{wt}^{w,2}$  分别为上、下旋转备用约束的恶劣场景中风电出力优化变量;  $R_{\min,t}^u$  和  $R_{\min,t}^d$  分别为第  $t$  时段系统的上、下旋转备用容量要求。

#### e. 常规机组的爬坡率约束。

从系统动态响应能力的角度, 最恶劣场景下常规机组的爬坡率约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_I} \Delta r_{it}^u = \sum_{i=1}^{N_I} r_{it}^u - R_t^u \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^{N_I} \Delta r_{it}^d = \sum_{i=1}^{N_I} r_{it}^d - R_t^d \quad (24)$$

$$0 \leq \Delta r_{it}^u \leq r_{it}^u \quad (25)$$

$$0 \leq \Delta r_{it}^d \leq r_{it}^d \quad (26)$$

$$p_{it} + \Delta r_{it}^u - p_{it-1} + \Delta r_{it-1}^d \leq (1-s_{it})r_i^u \Delta T + s_{it}p_{\min,i} \quad (27)$$

$$p_{it-1} + \Delta r_{it-1}^u - p_{it} + \Delta r_{it}^d \leq (1-d_{it})r_i^d \Delta T + d_{it}p_{\min,i} \quad (28)$$

其中,  $\Delta r_{it}^u$  和  $\Delta r_{it}^d$  分别为式(19)、(21)所示 2 种最恶劣场景下常规机组  $i$  在第  $t$  时段的出力上、下调整量。在机组组合问题中, 第  $t-1$ 、 $t$  调度时段内机组有可能处于停机状态, 因此式(27)、(28)假设机组一旦开机, 则能达到最小出力, 机组在停机前为最小出力。

#### f. 网络安全约束。

违反网络安全约束也会导致弃风。从网络安全的角度分析, 风电出力在边界取值时会增大线路负载率, 导致系统安全水平降低, 因而该场景也就越恶劣, 由此构成判别最恶劣场景的式(29)和式(30)。

$$\begin{cases} F_{lt}^+ = \max_{p_{wt}^{w,3}} \left[ \sum_{b=1}^{N_B} S_{Flb} \left( \sum_{i \wedge b} p_{it} + \sum_{w \wedge b} p_{wt}^{w,3} + \sum_{s \wedge b} p_{st}^s - \sum_{j \wedge b} L_{t,jt} \right) \right] \leq U_l \\ \text{s.t.} \quad \hat{p}_{wt}^w \leq p_{wt}^{w,3} \leq \bar{p}_{wt}^w \quad \forall w \in W; l=1, 2, \dots, N_L \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} F_{lt}^- = \min_{p_{wt}^{w,4}} \left[ \sum_{b=1}^{N_B} S_{Flb} \left( \sum_{i \wedge b} p_{it} + \sum_{w \wedge b} p_{wt}^{w,4} + \sum_{s \wedge b} p_{st}^s - \sum_{j \wedge b} L_{t,jt} \right) \right] \geq -U_l \\ \text{s.t.} \quad \hat{p}_{wt}^w \leq p_{wt}^{w,4} \leq \bar{p}_{wt}^w \quad \forall w \in W; l=1, 2, \dots, N_L \end{cases} \quad (30)$$

其中,  $N_B$  为系统节点数目;  $N_L$  为支路数目;  $S_{Flb}$  为节点  $b$  对支路  $l$  的转移分布因子<sup>[11]</sup>;  $i \wedge b$ 、 $w \wedge b$ 、 $s \wedge b$  和  $j \wedge b$  分别表示与节点  $b$  相连的机组  $i$ 、风电场  $w$ 、储能系统  $s$  和负荷  $j$ ;  $F_{lt}^+$  和  $F_{lt}^-$  分别为第  $t$  时段支路  $l$  的最大正、反向有功潮流功率;  $p_{wt}^{w,3}$  和  $p_{wt}^{w,4}$  分别为支路正、反向有功潮流功率约束的恶劣场景中风电出力优化变量;  $U_l$  为支路  $l$  的有功潮流限值。

#### g. 风电允许出力区间和风电出力约束。

$$\hat{p}_{wt}^w \leq p_{wt}^w \leq \bar{p}_{wt}^w \quad (31)$$

$$\hat{p}_{wt}^w \leq \underline{p}_{wt}^w \quad (32)$$

#### h. 储能系统运行约束。

$$V_{st}^s = V_{st-1}^s + (\eta_c p_{st}^{s,c} - p_{st}^{s,d} / \eta_d) \Delta T \quad (33)$$

$$V_{s,\min}^s \leq V_{st}^s \leq V_{s,\max}^s \quad (34)$$

$$p_{s,\min}^{s,c} I_{st}^{s,c} \leq p_{st}^{s,c} \leq p_{s,\max}^{s,c} I_{st}^{s,c} \quad (35)$$

$$p_{s,\min}^{s,d} I_{st}^{s,d} \leq p_{st}^{s,d} \leq p_{s,\max}^{s,d} I_{st}^{s,d} \quad (36)$$

