

## 考虑风力发电批特征的电力机组调度问题

郎 劲<sup>1,2</sup> 唐立新<sup>1,2</sup>

**摘 要** 电力机组组合问题是在给定的计划周期内确定火电、风电和蓄电池机组的开关机状态及发电量,以满足系统的负荷需求、旋转备用等约束要求. 为了降低风电在电网中的供电不稳定性,引入蓄电池储能系统与风机进行协调调度. 由于大量风机的介入,明显增加了问题处理的难度和复杂性. 本文从一个新的视角将相近物理位置的风机进行组批,基于批的视角对问题建立了批模型. 为了提高批模型的性能,提出了批模型参数的变换方法. 根据问题的 NP-难特征和模型的复杂结构,开发了拉格朗日松弛(Lagrangian relaxation, LR)算法进行求解. 为了加速算法的求解效率,提出了子问题近似求解的代理次梯度的拉格朗日松弛算法. 实验结果表明,提出的批模型明显优于传统的单机模型. 基于批模型开发的拉格朗日松弛算法与 CPLEX 优化软件相比,能够在较短的时间内获得高质量的解.

**关键词** 风力发电, 机组组合, 批聚合, 拉格朗日松弛算法

**引用格式** 郎劲, 唐立新. 考虑风力发电批特征的电力机组调度问题. 自动化学报, 2015, 41(7): 1295–1305

**DOI** 10.16383/j.aas.2015.c140503

## Unit Commitment Problem for Wind Turbines Power Generation with Batching Characteristics Consideration

LANG Jin<sup>1,2</sup> TANG Li-Xin<sup>1,2</sup>

**Abstract** The unit commitment problem is to determine the start-up/shut-down schedule and economical dispatch schedule of thermal generators, wind turbines and batteries to meet system load demand, reserved constraints, minimum up/down time constraints and other constraints within a certain time horizon. In order to reduce the power supply instability when wind power generation is plugged in the grid, coordinated scheduling of battery energy storage system introduced into the grid and wind turbines is performed. As a large number of wind turbines are plugged in the grid, the difficulties and complexities of the problem are increased significantly. In this paper, from a new batching perspective, we group wind turbines based on their physics locations to formulate the problem. In order to improve the performance of the batch model, a transformation method of model parameters is proposed. For tackling the complicated batch model and its NP-hardness, we develop a Lagrangian relaxation (LR) algorithm. In order to accelerate the algorithm, a surrogate subgradient Lagrangian relaxation algorithm is derived, in which subproblems are solved approximately. The experimental results show that the proposed batch model is superior to the ordinal single-unit model. Compared with CPLEX 11.0, the Lagrangian relaxation algorithm based on the batch model can obtain high quality solutions in a relatively short computation time.

**Key words** Wind turbines, unit commitment, batching, Lagrangian relaxation (LR)

**Citation** Lang Jin, Tang Li-Xin. Unit commitment problem for wind turbines power generation with batching characteristics consideration. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(7): 1295–1305

收稿日期 2014-07-04 录用日期 2015-02-02  
Manuscript received July 4, 2014; accepted February 2, 2015  
国家高技术研究发展计划(863 计划)(2013AA040704), 国家自然科学基金(61374203), 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(71321001)资助

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2013AA040704), National Natural Science Foundation of China (61374203), and the Fund for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (71321001)

本文责任编辑 宋士吉

Recommended by Associate Editor SONG Shi-Ji

1. 东北大学工业工程与物流优化研究所 沈阳 110819 2. 辽宁省制造系统与物流优化重点实验室 沈阳 110819

1. Institute of Industrial Engineering and Logistics Optimization, Northeastern University, Shenyang 110819 2. Liaoning Key Laboratory of Manufacturing System and Logistics, Shenyang 110819

风能与化石能源如煤、石油、天然气相比,是一种可再生能源. 近年来,风电的发展十分迅速,世界风电装机容量的年平均增长率超过了 30%,到 2020 年预计发电量占世界电力消费的 12%<sup>[1]</sup>. 自 2005 年,我国的风力发电规模连续 3 年实现翻倍增长. 由于我国传统发电方式主要是燃煤为主的火电为主,风力发电并入电网能够大大节省矿物燃料的使用,减少矿物燃料燃烧所排放的 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等有害气体. 但是,随着大规模风场不断接入电网,因其风电输出功率的不确定性,对电网的安全性带来了极大挑战,也使电力系统经济调度更加复杂. 因此如何实现能源的优化配置和合理利用,如何有效解决含风电场的

电力系统优化运行问题, 已经成为电力系统经济调度研究的重要课题. 风力发电与常规发电能源相比也存在局限性, 比如风电的随机性和间歇性. 如果只有风电独立并网, 必然会对电力系统的稳定运行带来困难. 因此本文引入蓄电池储能系统与风机进行协调调度, 以降低风电不可控性对电网的影响.

国内外对风电混合系统的优化调度已经开展了一些研究. 从以往的研究来看, 对风电波动性的处理上也采用了很多方式. Sadanandan 等<sup>[2]</sup> 最早针对风力发电的间歇性特点对机组组合问题和传统火力发电经济分配调度的影响进行了研究. Wang 等<sup>[3]</sup> 提出了涉及安全约束的含风电场的机组组合问题, 并用情景树的方法模拟风电的波动性. 建立的风电单机组数学规划模型采用 Benders 分解的方法进行求解. Chen 等<sup>[4-5]</sup> 以最小化燃料成本和启动成本为目标, 考虑了因风电不确定性引起的附加旋转备用约束, 并采用混合动态规划方法对模型进行求解. Denny 等<sup>[6]</sup> 提出了基于风电的经济分配优化调度模型, 即在满足系统功率平衡、备用和发电机组出力约束条件下, 实现与风电的优化协调调度, 以减少 CO<sub>2</sub> 等有毒气体的排放. Tuohy 等<sup>[7]</sup> 考虑了火电和风电机组的机组组合问题, 以机组发电成本、启停成本、放散成本以及是否满足需求和旋转备用惩罚成本之和最小为目标, 考虑风电的不确定性, 建立随机规划模型, 确定合理的机组开停机计划. Miranda 等<sup>[8]</sup> 为了增加风电接入的安全性, 建立了数学规划模型, 考虑用隶属度函数来描述系统安全水平与风电穿透功率/运行成本之间的关系. Hetzer 等<sup>[9]</sup> 针对长期模式下的经济调度, 将风速看作服从威布尔 (Weibull) 分布的随机变量, 以此为基础构建了优化模型, 通过风速-功率曲线转换得到相应的风电功率随机分布函数, 并在目标函数中加入了风电场计划出力超过或低于可利用风能时相应的惩罚成本. Abreu<sup>[10]</sup> 针对抽水蓄能和风电协调调度的分布式发电的能源调度问题进行研究, 考虑了风电的每时段的爬坡速率及时段内的瞬时爬坡速率等约束, 以减少风电波动性对电网的影响. Yuan 等<sup>[11]</sup> 针对储能系统嵌入到风电场的调度问题进行研究, 建立了蓄电池和风电的数学模型, 以火电机组优化调度结果为初始解, 通过遗传算法对该问题进行求解. Thatte 等<sup>[12]</sup> 针对带有储能的风电场的竞价策略问题进行研究, 提出了基于鲁棒性的风险管理策略, 通过蒙特卡罗仿真方法对竞价策略的经济性能进行了评估. Zhao 等<sup>[13]</sup> 用不确定性需求价格的弹性曲线来模拟用户对价格的反应, 在考虑风力输出的最坏情况和需求侧响应情景的同时, 以最大化经济效益为目标, 建立了多阶段鲁棒混合整数规划模型, 并用 Benders 分解方法进行求解. Jiang 等<sup>[14]</sup> 提出了带有风电的鲁

