

# 考虑蓄电池分组优化的风储系统多层次调度策略

刘春阳, 王秀丽, 吴雄

(西安交通大学 电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

## A Multi-Layer Dispatch Strategy of Combined Wind-Storage Systems Considering Optimization of Battery Units

LIU Chunyang, WANG Xiuli, WU Xiong

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Because of randomness and fluctuation of wind power output, wind farms bring difficulties to power system dispatching. However, wind farms with battery energy storage systems can make wind power output more dispatchable. To improve wind farms power output dispatching, this paper proposes a coordinated wind-storage dispatch strategy, consisting of multi-layer dispatch and considering battery characteristics. Objective of this dispatch strategy is profit maximization, and the strategy optimizes each battery unit individually considering battery lifetime and operating characteristics. This paper applies Monte Carlo and scenario reduction algorithms to simulate forecasted and actual power output of wind farms, and uses mixed integer linear programming algorithm to solve the dispatch model. Results demonstrate effectiveness of the strategy on wind farms dispatching and battery optimization.

**KEY WORDS:** combined wind-storage system; multi-layer dispatch; battery lifetime; battery units; mixed integer linear program

**摘要:** 风力发电具有随机性和波动性的特点, 对于电力系统的调度造成负面的影响, 而蓄电池与风机组成的联合系统增加了风电场出力的可调度性。为提高风储联合系统的可调度性, 提出一种风储联合优化的调度策略, 调度策略采用分层调度的方法, 考虑了蓄电池的特性对风电调度的影响。调度策略以收益最大化为目标, 对蓄电池采用分组优化, 充分考虑蓄电池的寿命和运行特性, 得到经济性的调度结果。应用蒙特卡洛和场景削减方法, 模拟真实风电场的预测出力与真实出力, 采用混合整数规划的方法求解模型, 通过仿真验证了调度策略对风电场可调度性和蓄电池优化的积极作用。

**关键词:** 风储联合系统; 分层调度; 蓄电池寿命; 蓄电池分组; 混合整数规划

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.10.015

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577146)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51577146).

## 0 引言

随着能源危机加剧和环境污染日益严重, 风电等可再生能源发电受到越来越多的关注。但是风力发电具有随机性和波动性的特点, 使其在电力系统中调度难度大, 蓄电池作为储能装置与风机组成风储联合系统可以增加风电出力的可调度性, 是解决风电出力随机性和波动性的有效途径<sup>[1]</sup>。接入电力系统的风电场需要具备按照调度调节有功出力的能力<sup>[2]</sup>, 使储能与风电联合系统得到更广泛的应用。

文献[1、3-4]研究了风储联合系统中储能系统对平滑风电出力的作用, 多采用滤波器的方式对储能出力进行控制。文献[5-7]研究了风储联合系统在电力市场中的竞价模型, 风电场通过对蓄电池的调度在不同电力市场中实现盈利最大化。文献[8-10]研究了储能装置对风电场所在电力系统的电压波动的影响。上述文献的研究主要集中在蓄电池与风电出力的配合, 以实现利益最大化或改善风电质量, 但是没有考虑蓄电池的寿命因素。文献[11-12]定性描述了风储系统中蓄电池的寿命, 利用限制蓄电池充放电次数的方法来提高蓄电池的使用寿命。文献[13-14]以充放电次数作为蓄电池费用的计算变量, 但是缺少蓄电池次数的统计方法, 因为不同放电深度下的充放电循环对蓄电池总放电次数的影响并不相同。文献[15]从博弈论的角度研究风储系统的经济效益, 其中循环次数采用雨流法计数, 这是近年最常用的循环次数计数方法<sup>[16-18]</sup>, 但是目前没有任何实验证明雨流法的正确性, 且雨流法无法应用于线性规划。以上文献都是将风电场中的蓄电池当做单一的控制单元处理, 或定性或定量估算蓄电池的运行费用, 但是缺少对蓄电池的分组优化的研究。

本文以风机与蓄电池组成的风储联合系统为研究对象, 根据实际电力系统需求, 提出一种提高

风储系统可调度性的多层次优化调度策略。调度策略的目标为效益最大化,根据风电短期预测、超短期预测和实际风电,将风电调度分为日前调度、日内调度和实时调度3个层次。不同层次的调度充分考虑了蓄电池的寿命因素,并提出了蓄电池的分组优化方法,给出风电出力与蓄电池出力的配合方式。通过蒙特卡洛与场景削减技术模拟真实风电场的预测与实际出力,建立多概率的混合整数线性规划调度模型,并应用混合整数线性规划软件对其进行求解,算例验证了调度策略的有效性。