$$I_{st}^{s,c} + I_{st}^{s,d} \leq 1 \quad (37)$$

其中,  $V_{st}^s$  为第  $t$  时段储能系统  $s$  的电量;  $V_{s,\max}^s$  和  $V_{s,\min}^s$  分别为储能系统  $s$  的最大和最小电量限值;  $\eta_c$  和  $\eta_d$  分别为储能系统的充电和放电效率, 且每个调度周期初始和最终时段储能系统的电量分别须为  $V_0^s$  和  $V_{N_T}^s$ ;  $p_{s,\max}^{s,c}$ 、 $p_{s,\min}^{s,c}$ 、 $p_{s,\max}^{s,d}$  和  $p_{s,\min}^{s,d}$  分别为储能系统  $s$  各时段最大、最小的充电和放电功率。式(33)和式(34)为储能系统  $s$  的电量约束; 式(35)和式(36)为储能系统  $s$  的充电和放电功率上下限约束; 式(37)表明储能系统  $s$  在一个时段内不能同时处于充电和放电状态。

储能系统的运行成本式(3)包含  $I_{st}^{s,c} I_{st-1}^{s,c}$  以及  $I_{st}^{s,d} I_{st-1}^{s,d}$  的非线性项。针对这 2 个二元整型变量的乘积项, 以  $I_{st}^{s,c} I_{st-1}^{s,c}$  为例, 通过引入新的二元整型变量  $I_{st}^c = I_{st}^{s,c} I_{st-1}^{s,c}$  及式(38)所示线性约束进行等效线性表达。  $I_{st}^{s,d} I_{st-1}^{s,d}$  可类似引入  $I_{st}^d = I_{st}^{s,d} I_{st-1}^{s,d}$  转换为线性约束。

$$0 \leq I_{st}^c \leq I_{st}^{s,c}, I_{st}^c \leq I_{st-1}^{s,c}, I_{st}^c \geq I_{st}^{s,c} + I_{st-1}^{s,c} - 1 \quad (38)$$

### 3 基于 Benders 分解算法的迭代求解策略

在第 2 节建立的双层鲁棒区间机组组合模型中, 下层优化模型式(19)、(21)、(29)、(30)含有“min”和“max”极值问题, 不利于直接求解。因此需要基于线性对偶理论, 对含有“min”和“max”的表达式进行等价转化, 将双层模型转化为单层模型来求解<sup>[10]</sup>。但由于上下层模型存在常规机组、储能系统运行状态离散变量和连续变量的耦合关系, 下层模型不仅仅是上层模型的最大或最小发电能力约束, 因此原经济调度模型中适用的双层模型向单层模型转化的对偶转换过程在机组组合中会失效, 导致双层机组组合模型难以求解。为此, 本节首先通过将离散变量作为第 1 阶段决策变量, 连续变量作为第 2 阶段决策变量, 消除两者间的耦合关系, 然后根据线性对偶理论, 将第 2 节的双层鲁棒区间机组组合模型等效转化为单层两阶段鲁棒区间机组组合模型, 最后利用 Benders 分解算法对两阶段模型进行逐次交替迭代求解。

#### 3.1 单层两阶段鲁棒区间机组组合模型的构建

为了便于描述两阶段鲁棒区间机组组合模型的建立过程以及基于 Benders 分解的求解算法, 首先将第 2 节的双层模型采用紧凑表达形式描述如下:

$$\min_{x,y} (c^T x + b^T y) \quad (39)$$

$$\text{s.t. } Fx \leq f, Ex = e$$

$$Hy \leq h, Ax + By \leq m, Ix + Jy = n$$

$$\begin{cases} \min_y (Cx + Dy) = Ky \\ \text{s.t. } Gy \leq g \end{cases}, \begin{cases} \min_y (Mx + Ny) \geq v \\ \text{s.t. } Qy \leq q \end{cases} \quad (40)$$

$$x = \{x_i | x_i \in \{0, 1\}\}, y \geq 0$$

其中,  $x$  为由离散变量  $u_{it}$ 、 $s_{it}$ 、 $d_{it}$ 、 $I_{st}^{s,c}$ 、 $I_{st}^{s,d}$ 、 $I_{st}^c$  和  $I_{st}^d$  组成的优化变量列向量,  $x_i$  为向量  $x$  的元素;  $y$  为由连续变量  $p_{kit}$ 、 $p_{st}^{s,c}$ 、 $p_{st}^{s,d}$ 、 $\bar{p}_{wt}^w$ 、 $\hat{p}_{wt}^w$ 、 $p_{wt}^w$ 、 $r_{it}^u$ 、 $r_{it}^d$ 、 $\Delta r_{it}^u$ 、 $\Delta r_{it}^d$ 、 $p_{wt}^{w,1}$ 、 $p_{wt}^{w,2}$ 、 $p_{wt}^{w,3}$  和  $p_{wt}^{w,4}$  组成的优化变量列向量; 系数列向量  $c$  和  $b$  的取值参考式(1);  $F$ 、 $E$ 、 $H$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $I$ 、 $J$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $K$ 、 $G$ 、 $M$ 、 $N$ 、 $Q$  为相应系数矩阵;  $f$ 、 $e$ 、 $h$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $v$ 、 $g$ 、 $q$  为系数列向量。式(39)为上层模型的目标函数。上层模型的约束条件  $Fx \leq f$  和  $Ex = e$  表示式(8)——(10)、(12)——(16)、(33)、(37)、(38);  $Hy \leq h$  表示式(25)、(26)、(31)、(32)、(34);  $Ax + By \leq m$  表示式(6)、(17)、(18)、(27)、(28)、(35)、(36);  $Ix + Jy = n$  表示式(5)。下层模型中的极值问题  $\min_y (Cx + Dy) = Ky$  表示式(19)、(21)、(23)、(24);  $\min_y (Mx + Ny) \geq v$  表示式(19)——(22)、(29)、(30)。