棒性机组调度问题, 针对风电的不确定性, 提出了鲁棒最优方法, 该鲁棒最优模型包含了 worst-case 的 scenario 不确定集合. Lee 等<sup>[15]</sup> 针对带有风电的电力系统, 建立了考虑传输线约束的两阶段鲁棒机组组合模型, 并设计了割平面和列生成相结合的加速求解技术求解该问题. 焦春亭等<sup>[16]</sup> 在考虑了风电出力特性、外送通道传输约束和系统备用约束等约束条件下, 给出了风电和火电联合外送的可行性方案, 计算结果表明了该方案能够增加风电消纳, 减少可再生能源浪费. 吴雄等<sup>[17]</sup> 针对考虑风电不确定性的风电储能混合系统, 以最大化期望效益为目标建立了多时间尺度下的混合系统联合调度模型, 并应用场景消减技术和混合整数规划技术制定了日前和日内生产计划. 胡泽春<sup>[18]</sup> 等基于日前负荷预测和风电出力预测, 考虑抽水蓄能机组的启停约束和运行工况转换限制, 以风电蓄能联合运行效益最大化为目标建立了混合整数数学规划模型, 实验结果表明该模型能够对风储联合系统进行较好的协调调度. 以上研究对风机的调度都是单机控制, 对于加入大规模风电场并网调度来说, 大大增加了调度的难度.

本文针对发电系统中含有火电、风电和蓄电池机组进行研究. 在考虑传统火电机组的生产运行约束条件同时, 模型为减少风电的波动性和随机性, 不仅考虑了风机的各种爬坡约束, 还增加了风电和蓄电池机组协调调度约束. 同时, 根据风机位置和风速预测值对风机发电影响的特点, 采用风机集批调度策略, 并对同一批内的多个风机通过参数变换聚合为一个风机进行调度, 以最小化生产运行成本为目标建立了基于批的混合整数数学规划模型. 根据该模型的特点, 设计了拉格朗日松弛算法进行求解.

## 1 风机工作原理及批划分

### 1.1 风电场排列及风机工作原理

本文研究的发电系统如图 1 所示, 系统包含了火电、风电和蓄电池机组.

该系统包含的风电场具有单机容量小、单机数

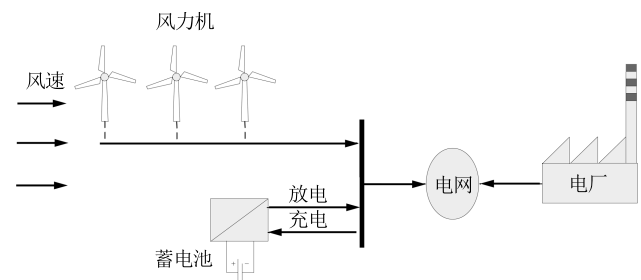


图 1 发电系统

Fig. 1 The generation systems

目多的特点. 风电场内机组位置的排列取决于风能密度的方向分布和地形的影响. 风电场布置风电机组时, 在盛行风向上要求机组间隔 5~9 倍风轮直径, 在垂直于盛行风向上要求机组间相隔 3~5 倍风轮直径<sup>[19]</sup>. 由于风通过风轮后速度下降会产生湍流, 要经过一定距离后才能恢复. 风电机组具体布置时应根据风向玫瑰图和风能玫瑰图确定风电场主导风向, 对平坦、开阔的场址, 可以按照以上原则, 单排或多排布置风电机组. 多排布置时应呈梅花形排列, 以尽量减少风电机组之间尾流的影响, 如图 2 所示.

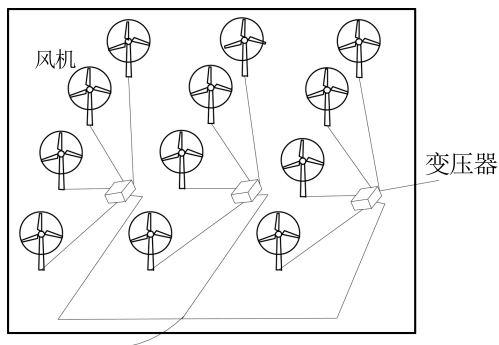


图 2 风电机组梅花型排列  
Fig. 2 Plum blossom-shaped arrangement of the wind turbines

风机的桨叶具有良好的空气动力外形, 在气流作用下能产生空气动力使风轮转动, 将风能转换成机械能, 再通过齿轮箱增速驱动发电机, 将机械能转换成电能<sup>[19]</sup>. 风力机组在运行过程中: 达到启动风速开始启动, 达到额定功率时将进行调节, 当超过停机(切出)风速时, 机组将停止运行. 无论是变桨距还是失速功率都是通过叶片上升阻力的变化, 以达到发电输出功率稳定而不超过设定功率的目的, 从而保证机组不受损害, 机组不应长期在超功率下运行, 风电机组功率特性曲线如图 3 所示.

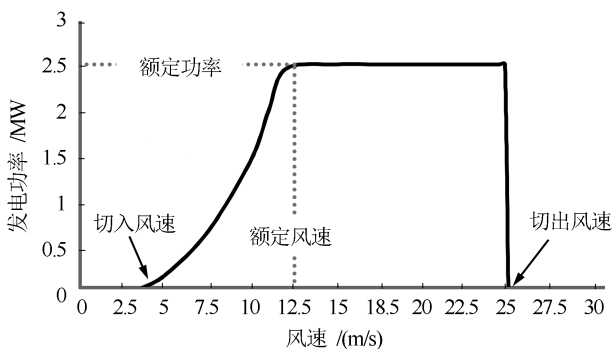


图 3 风电机组功率特性曲线  
Fig. 3 Wind speed to power conversion curve for wind turbines

## 2 问题描述及数学模型

### 2.1 批建模策略

本文针对复合能源发电的特点, 在考虑传统火电机组发电约束要求的同时, 还考虑了风力机组运行时每时段及各时段每时刻的爬坡约束, 以及风电和蓄电池的协调约束. 针对风机数量多而导致问题规模大、难于求解的复杂特征, 提出批建模策略. 由于风能的捕获量受风轮面积、空气密度、风机的参数等各方面因素的影响, 风机捕获的风能预测值可用如下的公式表达:

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho_{\text{air}} \times A \times v^3$$

其中,  $P$  为风力发电机组捕获的风能,  $A$  为风轮面积,  $v$  为风速,  $\rho_{\text{air}}$  为空气密度,  $C_p$  为风力发电机组风轮捕获风能系数<sup>[10]</sup>. 空气密度取决于风机所处的地理位置及气候变化的影响. 因此对于风机性能参数相同的机组, 如果分布的地理位置相近, 且具有相同的地貌, 则风速的预测值一般是相同或者相近的. 根据这一特点, 可以把地理位置相近且具有相同性能参数的风机划分为一个批进行控制, 通过这种批划分方式, 可以把一个风场的风机划分为不同的批进行调度. 但是, 对于大规模风电场来说, 即使对风机进行集批调度, 仍然需要比较长的时间才能确定各个风机的启停及发电量. 为解决这一问题, 本文提出了批聚合的方法, 通过参数变换, 把同一个批内的所有风机批聚合为一个风机进行调度. 变换后, 风机的机组数就由风场的机组数变为划分的批的个数. 其批划分和批聚合的过程如图 4 所示.