## 1 蓄电池模型

在风储联合系统中,由于风电有着随机性的特点,蓄电池的作用就更加显著,蓄电池模型除了包含运行特性的出力模型外,还应有寿命模型。

### 1.1 蓄电池出力模型

蓄电池的充电功率和放电功率限值为

$$P_{ch}(t)U_{ch}(t) < P_{ch}(t) < \bar{P}_{ch}(t)U_{ch}(t) \quad (1)$$

$$P_{dh}(t)U_{dh}(t) < P_{dh}(t) < \bar{P}_{dh}(t)U_{dh}(t) \quad (2)$$

其中:  $P_{ch}(t)$  为充电功率;  $\underline{P}_{ch}(t)$ 、 $\bar{P}_{ch}(t)$  分别为充电功率的下限与上限;  $P_{dh}(t)$  为放电功率;  $\underline{P}_{dh}(t)$ 、 $\bar{P}_{dh}(t)$  分别为放电功率的下限与上限。充放电功率的上限一般由物理因素决定,下限一般设为0,有时为防止小功率波动也可设定一个阈值。 $U_{ch}(t)$ 、 $U_{dh}(t)$  为0、1变量,分别表示蓄电池的放电状态和充电状态,蓄电池的充放电状态的互斥关系,如式(3)所示:

$$U_{dh}(t) + U_{ch}(t) \leq 1 \quad (3)$$

蓄电池的剩余容量超过限值会对蓄电池造成很大损害,其约束如式(4)所示:

$$\underline{E} \leq E(t) \leq \bar{E} \quad (4)$$

其中  $\underline{E}$ 、 $\bar{E}$  分别表示蓄电池剩余容量的最小和最大值。

蓄电池在时刻  $t$  的剩余容量跟其前一个时刻  $t-\Delta t$  的剩余容量以及其从  $t-\Delta t$  到  $t$  的充放电量有关,在充放电的过程中,蓄电池的剩余能量计算公式为

$$E(t) = E(t-1)(1-\sigma) - P_{dh}(t)\Delta t / \eta_{dh} + P_{ch}(t)\Delta t\eta_{ch} \quad (5)$$

其中:  $E(t)$ 、 $E(t-1)$  分别为时刻  $t$ 、 $t-1$  的蓄电池剩余容量(kW·h);  $\eta_{ch}$ 、 $\eta_{dh}$  分别是蓄电池的充电效率和放电效率;  $\sigma$  是蓄电池的自放电率。

### 1.2 蓄电池寿命模型

蓄电池的寿命一般是由厂家给出的不同放电深度下的循环次数来表示,蓄电池总的循环次数函数如下

$$N = a_1 + a_2 e^{-a_3 D_{OD}} + a_4 e^{-a_5 D_{OD}} \quad (6)$$

其中:  $D_{OD}$  是蓄电池的放电深度;  $a_1 \sim a_5$  是由生产厂家提供的参数。

在实际系统中,由于蓄电池通常不能保证每次的放电深度都是一样的,很难计算循环次数,目前普遍应用雨流法统计循环次数,但其无法应用于线性计算当中。

图1为某型号蓄电池的循环寿命与DOD的关系,同时给出蓄电池总能量吞吐量与DOD的关系。蓄电池在给定DOD下的总能量吞吐量的公式为

$$E_{throughput}(D_{OD}) = 2E_{rated}D_{OD}N(D_{OD}) \quad (7)$$

其中:  $E_{throughput}(D_{OD})$  为蓄电池在给定DOD下的总能量吞吐量;  $E_{rated}$  为蓄电池的额定容量。

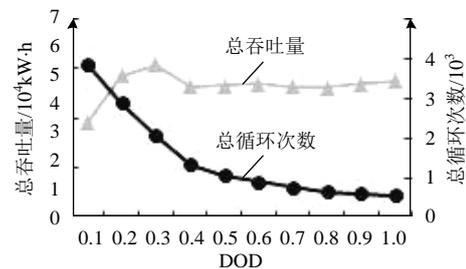


图1 蓄电池总能量吞吐量、总循环次数与DOD的关系<sup>[19]</sup>

Fig. 1 Relationship between energy throughput, circle to failure and DOD<sup>[19]</sup>

从图1可以看出,蓄电池充放电总循环次数随着DOD的增加而减少,但是在DOD大于0.2的情况下,蓄电池总的能量吞吐量变化不大。

假设蓄电池在DOD大于某一较小值(设为  $D_{min}$ )的条件下总能量吞吐量为定值,则其寿命内总能量吞吐量表示如下

$$E_{throughput} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{throughput}(D_{ODi})}{n}, \quad D_{ODi} > D_{min} \quad (8)$$

其中:  $E_{throughput}$  为蓄电池寿命内总的能量吞吐量;  $n$  为对蓄电池的不同放电深度测试的个数; 下标  $i$  表示第  $i$  次测试。