单层两阶段的鲁棒区间机组组合模型的具体构建步骤如下。

步骤 1 将离散变量向量  $x$  和连续变量向量  $y$  分别作为第 1 阶段和第 2 阶段的决策变量, 则双层模型式(39)和式(40)等效为如下双层两阶段模型:

$$\min_x (c^T x + \min_{y \in \Omega(x)} b^T y) \quad (41)$$

$$\text{s.t. } Fx \leq f, Ex = e, x = \{x_i | x_i \in \{0, 1\}\} \quad (42)$$

$$\Omega(x) = \begin{cases} y: Hy \leq h, Ax + By \leq m, Ix + Jy = n, y \geq 0 \\ \min_y (Cx + Dy) = Ky \\ \text{s.t. } Gy \leq g \end{cases}, \begin{cases} \min_y (Mx + Ny) \geq v \\ \text{s.t. } Qy \leq q \end{cases} \quad (43)$$

步骤 2 在第 2 阶段模型  $\min_{y \in \Omega(x)} b^T y$  中,  $x$  为已知向量, 则  $\min_{y \in \Omega(x)} b^T y$  可看作上下层模型存在耦合关系的双层鲁棒区间经济调度模型, 难以求解。但根据线性对偶原理, 上层模型最小化  $b^T y$  的目标对下层模型  $\Omega(x)$  中的极值问题约束可等价于下层模型的对偶问题。由此可消除双层优化模型的耦合关系, 并将其转化为单层模型进行求解。

由于下层优化模型式(19)、(21)、(29)、(30)中变量  $p_{wt}^{w,1}$ 、 $p_{wt}^{w,2}$ 、 $p_{wt}^{w,3}$  和  $p_{wt}^{w,4}$  的约束条件的左、右端项均为决策变量, 直接进行对偶转换会产生 2 个决策变量相乘的非线性项, 为此, 需要针对这些变量的约束进行化简处理。以  $p_{wt}^{w,1}$  为例, 引入新的变量  $\lambda_{wt}^1$  ( $0 \leq \lambda_{wt}^1 \leq 1$ ), 并令  $p_{wt}^{w,1} = \hat{p}_{wt}^w + \lambda_{wt}^1 (\bar{p}_{wt}^w - \hat{p}_{wt}^w)$ 。据此,  $p_{wt}^{w,2}$ 、 $p_{wt}^{w,3}$  和  $p_{wt}^{w,4}$  分别用  $\lambda_{wt}^2$ 、 $\lambda_{wt}^3$  和  $\lambda_{wt}^4$  进行替换。

为保证下层优化模型的对偶目标函数是原优化模型的上界或下界, 将式(19)、(21)、(29)、(30)分别用下层优化模型的对偶问题替换, 经过转换后的对偶变量分别为  $\alpha_{wt}$ 、 $\beta_{wt}$ 、 $\delta_{wt}$  和  $\varphi_{wt}$ , 对应的对偶转化前下层优化模型的变量分别为  $\lambda_{wt}^1$ 、 $\lambda_{wt}^2$ 、 $\lambda_{wt}^3$  和  $\lambda_{wt}^4$ 。经过转换后的优化模型形式如下:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_I} (p_{it} + r_{it}^u) + \sum_{w=1}^{N_W} (\hat{p}_{wt}^w - \alpha_{wt}) - \sum_{j=1}^{N_J} L_{f,jt} \geq R_{\min,t}^u \\ \alpha_{wt} \geq -(\hat{p}_{wt}^w - \hat{p}_{wt}^w) \quad \forall w \in W \end{cases} \quad (44)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N_J} L_{f,jt} - \sum_{i=1}^{N_I} (p_{it} - r_{it}^d) - \sum_{w=1}^{N_W} (\hat{p}_{wt}^w + \beta_{wt}) \geq R_{\min,t}^d \\ \beta_{wt} \geq \hat{p}_{wt}^w - \hat{p}_{wt}^w \quad \forall w \in W \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} \sum_{b=1}^{N_B} S_{Flb} \left[ \sum_{i \wedge b} p_{it} + \sum_{w \wedge b} (\hat{p}_{wt}^w + \delta_{wt}) + \sum_{s \wedge b} p_{st}^s - \sum_{j \wedge b} L_{f,jt} \right] \leq U_l \\ \delta_{wt} \geq \hat{p}_{wt}^w - \hat{p}_{wt}^w \quad \forall w \in W \end{cases} \quad (46)$$

$$\begin{cases} \sum_{b=1}^{N_B} S_{Flb} \left[ \sum_{i \wedge b} p_{it} + \sum_{w \wedge b} (\hat{p}_{wt}^w - \varphi_{wt}) + \sum_{s \wedge b} p_{st}^s - \sum_{j \wedge b} L_{f,jt} \right] \geq -U_l \\ \varphi_{wt} \geq -(\hat{p}_{wt}^w - \hat{p}_{wt}^w) \quad \forall w \in W \end{cases} \quad (47)$$