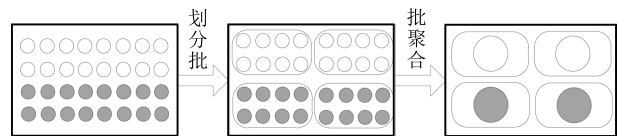


图 4 风机机组的批划分及批聚合  
Fig. 4 Wind turbines batching and approximation mode by batching

基于批建模策略, 问题描述如下: 有  $N$  台火电机组,  $\sum_{w=1}^W |G_w|$  台独立运行的风机 ( $G_w$  为第  $w$  批的风机集合,  $|G_w|$  为第  $w$  个批的风机个数,  $W$  表示风场批的个数),  $B$  台蓄电池机组, 在满足系统负荷、旋转备用要求及机组运行技术条件约束的情况下, 确定给定计划期内各个机组的启停状态及发电量, 使系统总的运行费用达到最小. 风电机组以批为单位进行调度, 且规定同一批内的机组启停状态相同, 蓄电池在调度过程中考虑了充电和放电的启动和运行成本.

### 2.2 批建模策略参数聚合方法

风电以批的方式进行调度时, 需要把同一批内的风机参数进行聚合, 按照一定的聚合规则聚合为一个风机进行调度. 因此, 代表批的参数  $w$  也可以表示批聚合后的风机. 因为一个批内各个风机的风速预测值是不同的, 因此不能用批内的任意风机替代批聚合后的风机预测风速值. 为了保证风机发电的可行性, 制定如下参数聚合规则:

1) 当一个批内的风机是同一型号, 即风机参数相同, 且风机预测风速值也相同时, 批聚合变换后的参数和预测风速值任取其中一个机组的参数值.

2) 当一个批内的风机是同一型号, 即风机参数相同, 风机预测风速值相近时, 令  $p_{\Psi, wtk} = \min_{q \in G_w} \{ \bar{p}_{\Psi, qtk} \}$ ,  $p_{\Psi, wtk}$  表示批聚合后风机  $w$  在  $t$  时刻内  $k$  时段的风速预测值.  $\bar{p}_{\Psi, qtk}$  表示批聚合前风机  $q$  在  $t$  时刻内  $k$  时段的风速预测值,  $\forall q \in Q$ ,  $Q$  表示批聚合前风机总数.

3) 当一个批内的风机型号不同, 即风机参数不同, 风机预测风速相近时, 批聚合后的风机参数规则为: 切入风速取批内所有风机切入风速的最大值, 其他参数取同一批内风机参数的最小值, 聚合规则同 2). 当参数有上下限限制时, 参数上限值取最小值, 参数下限值取最大值. 即:  $p_w^{2\min} = \max_{q \in G_w} \{ \bar{p}_q^{\min} \}$  和  $p_w^{2\max} = \max_{q \in G_w} \{ \bar{p}_q^{\max} \}$ ,  $p_w^{2\min}$  和  $p_w^{2\max}$  表示批聚合后风机  $w$  最小/最大发电量,  $\bar{p}_q^{\min}$  和  $\bar{p}_q^{\max}$  表示批聚合前风机最小/最大发电量.

以风机的风速预测值相差在 5% 以内为一个批, 每个批里面有两个风机为例, 其批聚合变换前后预测风速值比较如图 5 所示. 从图 5 中可以看出, 所采用的批聚合变换原则, 能够保证批聚合后的风机预测风速值接近于批聚合前的单机预测风速值, 而且不大于批聚合前的风机预测风速值.

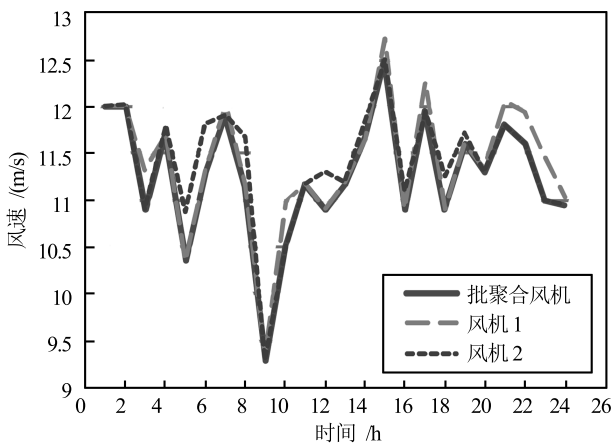


图 5 单机和批聚合后风机的预测风速值比较

Fig. 5 Comparison of wind speed forecasts between single and batch clustering wind

### 2.3 基于批建模策略的数学模型

模型参数:

$N$ : 火力发电机组总数;

$B$ : 蓄电池机组总数;

$T$ : 机组运行周期;

$K$ : 风力发电机组每周期内的运行时段;

$D_t$ : 第  $t$  时段的系统负荷需求;

$R_t$ : 第  $t$  时段的系统旋转备用需求;

$\alpha_{i0}, \alpha_{i1}, \alpha_{i2}$ : 火力发电机组  $i$  的运行费用参数;

$Hotc_i$ : 火力发电机组  $i$  的热启动费用;

$Coldc_i$ : 火力发电机组  $i$  的冷启动费用;

$T_i^{on}, T_i^{down}$ : 火力发电机组  $i$  的最小开/关时间;

$T_i^{hot}$ : 火力发电机组  $i$  的冷启动时间;

$p_i^{1\max}, p_i^{1\min}$ : 火力发电机组  $i$  最大/最小发电量;

$p_w^{dmax}$ : 风力发电机组  $w$  的衰减量;

$v_{tk}$ : 时刻  $t$  内  $k$  时段的风速;

$L_w$ : 风力发电机组  $w$  的平衡约束量;

$D_w$ : 风力发电机组  $w$  的爬坡约束量;

$S_{bt}^c$ : 蓄电池机组  $b$  的充电启动费用;

$S_{bt}^{dc}$ : 蓄电池机组  $b$  的放电启动费用;

$p_b^{cmin}$ : 蓄电池机组  $b$  的充电量最小值;

$p_b^{cmax}$ : 蓄电池机组  $b$  的充电量最大值;

$p_b^{dmin}$ : 蓄电池机组  $b$  的放电量最小值;

$p_b^{dmax}$ : 蓄电池机组  $b$  的放电量最大值;

$Q_b^{total}$ : 蓄电池机组  $b$  的总容量;

$d_1, d_2$ : 蓄电池机组  $b$  的最小/最大容量比例参数;

$P^U, P^L$ : 风电蓄电池总发电量最大值/最小值;

$Q_{bt}$ : 蓄电池容量.

决策变量:

$u_{it}$ : 火力发电机组  $i$  在  $t$  时刻的启停状态, 0 表示关机, 1 表示开机;

$u_{wt}$ : 风力发电机组  $w$  在  $t$  时刻的启停状态, 0 表示关机, 1 表示开机;

$u_{bt}^c$ : 蓄电池机组  $b$  在  $t$  时刻的充电状态, 0 表示不充电, 1 表示充电;

$u_{bt}^{dc}$ : 蓄电池机组  $b$  在  $t$  时刻的放电状态, 0 表示不放电, 1 表示放电;

$p_{it}$ : 火力发电机组  $i$  在  $t$  时刻发电量;

$p_{wt}$ : 风力发电机组  $w$  在  $t$  时刻发电量;

$p_{3bt}$ : 蓄电池机组  $b$  在时刻  $t$  的充电量;

$p_{wtk}$ : 风力发电机组  $w$  在时刻  $t$  内  $k$  时段的发电量;

$p_{d,wtk}$ : 风力发电机组  $w$  在时刻  $t$  内  $k$  时段的发电减损量;

$p_{bt}^c$ : 蓄电池机组  $b$  在  $t$  时刻充电量;

$p_{bt}^{dc}$ : 蓄电池机组  $b$  在  $t$  时刻放电量。  
建立的批聚合后的数学规划模型如下:

$$\min \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^N C1_{it} + \sum_{w=1}^W C2_{wt} + \sum_{b=1}^B C3_{bt} \right) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^N p1_{it} + \sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p2_{wt} + \sum_{b=1}^B p3_{bt} = D_t, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N u1_{it} p1_i^{\max} + \sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p2_{wt} + \sum_{b=1}^B u_{bt}^{dc} p_b^{dc} - \sum_{b=1}^B u_{bt}^c p_b^c \geq D_t + R_t, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$u1_{it} p1_i^{\min} \leq p1_{it} \leq u1_{it} p1_i^{\max}, \quad \forall i \in N, t \in T \quad (4)$$

$$u1_{it} = \begin{cases} 1, & \text{若 } 1 \leq t_{it}^{on} \leq T_i^{on} \\ 0, & \text{若 } 1 \leq t_{it}^{off} \leq T_i^{down} \end{cases}, \quad \forall i \in N, t \in T \quad (5)$$

$$p_{wtk} = p_{\Psi, wtk} - p_{d, wtk}, \quad \forall w \in W, t \in T, k \in K \quad (6)$$

$$0 \leq p_{d, wtk} \leq p_w^d, \quad \forall w \in W, t \in T, k \in K \quad (7)$$

$$-D_w \leq p_{w(t,k+1)} - p_{wtk} \leq D_w, \quad \forall w \in W, t \in T, k \in K \quad (8)$$

$$p2_{wt} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_{wtk}, \quad \forall w \in W, t \in T, k \in K \quad (9)$$

$$-L_w \leq p2_{wt} - p_{wtk} \leq L_w, \quad \forall w \in W, t \in T, k \in K \quad (10)$$

$$u2_{wt} p2_w^{\min} \leq p2_{wt} \leq u2_{wt} p2_w^{\max}, \quad \forall w \in W, t \in T \quad (11)$$

$$u_{bt}^c + u_{bt}^{dc} \leq 1, \quad \forall b \in B, t \in T \quad (12)$$

$$u_{bt}^c p_b^{cmin} \leq p_{bt}^c \leq u_{bt}^c p_b^{cmax}, \quad \forall b \in B, t \in T \quad (13)$$

$$u_{bt}^{dc} p_b^{dcmin} \leq p_{bt}^{dc} \leq u_{bt}^{dc} p_b^{dcmax}, \quad \forall b \in B, t \in T \quad (14)$$

$$d_1 Q_b^{total} \leq Q_{bt} \leq d_2 Q_b^{total}, \quad \forall b \in B, t \in T \quad (15)$$

$$p3_{bt} = p_{bt}^c - p_{bt}^{dc}, \quad \forall b \in B, t \in T \quad (16)$$

$$Q_{b(t+1)} = Q_{bt} - p3_{b(t+1)}, \quad \forall b \in B, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p2_{wt} - \sum_{b=1}^B p3_{bt} \leq P^U, \quad \forall b \in B, w \in W, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p2_{wt} - \sum_{b=1}^B p3_{bt} \geq P^L, \quad \forall b \in B, w \in W, t \in T \quad (19)$$

模型中目标函数 (1) 涉及到火电、风电和蓄电池机组总的运行费用, 其中的费用结构可参考约束说明后的具体解释. 约束 (2) 表示系统功率平衡约束; 约束 (3) 表示系统旋转备用约束; 约束 (4) 表示火力发电机组发电量上下限约束; 约束 (5) 表示火力发电机组最大最小开关机时间约束; 式 (6) 表示风力发电机组在第  $t$  时刻  $k$  时段发电量为预测发电量与减损发电量的差值; 式 (7) 表示风力发电机组最大减损量; 式 (8) 表示风力发电机组爬坡速率约束; 式 (9) 表示风力发电机组第  $t$  时刻平均发电量; 式 (10) 表示风力发电机组第  $t$  时刻发电量与该时刻内第  $k$  时段发电量关系约束; 式 (11) 表示风力发电机组发电量上下限约束; 式 (12) 表示蓄电池充电状态约束; 式 (13) 和式 (14) 表示蓄电池充电量和放电量上下限限制约束; 式 (15) 表示蓄电池容量上下限约束; 式 (16) 和式 (17) 表示蓄电池电荷状态平衡约束; 式 (18) 和式 (19) 表示风电和蓄电池总发电量的上下限约束.

对于短期电力系统经济调度问题, 不考虑火电厂和风电场的建设维护成本, 只考虑发电时的运行成本. 因风力发电运行成本比较低, 因此本文定义  $\sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^W C2_{wt} = 0$ ,  $C2_{wt}$  表示风力发电机组  $w$  在  $t$  时刻的运行费用.  $C1_{it}$  表示火力发电机组  $i$  在  $t$  时段的运行费用, 其值为  $C1_{it} = (a_{i0} + a_{i1} p1_{it} + a_{i2} p1_{it}^2) \cdot u1_{it} + S_{it} \cdot u1_{it} (1 - u1_{i,t-1})$ , 其中,  $S_{it}$  表示火力发电机组  $i$  在  $t$  时段的启动费用, 其值为

$$S_{it} = \begin{cases} Hotc_i, & \text{若 } T_i^{down} \leq t_{it}^{off} \leq T_i^{hot} \\ Coldc_i, & \text{若 } t_{it}^{off} > T_i^{hot} \end{cases}, \quad \forall i \in N, t \in T \quad (20)$$

$C3_{bt}$  为蓄电池机组  $b$  在  $t$  时刻的运行费用, 考虑了蓄电池的充放电运行费用和充放电启动费用, 即:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B C3_{bt} = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B (C_{bt}^{dc} + C_{bt}^c +$$

$$S_b^{dc} \cdot u_{bt}^{dc}(1 - u_{b,t-1}^{dc}) + S_b^c \cdot u_{bt}^c(1 - u_{b,t-1}^c),$$

$$\forall b \in B, t \in T \quad (21)$$

其中,  $C_{bt}^c = a_b p_{bt}^c$ ,  $C_{bt}^{dc} = b_b p_{bt}^{dc}$ .