步骤 3 将式(44)和式(45)中的左端项分别代入式(23)和式(24)中对  $R_t^u$  和  $R_t^d$  进行替换,第 2 阶段的双层优化模型  $\min_{y \in \Omega(x)} b^T y$  转化为单层优化模型  $\min_{z \in \Omega'(x)} b^T z$ ,其中  $\Omega'(x)$  满足:

$$\Omega'(x) = \{z: Lz \leq l, Px + Sz \leq p, Wx + Vz = w, z \geq 0\} \quad (48)$$

其中,  $z$  为由连续变量  $p_{kit}, p_{st}^{s,c}, p_{st}^{s,d}, \hat{p}_{wt}^w, \hat{p}_{wt}^w, p_{wt}^w, r_{it}^u, r_{it}^d, \Delta r_{it}^u, \Delta r_{it}^d, \alpha_{wt}, \beta_{wt}, \delta_{wt}$  和  $\varphi_{wt}$  组成的优化变量列向量;  $L, P, S, W, V$  为相应系数矩阵;  $l, p, w$  为系数列向量。  $Lz \leq l$  表示式(25)、(26)、(31)、(32)、(44)——(47)中的第 2 个约束;  $Px + Sz \leq p$  表示式(6)、(17)、(18)、(27)、(28)、(44)——(47)中的第 1 个约束;  $Wx + Vz = w$  表示式(5)、(23)和(24)。

最终获得与原双层鲁棒区间机组组合模型式(39)和式(40)等价的单层两阶段鲁棒区间机组模型:

$$\min_x (C^T x + \min_{z \in \Omega'(x)} b^T z) \quad (49)$$

$$\text{s.t. } Fx \leq f, Ex = e, x = \{x_i | x_i \in \{0, 1\}\} \quad (50)$$

### 3.2 基于 Benders 分解算法的两阶段迭代求解策略的计算步骤

两阶段鲁棒区间机组组合问题式(49)和式(50)的第 2 阶段优化子问题  $\min_{z \in \Omega'(x)} b^T z$  的对偶子问题为:

$$\max_{\omega, \eta, \chi} [(Px - p)^T \omega - l^T \eta + (w - Wx)^T \chi] \quad (51)$$

$$\text{s.t. } -S^T \omega - L^T \eta + V^T \chi \leq b \\ \omega \geq 0, \eta \geq 0, \chi \text{ 无约束} \quad (52)$$

其中,  $\omega, \eta$  和  $\chi$  为变量  $z$  的对偶变量。对偶子问题的可行解集式(52)与离散变量  $x$  无关,且根据对偶理论,两阶段鲁棒区间机组组合模型可表示为:

$$\min_x \{c^T x + \max_{\omega, \eta, \chi} [(Px - p)^T \omega - l^T \eta + (w - Wx)^T \chi]\} \quad (53)$$

$$\text{s.t. } Fx \leq f, Ex = e, x = \{x_i | x_i \in \{0, 1\}\} \quad (54)$$

设 Benders 子问题的可行解集式(52)的极点集为  $H^p$ ,极方向集为  $H^r$ ,引入松弛变量  $\theta$ ,构造两阶段鲁棒区间机组组合模型式(53)和式(54)的 Benders 主问题:

$$\min_{x, \theta} (c^T x + \theta) \quad (55)$$

$$\text{s.t. } Fx \leq f, Ex = e, x = \{x_i | x_i \in \{0, 1\}\} \quad (56)$$

$$\omega_p^T (Px - p) - \eta_p^T l + \chi_p^T (w - Wx) \leq \theta \quad (57)$$

$$\bar{\omega}_r^T (Px - p) - \bar{\eta}_r^T l + \bar{\chi}_r^T (w - Wx) \leq 0 \quad (58)$$

$$\forall (\omega_p, \eta_p, \chi_p) \in H^p, \forall (\bar{\omega}_r, \bar{\eta}_r, \bar{\chi}_r) \in H^r \quad (59)$$

式(57)和式(58)分别为连接主、子问题的 Benders 最优性割平面和可行性割平面。

参考文献[12],基于 Benders 分解的求解方法流程如图 2 所示。首先初始化,设置迭代计数  $k=1$ ,给定初始上界  $U_B$  和下界  $L_B$ ,允许误差  $\varepsilon > 0, H^p = \emptyset, H^r = \emptyset$ ,构造一个可行解  $x_0$ 。下面给出基于 Benders 分解的求解方法的详细步骤。

步骤 1 将  $x_{k-1}$  代入 Benders 子问题式(51)和式(52)中,该子问题为线性规划问题,求解结果可分为下述 3 种情况:

- 如果该子问题无可行解,算法终止;
- 如果该子问题有无界的最优值,则可以获得一个极方向  $(\bar{\omega}_r, \bar{\eta}_r, \bar{\chi}_r)$ ,执行下一步;