风力发电机组的预测发电量与风速有关, 计算公式如下<sup>[20]</sup>:

$$p_{\Psi,qt} = \begin{cases} 0, & \text{若 } v_{tk} < v_q^{in} \text{ 或 } v_{tk} > v_q^{out} \\ k_{q1} v_{tk}^3 - k_{q2} p_q^t, & \text{若 } v_q^{in} \leq v_{tk} < v_q^r \\ p_q^t, & \text{若 } v_q^r \leq v_{tk} \leq v_q^{out} \end{cases},$$

$$\forall q \in Q, t \in T, k \in K \quad (22)$$

式中,  $v_q^{in}$  表示聚合前风机  $q$  的切入风速,  $v_q^{out}$  表示聚合前风机  $q$  的切出风速,  $v_q^r$  表示聚合前风机  $q$  的额定风速,  $k_{q1}, k_{q2}$  表示聚合前风机  $q$  的参数, 定义为

$$k_{q1} = \frac{p_q^r}{(v_q^r)^3 - (v_q^{in})^3}, \quad k_{q2} = \frac{(v_q^{in})^3}{(v_q^r)^3 - (v_q^{in})^3}$$

与已有文献的电力调度模型相比, 上述模型的特点概括如下:

1) 区别于传统的风力发电单机调度问题, 根据风力机组排列的位置、预测风速值及风机的参数值对风场内的风机进行批划分, 以批的方式对风机进行调度.

2) 批模型的参数是基于提出的参数聚合方法确定的, 即把一个批内的所有风机参数按照此规则进行参数聚合变换, 确定批模型参数. 此规则保证该模型得到的解为原问题的可行解.

3) 蓄电池机组除了考虑充电和放电成本以外, 还考虑了充电和放电的启动成本, 以减少蓄电池的频繁使用, 从而增加蓄电池的使用寿命.

4) 模型考虑了风电和蓄电池的协调调度发电量的上下限限制, 保证风电并入电网的输出功率稳定在一个安全区间内. 建立的数学模型是具有整数变量和连续变量的混合整数非线性规划模型, 本身是一个非凸的、离散的、非线性的优化问题, 属于 NP 难问题, 很难获得最优解, 因此寻找其近优解成为主要研究方式.

### 3 问题求解

根据模型的结构特点, 本文设计了拉格朗日松弛 (Lagrangian relaxation, LR) 算法求解该问题. 拉格朗日松弛算法是求解混合整数规划问题的一种有效的最优化算法<sup>[21-22]</sup>. 其优点是能够将复杂问

题的求解转化为单机组子问题进行求解, 并可以利用上下界的对偶间隙评价自身算法性能的好坏. 本文设计的 LR 算法, 通过引入拉格朗日乘子  $\{\lambda_t\}$ ,  $\{\gamma_t\}$ ,  $\{v_t\}$  和  $\{\pi_t\}$ , 将约束 (2)、(3)、(18) 和 (19) 松弛到目标函数中, 形成下面的拉格朗日松弛问题:

$$(LR) \quad L(\lambda, \gamma, v, \pi) = \min Z_{LR}$$

其中,

$$Z \equiv \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^N C1_{it} + \sum_{b=1}^B C3_{bt} \right) + \sum_{t=1}^T \lambda_t \left( D_t - \sum_{i=1}^N p1_{it} \right) - \sum_{w=1}^W \left( |G_w| \cdot p2_{wt} - \sum_{b=1}^B p3_{bt} \right) + \sum_{t=1}^T \gamma_t \left( \sum_{i=1}^N u1_{it} p1_i^{\max} + \sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p2_{wt} + \sum_{b=1}^B u_{bt}^{dc} p_b^{dc} - \sum_{b=1}^B u_{bt}^c p_b^c - D_t - R_t \right) + \sum_{t=1}^T v_t \left( P^U - \sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p_{wt} + \sum_{b=1}^B p3_{bt} \right) + \sum_{t=1}^T \pi_t \left( \sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p_{wt} - \sum_{b=1}^B p3_{bt} - P^L \right) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N a_{i2} (p1_{it})^2 u1_{it} + (a_{i1} u1_{it} - \lambda_t) p1_{it} + S_{it} \cdot u1_{it} (1 - u1_{i,t-1}) + \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^W |G_w| \cdot (v_t + \pi_t + \gamma_t - \lambda_t) p2_{wt} + \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B (a_b + v_t - \lambda_t - \pi_t - \gamma_t u_{bt}^c) p_{bt}^c + (b_b - v_t + \lambda_t + \pi_t + \gamma_t u_{bt}^{dc}) p_{bt}^{dc} + S_b^{dc} \cdot u_{bt}^{dc} (1 - u_{b,t-1}^{dc}) + S_b^c \cdot u_{bt}^c (1 - u_{b,t-1}^c) + \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^N a_{i0} u1_{it} - R_t \gamma_t + (\lambda_t - \gamma_t) D^t + v_t P^U - \pi_t P^L \right)$$

满足约束 (4) ~ (17).

拉格朗日对偶问题为

$$(LD) \quad \max L(\lambda, \gamma, v, \pi)$$

其中,

$$\begin{aligned}
 L(\lambda, \gamma, v, \pi) = & \\
 \min & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N a_{i2}(p1_{it})^2 u1_{it} + \\
 & (a_{i1}u1_{it} - \lambda_t)p1_{it} + S_{it} \cdot u1_{it}(1 - u1_{i,t-1}) + \\
 & \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^W |G_w| \cdot (v_t + \pi_t + \gamma_t - \lambda_t)p2_{wt} + \\
 & \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B (a_b + v_t - \lambda_t - \pi_t - \gamma_t u_{bt}^c)p_{bt}^c + \\
 & (b_b - v_t + \lambda_t + \pi_t + \gamma_t u_{bt}^{dc})p_{bt}^{dc} + \\
 & S_b^{dc} \cdot u_{bt}^{dc}(1 - u_{b,t-1}^{dc}) + \\
 & S_b^c \cdot u_{bt}^c(1 - u_{b,t-1}^c) + \\
 & \sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^N a_{i0}u1_{it} - R_t \gamma_t + \\
 & (\lambda_t - \gamma_t)D^t + v_t P^U - \pi_t P^L) \quad (23)
 \end{aligned}$$

满足约束 (4) ~ (17).

对于给定的  $\{\lambda_t\}$ ,  $\{\gamma_t\}$ ,  $\{v_t\}$  和  $\pi_t$  乘子, 松弛问题可以分解为火电、风电和蓄电池三个单机组子问题, 即:

$$\begin{aligned}
 LR1 = \min & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N a_{i2}(p1_{it})^2 u1_{it} + \\
 & (a_{i1}u1_{it} - \lambda_t)p1_{it} + \\
 & S_{it} \cdot u1_{it}(1 - u1_{i,t-1}) \quad (24)
 \end{aligned}$$

满足约束 (4) 和 (5).

$$LR2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^W (v_t + \pi_t + \gamma_t - \lambda_t)p2_{wt} \quad (25)$$

满足约束 (6) ~ (11).

$$\begin{aligned}
 LR3 = \min & \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^B (a_b + v_t - \lambda_t - \pi_t - \gamma_t u_{bt}^c)p_{bt}^c + \\
 & (b_b - v_t + \lambda_t + \pi_t + \gamma_t u_{bt}^{dc})p_{bt}^{dc} + \\
 & S_b^{dc} \cdot u_{bt}^{dc}(1 - u_{b,t-1}^{dc}) + \\
 & S_b^c \cdot u_{bt}^c(1 - u_{b,t-1}^c) \quad (26)
 \end{aligned}$$

满足约束 (12) ~ (17).