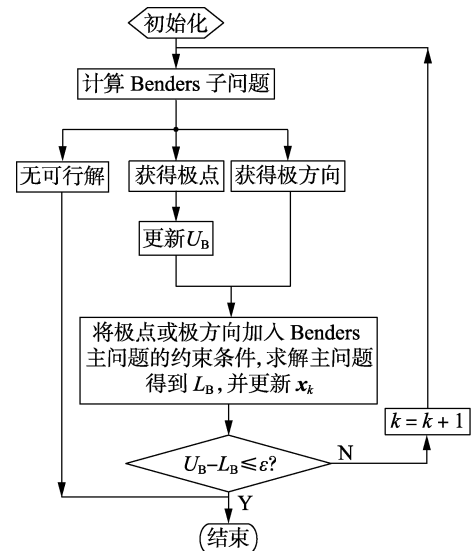


图 2 基于 Benders 分解的求解方法流程图

Fig.2 Flowchart of solution method based on Benders decomposition

c. 如果该子问题有最优值,则可以获得一个极点  $(\omega_p, \eta_p, \chi_p)$ , 利用该值更新上界  $U_B = c^T x_{k-1} + (Px_{k-1} - p)^T \omega_p - l^T \eta_p + (w - Wx_{k-1})^T \chi_p$ , 并执行下一步。

步骤 2 将步骤 1 中获得的极点或极方向分别加入 Benders 主问题的约束条件  $H^p$  和  $H^R$  中, 松弛型 Benders 主问题式 (55) — (59) 为混合整数线性规划问题, 通过优化软件 CPLEX 求解可以获得最优解  $(x_k, \theta_k)$ , 并计算下界  $L_B = c^T x_k + \theta_k$ 。

步骤 3 判断  $U_B - L_B \leq \varepsilon$  是否成立, 若成立则循环结束, 返回结果  $x_k$ , 并将其代入  $\min_{z \in \Omega^p(x)} b^T z$  中计算获得  $z_k$ , 否则令  $k = k + 1$ , 继续执行步骤 1。

此外, 文献 [13] 提出采用组合 Benders 割平面替代式 (58), 即当  $x_r$  使得 Benders 子问题无最优解时, 在 Benders 主问题中加入下述整数型割平面:

$$\sum_{x_{r,j}=0} x_{k,j} + \sum_{x_{r,j}=1} (1 - x_{k,j}) \geq 1 \quad (60)$$

该式的目的是通过改变  $x_k$  的取值使得 Benders 子问题获得最优解。

## 4 算例仿真与分析

### 4.1 IEEE-RTS 26 机测试系统

本文采用的 IEEE-RTS 26 机测试系统数据详见文献 [14]。风电场的装机容量近似设为 600 MW, 接入节点 14。日前 24 个时段预测的系统负荷数据、风电场出力数据详见文献 [6], 风电出力区间通过其预测误差的 95% 置信区间获得。储能系统接入节点 14, 其容量配置 200 MW·h, 模型参数参考文献 [6],  $c_{\delta,s} = \$30$ ,  $V_0^s$  和  $V_{NT}^s$  取值分别为 80、100 MW·h。弃风惩罚成本系数  $V_w = 10$  \$/(MW·h)。系统最小上、下旋转备用要求设为 400 MW。初始化各参数的取值: 按照各时段机组都处于运行状态确定可行解  $x_0$ ;  $U_B = +\infty$ ;  $L_B = -\infty$ ;  $\varepsilon = 0.005$ 。

### 4.2 基于 Benders 分解的求解策略有效性分析

在 MATLAB 中调用 CPLEX 软件包编制相关程序对测试系统的主问题混合整数线性规划模型和子问题线性规划模型进行求解, 其中子问题的求解结果情况可以根据求解函数的 exitflag 返回值判断。当对偶间隙取 0.01% 时, 在主频 2.4 GHz Intel CPU、8 GB 内存的 PC 上计算所需时间约为 9.2 s。

为了验证本文基于 Benders 分解的两阶段迭代求解策略的有效性, 表 1 给出了测试系统的每次迭代计算结果。从表中上下界的变化情况可以看出, 总共迭代次数为 5 次, 除第 2 次迭代获得的是极方向外, 其他迭代获得的都是极值点。在迭代过程中不断修正原复杂问题的目标函数式 (1) 的上下界, 即上界不断缩小, 下界不断增大, 最终逼近原问题的最优值。

表 1 测试系统的每次迭代计算结果

Table 1 Iterative computation results of test system in each step

| 迭代次数 $k$ | 上界 $U_B / \$$ | 下界 $L_B / \$$ |
|----------|---------------|---------------|
| 1        | 908 361.01    | 548 516.12    |
| 2        | 908 361.01    | 613 277.84    |
| 3        | 847 246.80    | 645 579.70    |
| 4        | 784 132.58    | 683 881.56    |
| 5        | 721 989.64    | 721 989.64    |