### 3.1 求解子问题

火电机组子问题可以用文献 [23] 提出的动态规划方法进行求解, 即以最大最小开关机时间作为各个阶段的状态点. 但是, 当调度周期比较大时, 往往

需要消耗很多时间用于状态空间的遍历. 因此, 本文提出了一种加速策略, 加速策略是根据最优性条件提出的. 当满足最优性条件时, 子问题的最优解能够直接获得. 其最优性条件及相应的最优解介绍如下: 对于火电机组子问题的目标函数 (25), 定义  $A = (a_{i1}u1_{it} - \lambda_t)p1_{it}$ , 表示机组  $i$  在第  $t$  时刻与拉格朗日乘子相关的发电费用. 有如下的最优性质:

**最优性质.** 当  $A \geq 0$  时,

1) 如果  $T_{i0}^{on} \geq T_i^{on}$  或  $T_{i0}^{off} < 0$ ,  $T_{i0}^{on}$ ,  $T_{i0}^{off}$  分别表示火力发电机组的初始开关机持续时间, 则  $u1_{it} = 0$ ,  $p1_{it} = 0$ , 即  $LR1 = 0$ .

2) 如果  $T_{i0}^{on} \neq 0$  且  $T_{i0}^{on} < T_i^{on}$ , 则:

a) 当  $1 \leq t \leq (T_i^{on} - T_{i0}^{on})$  时,  $u1_{it} = 1$ ,  $LR1 =$

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N a_{i2}(p1_i^{\min})^2 u1_{it} + (a_{i1}u1_{it} - \lambda_t)p1_i^{\min};$$

b) 当  $t > (T_i^{on} - T_{i0}^{on})$  时,  $u1_{it} = 0$ , 即  $LR1 = 0$ .

**证明.** 从函数  $A = (a_{i1}u1_{it} - \lambda_t)p1_{it}$  可以观测出, 对于最小化问题, 当  $A \geq 0$  时, 因为  $p1_{it} \geq 0$ , 所以必然存在  $p1_{it} = 0$  或  $p1_{it} = p1_i^{\min}$  (需要满足最小开关机约束) 才能保证目标函数取到最小值. 因此最优性条件可以直接观测出, 因此具体证明从略.  $\square$

基于上述的最优性质, 在求解火电机组子问题之前, 首先判断是否满足最优性质, 如果满足其中一个最优性条件, 则可以不调用动态规划而直接获得子问题的最优解, 否则, 调用动态规划求解子问题.

在求解风力发电机组子问题时, 可以先根据风力的预测值直接确定风力机组的启停状态. 在启停状态确定后, 风力发电的子问题就转化为线性规划问题, 其风力发电量的确定直接用 CPLEX 软件包进行求解.

在求解蓄电池发电机组子问题时, 后一状态的充放电与前一状态的充放电相关, 前后时间段的充放电是耦合的, 因此不能直接用标准的动态规划方法进行求解. 当尝试使用 CPLEX 优化软件求解该子问题时, 即使是小规模问题, 也需要消耗大量的时间, 甚至不能在限定的时间内获得解. 因此, 本文设计了近似动态规划方法, 在算法中蓄电池的状态通过近似处理而获得. 根据调度原则, 蓄电池的最大允许充电容量为  $d_2 Q_{bttotal}$ , 因此设定蓄电池每次充放电只能为  $(d_2 Q_{bttotal})/2$ ,  $(d_2 Q_{bttotal})/3$  和  $d_2 Q_{bttotal}$ , 放电的设定与充电相同. 因此可以将动态规划的状态分为 7 个状态, 即 3 个充电状态、3 个放电状态及 1 个浮充状态. 其计算方法为动态规划的基本方法, 在此不详述.

### 3.2 可行解的构造

在算法的每次迭代中, 由于有些约束被松弛了, 导致拉格朗日松弛问题的解对于原问题往往是不可

行的,因此本文设计了启发式算法将其转化为可行.其总调度原则是:

1) 当风力发电机组的总发电量大于负荷需求时,则只开启必开的火电机组,多余的电充进蓄电池.

2) 当风力发电有盈余时,让蓄电池充电,当风力发电不足时,让蓄电池放电.

3) 每次调度前先检查蓄电池的剩余容量,在负荷低谷时,若蓄电池容量已经达到 90% 以上,则不给蓄电池充电;若剩余容量低于 20%,将它作为负载进行充电(负荷高峰时不充电),一直到容量达到 90% 以上为止,否则作为电源参加经济调度.

其启发式步骤如下:

**步骤 1.** 以对偶问题得到的调度作为初始解.根据风力预测发电量,确定风力发电的启停状态,并利用线性规划软件包确定风力发电的发电量.

**步骤 2.** 判断风力发电的总发电量,如果  $P^L \leq \sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p_{2wt} \leq P^U$ , 则令  $u_{bt}^c = u_{bt}^{dc} = 0, p_{3bt} = 0$ , 转到步骤 4; 如果  $\sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p_{2wt} > P^U$ , 则令  $u_{bt}^c = 1$ ; 如果  $\sum_{w=1}^W |G_w| \cdot p_{2wt} < P^L$ , 则令  $u_{bt}^{dc} = 1$ .

**步骤 3.** 根据步骤 2 确定的蓄电池充电状态,利用线性规划软件包进行求解,确定  $p_{3bt}$  的值,满足约束 (18) 和 (19).

**步骤 4.** 确定风电和蓄电池的启停状态及发电量后,判断当前解是否满足旋转备用约束 (3). 如果满足,则令  $u_{1it} = 0$ , 转到步骤 5; 否则,令  $u_{1it} = 1$ , 确定火力发电机组的启停状态.

**步骤 5.** 判断当前解是否满足约束 (2), 如果满足,则转到步骤 6; 否则,利用线性规划软件包求解火力发电机组的发电量.

**步骤 6.** 获得最终解,算法停止.

### 3.3 拉格朗日乘子迭代方法

对于求解对偶问题,本文采用了代理次梯度<sup>[24]</sup>方法用于更新乘子的值.由于子问题是近似求解,对偶问题的目标值不是最优目标函数值的真实下界,只能作为代理下界进行迭代.为了减少代理次梯度方法的下界高估对乘子的影响,步长因子  $\sigma$  取值减少,范围缩小一半,即  $0 < \sigma < 1$ . 其乘子  $\{\gamma_t\}, \{\lambda_t\}$  在  $h$  次迭代中的更新公式分别如下:

$$\gamma^{(h+1)} = \max\{0, \gamma^{(h)} + (\tilde{\eta})^{(h)} sg_1^{(h)}\} \quad (27)$$

$$\lambda^{(h+1)} = \lambda^{(h)} + (\tilde{\eta})^{(h)} sg_2^{(h)} \quad (28)$$

其中,  $sg_1$  是  $\{\gamma_t\}$  对应的代理次梯度向量,  $sg_2$  是  $\{\lambda_t\}$  对应的代理次梯度向量. 乘子  $\{v_t\}, \{\pi_t\}$  的更新公式同式 (27). 其迭代步长  $\tilde{\eta}$  计算如下:

$$\tilde{\eta} = \sigma^{(h)} \frac{Z^U - \tilde{Z}^{(h)}}{\sum_{i=1}^4 \|(sg_i^{(h)})\|^2}, \quad 0 < \sigma < 1 \quad (29)$$

其中,  $\sigma$  是步长迭代因子,  $Z^U$  是当前得到的最好可行解的目标函数值,  $\tilde{Z}^{(h)}$  是第  $h$  次迭代的代理对偶.

## 4 实验设计及计算结果

为了验证所提出模型和算法的有效性,模型借助于标准软件 CPLEX 进行验证,而算法用 C++ 进行编程实现,全部模型和算法在 PC 机 (Pentium-IV 3.10 GHz CPU、4.00 GB 内存) 上进行测试. 实验所需的火力发电机组的数据来自文献 [25], 由于我们的问题与文献 [25] 的问题有一些差别,对文献 [25] 不适合本问题的一些参数,根据问题的需要进行了调整. 涉及到参数  $p_{1i}^{\min}$  的取值为在区间 [30, 60] 之间均匀分布,其最大发电量  $p_{1i}^{\max}$  的取值为最小值  $p_{1i}^{\min}$  的 8~10 倍. 风电场和蓄电池是通过分析某电厂的实际生产情况随机产生的. 对于风力发电机组,每个时间段又分为  $K = 10$  个时刻进行精确调度. 风力发电机组额定功率为 2.5 MW, 其最大发电量在区间 [2.5, 3.0] 之间均匀分布. 风力发电机组的电量平衡约束值与旋转备用约束值在 [0.5, 1.0] 之间均匀分布. 蓄电池最大充电量取值在 [7, 12] 之间均匀分布,最小充电量在 [1, 2] 之间均匀分布. 风电与蓄电池协调约束上限值为风力发电机组发电量总和的 1.1 倍,下限值取值为 0.9 倍. 计划周期是 24 小时. 24 小时的负荷曲线如图 6 所示. 火力发电机的机组数分别为 10, 30, 50, 100, 200, 风力发电机的机组数分别为 50, 100, 500, 蓄电池的机组数分别为 20, 40, 200, 由这三个参数的组合确定的规模如表 1 所示,每种规模随机产生和求解了 10 组实例.

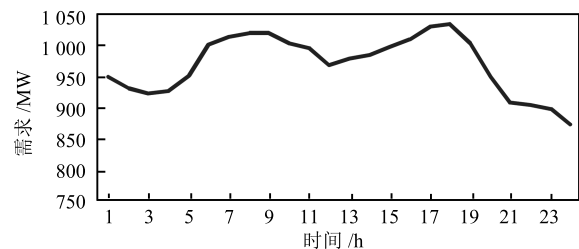


图 6 24 小时负荷曲线

Fig. 6 The electric power demand curve of 24 hours



表 1 模型与算法的性能比较计算结果  
Table 1 Comparison between the CPLEX and LR

规模	CPLEX								LR			
	N1	N2	N3	N4	AR <sub>1</sub>	AR <sub>2</sub>	ACT1	ACT2	AR <sub>3</sub>	AR <sub>4</sub>	ACT3	ACT4
10 × 50 × 20	2	7	10	0	10.2134	1.0007	658.62	62.26	1.0202	1.0220	100.44	11.62
30 × 50 × 20	0	4	6	4	22.4066	1.0001	1800	642.20	1.0154	1.0173	101.89	11.76
50 × 50 × 20	0	4	3	7	13.3442	1.0000	1800	847.92	1.0199	1.0204	98.89	13.03
100 × 50 × 20	0	7	1	9	4.1187	1.0000	1800	1107.80	1.0165	1.0168	102.26	15.05
200 × 50 × 20	0	5	0	9	4.8595	2.5967	1800	1800	1.0144	1.0136	122.29	22.31
10 × 100 × 40	0	0	8	2	49.8455	1.0000	—	672.62	1.0126	1.0151	176.56	17.68
30 × 100 × 40	0	0	3	4	26.0544	11.7202	—	950.87	1.0047	1.0052	181.75	18.12
50 × 100 × 40	0	0	0	5	19.1359	10.1476	—	1800	1.0040	1.0044	215.04	22.46
100 × 100 × 40	0	0	0	5	9.7223	5.4860	—	1800	1.0027	1.0027	213.83	24.30
200 × 100 × 40	0	0	0	3	5.4671	4.1853	—	1800	1.0020	1.0021	199.63	26.91
10 × 500 × 200	0	0	0	0	113.9963	17.4596	—	—	2.6195	2.6492	925.68	81.79
30 × 500 × 200	0	0	0	0	28.7955	28.7955	—	—	1.0000	1.0042	961.48	83.37
50 × 500 × 200	0	0	0	0	17.0290	17.0290	—	—	1.0001	1.0036	1798.74	151.61
100 × 500 × 200	0	0	0	0	10.2736	10.2736	—	—	1.0002	1.0017	1617.97	144.05
200 × 500 × 200	0	0	0	0	4.9025	4.9025	—	—	1.0000	1.0011	1739.14	155.89

#### 4.1 模型及算法性能比较实验设计

为了测试批模型的有效性, 借助于 CPLEX 优化软件, 通过求解最优解或近优解的个数及运行时间两个指标比较了批模型和单机模型的性能。

计算结果如表 1 所示. 其中,  $ACT1 =$  单机模型每个规模平均计算时间,  $ACT2 =$  批模型每个规模平均计算时间,  $ACT3 =$  LR 求解单机模型每个规模平均计算时间,  $ACT4 =$  LR 批模型每个规模平均计算时间,  $N1/N2 =$  单机模型每个规模最优/近优求解个数,  $N3/N4 =$  批模型每个规模最优/近优求解个数. 表 1 对模型和算法的性能进行了综合比较, 令  $AR_i = Z_i / \min\{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4\}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), 其中,  $Z_1$  表示 CPLEX 求解单机模型获得的目标函数值,  $Z_2$  表示 CPLEX 求解批模型获得的目标函数值,  $Z_3$  表示 LR 求解单机模型获得的目标函数值,  $Z_4$  表示 LR 求解批模型获得的目标函数值. 从表 1 观测到如下结论:

##### 1) 模型的有效性

a) 对于小规模问题, 批模型求得最优解的数量明显优于单机模型.

b) 对于中规模问题, 当单机模型无法求解时, 批模型依然能求解.

##### 2) LR 算法的有效性

a) 对于小规模问题, LR 能在相对较短的时间

内获得与 CPLEX 非常接近的最优解.

b) 对于中大规模问题, 随着规模的增加, LR 获得的解的质量明显优于 CPLEX; 当 CPLEX 无法求解批模型时, LR 算法能在合理的时间内获得高质量的近优解.

c) 基于批模型的 LR 算法获得的解非常接近基于单机模型的 LR 算法, 平均偏差为 0.28%, 表明批模型具有高的精度. 同时在计算时间上, 批模型的算法求解时间明显优于单机模型, 其平均求解时间缩短了 9.72 倍, 表明基于批模型的算法具有明显的优势.

以上结果表明, 所建立的批模型能够有效解决大规模风电接入问题, 同时, 基于批模型开发的 LR 算法能够在较短的时间获得高质量的解. 为了测试风电的利用率及稳定性, 进一步实验如下.

#### 4.2 模型对风电的利用率

图 7 虚线表示基于本文所建立的模型通过 CPLEX 求解所获得的风机计算发电量, 实线表示风机通过给定的风速预测获得的估计发电量. 从图中可以看出, 虽然风机模型计算发电量有时略小于估计发电量, 但是两者曲线非常接近, 表明所提出的模型达到了充分利用风能进行发电的预期目的.