### 4.3 不同风储联合运行调度模式的比较分析

为了准确分析不同风储联合运行调度模式对系统运行结果的影响, 首先给出 4 种算例: 算例 1 为本文基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行模式; 算例 2 为基于两阶段鲁棒区间优化的风电场独立运行模式; 算例 3 和算例 4 分别为基于确定性方法和随机规划方法的风储联合运行模式。假设算例 4 中的风电功率预测误差服从正态分布并覆盖区间范围。

以系统的基本运行成本和校正调度成本之和总调度成本作为经济评价指标。其中系统的基本运行成本即式 (1) 的系统发电成本, 包括常规机组的出力成本、启停成本、备用成本、储能系统运行成本和弃风惩罚成本, 通过对基于各算例相应优化方法的机组组合模型直接求解获得。校正调度成本是假设实际风电功率预测误差服从均匀分布, 并对风电功率预测误差进行抽样获得风电实际出力场景, 样本数为 10 000, 然后计算每个场景下的常规机组的实际出力, 并针对系统安全约束无法保证的情况, 通过采取校正调度措施, 包括重新调整常规机组出力、释放备用容量、弃风和切负荷, 恢复系统运行安全性而产生的调度成本。

系统的停电损失取为 4 000 \$/(MW·h)。算例 1—4 的系统运行的各类成本比较如表 2 所示。从表中算例 1 和算例 2 的各类成本比较可以看出, 虽然储能系统与风电场配合运行会产生一定的储能系统运行成本, 但系统运行的其他各类成本都相应减小, 从而提高了系统整体运行的经济性。

表 2 算例 1—4 的不同成本比较

Table 2 Comparison of different costs among Case 1-4 \$

| 成本       | 算例 1       | 算例 2       | 算例 3       | 算例 4       |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| 出力成本     | 548 923.51 | 550 796.99 | 561 562.84 | 524 591.32 |
| 启停成本     | 6 401.00   | 7 704.90   | 5 584.60   | 4 363.00   |
| 备用成本     | 162 078.53 | 162 317.41 | 108 021.11 | 158 446.07 |
| 储能系统运行成本 | 2 500.00   | 0          | 2 350.00   | 2 300.00   |
| 弃风惩罚成本   | 2 086.60   | 4 040.80   | 5 175.42   | 716.83     |
| 基本运行成本   | 721 989.64 | 724 860.10 | 682 693.97 | 690 417.22 |
| 校正调度成本   | 6 003.40   | 8 080.18   | 58 105.40  | 48 736.93  |
| 总调度成本    | 727 993.04 | 732 940.28 | 740 799.37 | 739 154.15 |

具体地, 图 3 为算例 1 中储能系统的放电、充电

以及储存电量变化情况。可以看出,虽然储能系统的充电容量大于放电容量,储能系统与风电场配合运行会有一定的电能损失,但是在负荷低谷、风电高发时段(第 1—6、15—18 时段),储能系统充电,在负荷高峰、风电低发时段(第 8—13、20—23 时段),储能系统放电,这使得负荷的峰谷差减小,从而增大了发电成本较低的机组在负荷低谷时段的出力,并减小了发电成本较高的机组在负荷高峰时段的出力,因此常规机组的出力成本减小。图 4 和图 5 分别为算例 1 和算例 2 的风电允许出力区间上下界以及常规机组组合比较,从图中可以看出储能系统通过在负荷低谷时段充电,增大了风电功率的消纳空间,并使得机组 11 和 20 在第 3—6、15—18 时段一直保持

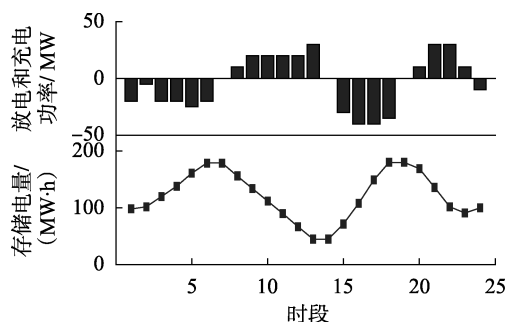


图 3 算例 1 中储能系统的放电、充电以及存储电量变化情况

Fig.3 Variation of discharging/charging power and stored electricity of energy storage system in Case 1

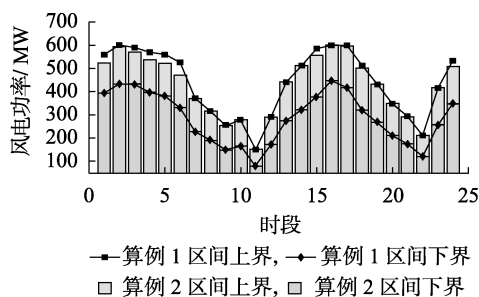


图 4 算例 1 和 2 的风电允许出力区间上下界比较

Fig.4 Comparison of allowable upper/lower bound of wind power output interval between Case 1 and 2