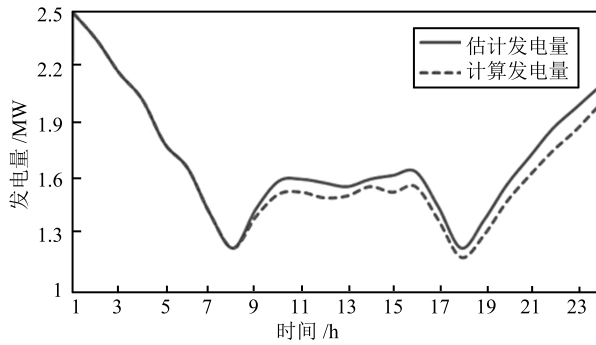


图7 风机估计发电量和计算发电量比较

Fig.7 Comparison between the estimated wind power and the wind power obtained by the model

### 4.3 蓄电池对风电接入后电网稳定性的影响

图8是发电系统中是否带有蓄电池对系统发电稳定性的影响示意图。由图中可以看出,带有蓄电池的发电系统,通过蓄电池的调节,最终风力发电机组的发电量的波动情况趋于平稳,与无蓄电池的发电系统比较,明显提高了系统的稳定性。

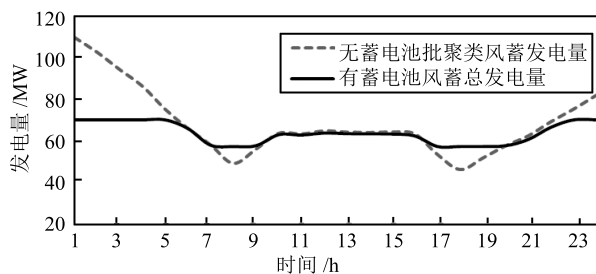


图8 蓄电池对发电系统的发电量稳定性的影响

Fig.8 Effect of battery on the stability of power system generation

## 5 结束语

本文针对大规模风电并网电力系统的优化调度问题进行了研究,根据问题的特点建立了数学规划模型,在考虑常规火电和风电约束的基础上,为了降低风电的不确定性和波动性的影响,考虑了蓄电池机组与风电进行协调调度。同时为了解决风电大规模难于求解的问题,对风机的调度采用集批调度策略,提出了批模型,并用CPLEX优化软件进行了验证。当批模型用CPLEX也无法求解时,设计了基于代理次梯度的乘子迭代方法的拉格朗日松弛算法。所提出的算法与CPLEX的计算结果进行比较,表明所提出的批聚合变换方法在保证求解质量的前提下能够大大提高模型的求解效率,且设计的拉格朗日松弛算法也能够较短的时间内获得满意解。

## References

- European Wind Energy Association, Greenpeace. *Wind Force 12*. Beijing: China Environmental Science Press, 2004. (欧洲风能协会, 国际绿色和平. 风力 12. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.)
- Sadanandan N D, Hilson D W, Needham M E, Morris K W, Sendaula M. Impact assessment of wind generation on the operations of a power system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, **102**(9): 2905–2911
- Wang J H, Shahidehpour M, Li Z Y. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**(3): 1319–1327
- Chen C L. Optimal wind-thermal generating unit commitment. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, **23**(1): 273–281
- Chen C L, Lee T Y, Jan R M. Optimal wind-thermal coordination dispatch in isolated power systems with large integration of wind capacity. *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**(18–19): 3456–3472
- Denny E, O'Malley M. Wind generation, power system operation, and emissions reduction. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, **21**(1): 341–347
- Tuohy A, Meibom P, Denny E, O'Malley M. Unit commitment for systems with significant wind penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, **24**(2): 592–601
- Miranda V, Hang P S. Economic dispatch model with fuzzy wind constraints and attitudes of dispatchers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, **20**(4): 2143–2145
- Hetzer J, Yu D C, Bhattarai K. An economic dispatch model incorporating wind power. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, **23**(2): 603–611
- Abreu L. *Wind Power Generation and Dispatch in Competitive Power Markets* [Ph.D. dissertation], Illinois Institute of Technology, USA, 2008.
- Yuan Y, Zhang X S, Ju P, Li Q, Qian K J, Fu Z X. Determination of economic dispatch of wind farm-battery energy storage system using genetic algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2014, **24**(2): 264–280
- Thatte A A, Xie L, Viassolo D E, Singh S. Risk measure based robust bidding strategy for arbitrage using a wind farm and energy storage. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, **4**(4): 2191–2199
- Zhao C Y, Wang J H, Watson J P, Guan Y P. Multi-stage robust unit commitment considering wind and demand response uncertainties. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, **28**(3): 2708–2717
- Jiang R W, Wang J H, Guan Y P. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, **27**(2): 800–810
- Lee C, Liu C, Mehrotra S J, Shahidehpour M. Modeling transmission line constraints in two-stage robust unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, **29**(3): 1221–1231

- 16 Jiao Chun-Ting, Guan Xiao-Hong, Wu Jiang, Lei Xue-Jiao, Li Pan. Security-constrained unit commitment with large-scale cross-region wind penetration. In: Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. Nanjing, China: 2014. 28–30  
(焦春亭, 管晓宏, 吴江, 雷雪娇, 李盼. 考虑大规模风电跨区消纳的电力系统调度. 第 33 届中国控制会议. 南京, 中国: 2014. 28–30)
- 17 Wu Xiong, Wang Xiu-Li, Li Jun, Guo Jing-Li, Zhang Kai, Chen Jie. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems. *Proceedings of the CSEE*, 2013, **33**(13): 10–17  
(吴雄, 王秀丽, 李骏, 郭静丽, 张凯, 陈洁. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解. 中国电机工程学报, 2013, **33**(13): 10–17)
- 18 Hu Ze-Chun, Ding Hua-Jie, Kong Tao. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-storage plant. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, **36**(2): 36–41, 57  
(胡泽春, 丁华杰, 孔涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型. 电力系统自动化, 2012, **36**(2): 36–41, 57)
- 19 Wang Cheng-Xu, Zhang Yuan. *Wind Power Generation*. Beijing: China Electric Power Press, 2003.  
(王承煦, 张源. 风力发电. 北京: 中国电力出版社, 2003.)
- 20 Chedid R, Akiki H, Rahman S. A decision support technique for the design of hybrid solar-wind power systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1998, **13**(1): 76–83
- 21 Shapiro J F. Generalized Lagrange multipliers in integer programming. *Operations Research*, 1971, **19**(1): 68–76
- 22 Fisher M L. The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. *Management Science*, 1981, **27**(1): 1–18
- 23 Guan X, Luh P B, Yan H, Amalfi J A. An optimization-based method for unit commitment. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1992, **14**(1): 9–17
- 24 Kaskavelis C A, Caramanis M C. Efficient Lagrangian relaxation algorithms for industry size job-shop scheduling problems. *IIE Transactions*, 1998, **30**(11): 1085–1097
- 25 Bard J F. Short-term scheduling of thermal-electric generators using Lagrangian relaxation. *Operations Research*, 1988, **36**(5): 756–766



郎劲 东北大学工业工程与物流优化研究所博士研究生. 主要研究方向为电力机组调度, 能源建模与优化.

E-mail: langjin@ise.neu.edu.cn

(LANG Jin Ph.D. candidate at the Institute of Industrial Engineering and Logistics Optimization, Northeastern University. Her research interest covers

unit commitment, energy modeling, and optimization algorithms.)



唐立新 东北大学工业工程与物流优化研究所教授. 主要研究方向为生产批调度, 库存控制与供应链计划, 生产过程操作优化. 本文通信作者.

E-mail: lixintang@mail.neu.edu.cn

(TANG Li-Xin Professor at the Institute of Industrial Engineering and Logistics Optimization, Northeastern

University. His research interest covers batching and scheduling of the production operations, inventory control and supply chain planning, and production-process operations optimization. Corresponding author of this paper.)