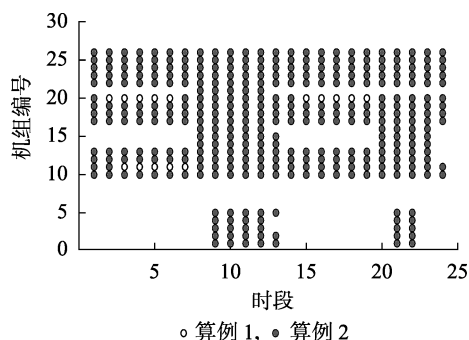


图 5 算例 1 和 2 的常规机组运行状态比较

Fig.5 Comparison of operation states of conventional units between Case 1 and 2

运行,减小了机组的启停成本,验证了风储联合运行的优越性。此外,算例 1 由于考虑的风电消纳空间增大,受风电不确定性的影响变小,较正调度成本也相对较小。

另外从表 2 中可以看出,与算例 3 和 4 相比,基于鲁棒区间优化方法的算例 1 和 2 的基本运行成本较大,主要原因是风电功率的不确定区间覆盖了风电功率预测误差场景,并且鲁棒区间优化方法要求机组组合优化决策在最极端风电出力场景下运行成本最低,这使得弃风功率、常规机组发电成本、储能系统运行成本都较大,从而使得系统基本运行成本最大。但在风电功率预测误差概率分布无法准确获取,例如本文均匀分布的极端情况下,相较于其他优化方法,算例 3 确定性方法的校正调度成本最大,而鲁棒区间优化方法的校正调度成本最小。具体原因分析如下:鲁棒优化方法能够使得在所有风电允许场景内,常规机组具备足够的调节容量以跟踪风电出力的变化,并且满足网络安全约束,因此,当风电功率预测误差服从不同概率分布时,鲁棒优化方法的校正调度成本最小;相比之下,其他优化方法受风电的不确定性影响较大,需要通过重新配置备用容量和切负荷措施来维持系统的安全运行,校正调度成本非常可观,其中确定性方法侧重调度方案的经济性,因而在调度方案的鲁棒性方面较差。在实际风电功率预测误差服从均匀分布的极端情况下,确定性方法的校正调度成本均远大于鲁棒区间优化方法,使得前者的总调度成本相对于其他方法均较大,而算例 4 的随机规划方法介于两者之间。

可见在确定风储联合优化运行方式时,确定性方法和随机规划方法不适用于风电功率预测误差的概率特性刻画差异较大的场合。

此外,与基于现有鲁棒优化方法<sup>[7-9]</sup>的风储联合运行调度模型相比,本文提出的鲁棒区间调度模式能够计及系统旋转备用约束和网络安全约束对预测区间限制的影响,并能够从这 2 个方面约束考虑优化风电预测出力区间。图 6 为算例 1 风电允许出力和预测出力的区间上下界比较,从图中可以看出,在风电反调峰特性比较明显的情况下,算例 1 的风电

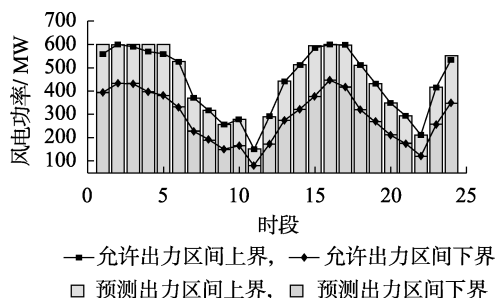


图 6 算例 1 风电允许出力和预测出力的区间上下界比较

Fig.6 Comparison of allowable and predicted upper/lower bound of wind power output interval in Case 1

允许出力区间仍小于风电预测出力区间,而此时采用现有鲁棒优化方法的风储联合运行调度模型会存在无解情况。

除储能系统外,利用需求侧响应资源参与电网调度可以进一步提升风电消纳水平<sup>[15]</sup>,因此未来需要在本文基础上,进一步研究考虑价格需求响应的鲁棒区间机组组合模型。

## 5 结论

本文利用风电功率预测的区间信息,提出了基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行机组组合模型,并针对该模型中连续变量和离散变量间存在耦合关系导致计算过程中的对偶转换失效而难以求解的问题,提出了基于 Benders 分解算法的两阶段迭代求解策略。对含风电场和储能系统的 IEEE-RTS 26 机测试系统的蒙特卡洛仿真分析表明:在风电功率预测误差的概率特性刻画差异较大的场合,相对于确定性方法和随机规划方法,本文两阶段鲁棒区间优化方法在确定风储联合运行方式时能更全面地考虑风电不确定性对系统运行经济性和可靠性的影响;当风电渗透率较高且具有反调峰特性时,相对于现有鲁棒优化方法,本文模型能够从系统旋转备用约束和网络安全约束方面考虑,优化风电预测出力区间,综合优化风电消纳与储能系统运行。

## 参考文献:

- [1] 袁小明,程时杰,文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):14-18.  
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18.
- [2] UMMELS B C, PELGRUM E, KLING W L. Integration of large-scale wind power and use of energy storage in the Netherlands' electricity supply[J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(1): 34-46.
- [3] 李丹,刘俊勇,刘友波,等. 风电接入后考虑抽蓄-需求响应的多场景联合安全经济调度模型[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):28-34.  
LI Dan, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Joint secure & economic dispatch considering wind power, pumped storage and demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 28-34.
- [4] 赵书强,刘大正,谢宇琪,等. 基于相关机会目标规划的风光储联合发电系统储能调度策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(14):30-36.  
ZHAO Shuqiang, LIU Dazheng, XIE Yuqi, et al. Scheduling strategy of energy storage in wind-solar-battery hybrid power system based on dependent chance goal programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 30-36.
- [5] KHODAYAR M E, SHAHIDEHPOUR M, WU Lei. Enhancing the dispatchability of variable wind generation by coordination with pumped-storage hydro units in stochastic power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(3): 2808-2818.
- [6] 张刘冬,殷明慧,卜京,等. 基于成本效益分析的风电-抽水蓄能联合运行优化调度模型[J]. 电网技术,2015,39(12):3386-3392.  
ZHANG Liudong, YIN Minghui, BU Jing, et al. A Joint optimal operation model of wind farms and pumped storage units based on cost-benefit analysis[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3386-3392.
- [7] JIANG Ruiwei, WANG Jianhui, GUAN Yongpei. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2): 800-810.
- [8] BRUNINX K, DVORKIN Y, DELARUE E, et al. Coupling pumped hydro energy storage with unit commitment[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 786-796.
- [9] 王荟敬,卢志刚,赵号,等. 计及风电最优逆鲁棒指标的双层优化调度策略[J]. 电网技术,2017,41(1):86-92.  
WANG Huijing, LU Zhigang, ZHAO Hao, et al. Strategy of bilevel optimization dispatch considering wind power optimal inverse robust index[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 86-92.
- [10] WU W C, CHEN J H, ZHANG B M, et al. A robust wind power optimization method for look-ahead power dispatch[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 507-515.
- [11] WANG S J, SHAHIDEHPOUR S M, KIRSCHEN D S, et al. Short-term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented Lagrangian relaxation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1294-1301.
- [12] 郑海艳,简金宝,全然,等. 基于改进的 Benders 分解与透视图平面的机组组合算法[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):133-138.  
ZHENG Haiyan, JIAN Jinbao, QUAN Ran, et al. Unit commitment algorithm based on improved benders decomposition and perspective cut[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 133-138.
- [13] CODATO G, FISCHETTI M. Combinatorial Benders' cuts for mixed-integer linear programming[J]. Operations Research, 2006, 54(4): 756-766.
- [14] VAZQUEZ M A O. Optimizing the spinning reserve requirements [D]. Manchester, UK: University of Manchester, 2006.
- [15] 张刘冬,丁昊,袁晓冬,等. 考虑价格需求响应的主动配电网动态经济调度[J]. 电力工程技术,2017,36(4):31-35.  
ZHANG Liudong, DING Hao, YUAN Xiaodong, et al. Active and reactive power coordinated economic dispatch of active distribution networks with consideration of price-based demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 31-35.

## 作者简介:



张刘冬

张刘冬(1987—),男,江苏如皋人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统优化调度、主动配电网(E-mail: zldon\_1987@126.com);

袁宇波(1975—),男,江苏丹阳人,研究员级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: yyb97104@sina.com);

com);

孙大雁(1970—),男,江苏无锡人,研究员级高级工程师,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行、优化与控制(E-mail: ddsdy@vip.sina.com)。

(下转第93页 continued on page 93)

## A new compensation system for V/v co-phase traction power supply

LUO Longfu<sup>1</sup>, ZHOU Yingqi<sup>1</sup>, ZOU Jinhai<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Zhuzhou National Engineering Research Center of Converter Technology, Zhuzhou 412001, China)

**Abstract:** In order to effectively and economically solve the power quality problems in V/v co-phase traction power supply system, a compensation system based on HPQC (Hybrid Power Quality Compensator) under the new topology is proposed. Compared with the compensation system under the traditional topology, the HPQC under the new topology has more significant capacity-saving characteristics. The parameters of passive components (LC, L) and active components (converters) in HPQC are designed according to the intermittent railway demands. Moreover, the control strategy of HPQC under the new compensation system is analyzed, in which the requirement of the system compensation can be satisfied.

**Key words:** co-phase traction power supply system; compensation system; hybrid power quality compensator; power quality; power capacity analysis

.....

(上接第 66 页 continued from page 66)

## Joint operation model of wind-storage system based on two-stage robust interval optimization

ZHANG Liudong<sup>1</sup>, YUAN Yubo<sup>1</sup>, SUN Dayan<sup>2,3</sup>, YUAN Xiaodong<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, SU Dawei<sup>3</sup>

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

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

**Abstract:** In order to comprehensively and accurately take into account the uncertainty and accommodation ability of wind power and consider both the economy and reliability of system operation, the discrete decisive variables of conventional generator and ESS (Energy Storage System) are introduced into the robust interval economic dispatching model with an optimizable wind power uncertain interval, and a double-level robust interval unit commitment model is established for joint operation of wind-storage system. The invalid dual transform caused by coupling relation between the discrete and continuous variables in the calculation process makes the model hard to be solved, for which a two-stage iterative solution method based on Benders decomposition is proposed. Simulation analysis shows that the proposed model can consider the impact of uncertainty and accommodation ability of wind power on economy and reliability of system operation more comprehensively when determining the joint operation mode of wind-storage system.

**Key words:** wind power generation; energy storage system; robust interval optimization; unit commitment; Benders decomposition