计算周期  $T$  内蓄电池的寿命损耗可以用周期内的能量吞吐量表示,如式(9)所示:

$$E_{loss} = \int_{t=0}^T [P_{ch}(t) + P_{dh}(t)] dt \quad (9)$$

实际蓄电池的使用寿命会受到一些因素的影响,其中最主要的影响因素是蓄电池的温度与荷电状态(SOC),温度可以通过温度控制实现, SOC 则需要准确建模。蓄电池吞吐相同能量,在SOC较低的情况下对蓄电池寿命的损耗较大,在SOC较高的情况下对寿命的损耗较小。蓄电池的寿命损耗权重与SOC的关系如图2所示。

考虑蓄电池寿命损耗权重之后的蓄电池的寿

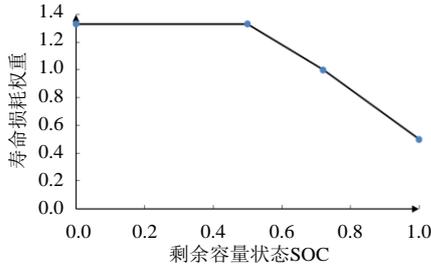


图2 蓄电池 SOC 因素的寿命损耗权重<sup>[20]</sup>

Fig. 2 Relationship between weighting factor and the SOC of lead-acid battery<sup>[20]</sup>

命损耗用等效能量吞吐量表示, 如式(10)所示。

$$E_{\text{loss}} = \int_{t=0}^T [P_{\text{ch}}(t) + P_{\text{dh}}(t)] f[S_{\text{OD}}(t)] dt \quad (10)$$

其中  $f(\text{SOC}(t))$  是与 SOC 相关的蓄电池寿命损耗权重。

## 2 多层次优化调度模型

按照风电场接入电力系统技术规定<sup>[2]</sup>, 风电场每天按照电力系统调度机构规定时间次日 0~24 h 风电功率预测曲线, 时间精度为 15 min, 而后滚动上报未来 4 h 内的风电功率预测曲线, 时间精度依旧为 15 min。本文按照技术规定, 将风电调度策略分为 3 个层次: 提前 24 h 的日前调度、4 h 内的日内滚动调度和 15 min 内的实时调度。

### 2.1 日前调度

风电场的出力有不确定性, 日前功率预测一般误差比较大, 为此本文应用多场景模拟风力发电, 以多概率模型的期望值作为日前调度结果。

#### 2.1.1 目标函数

目标函数中包括风电场向电网卖电收益、蓄电池运行成本和风电出力偏差的惩罚费用, 具体描述如下

$$\begin{aligned} \min C_{1st} = & \sum_{s=1}^{S_{1st}} P_{\text{pro}}^s \sum_{t=1}^{T_{1st}} [C_{\text{OM}}^s(t) + C_{\text{DP}}^s(t)] - \\ & \sum_{s=1}^{S_{1st}} P_{\text{pro}}^s \sum_{t=1}^{T_{1st}} [P_{\text{sell}}(t) P_{\text{w,com}}^s(t)] + \\ & \sum_{s=1}^{S_{1st}} P_{\text{pro}}^s \sum_{t=1}^{T_{1st}} [C_{\text{pun}}^s(t)] \end{aligned} \quad (11)$$

其中:  $S_{1st}$  表示第一层次日前调度的风电场景总数, 上标  $s$  表示第  $s$  个场景;  $T_{1st}$  表示第一层次的计算周期;  $P_{\text{pro}}^s$  为场景  $s$  的概率;  $C_{\text{OM}}^s(t)$ 、 $C_{\text{DP}}^s(t)$  分别表示蓄电池在场景  $s$  时段  $t$  的维护费用与折旧成本;  $P_{\text{sell}}(t)$  为时段  $t$  的风电上网电价;  $P_{\text{w,com}}^s(t)$  为风储系统在场景  $s$  时段  $t$  的联合出力;  $C_{\text{pun}}^s(t)$  为风电在场景  $s$  时段  $t$  下的出力偏差惩罚费用。

式中的蓄电池的维护费用、折旧成本函数 (12)(13)

$$C_{\text{OM}}^s(t) = K_{\text{OM}} [P_{\text{ch}}^s(t) + P_{\text{dh}}^s(t)] \Delta t \quad (12)$$

$$C_{\text{DP}}^s(t) = (E_{\text{rated}} C_E + P_{\text{rated}} C_P) \frac{E_{\text{loss}}^s(t)}{E_{\text{throughput}}} \quad (13)$$

其中:  $K_{\text{OM}}$  为蓄电池的单位电量运行维护成本系数;  $P_{\text{ch}}^s(t)$ 、 $P_{\text{dh}}^s(t)$  分别表示蓄电池在场景  $s$  时段  $t$  的充放电功率;  $E_{\text{rated}}$ 、 $P_{\text{rated}}$  分别为蓄电池的额定容量和额定功率;  $C_E$ 、 $C_P$  分别为蓄电池的单位容量和单位功率安装成本的现值。

惩罚费用分为出力大于计划值的惩罚和出力小于计划值的惩罚, 如

$$C_{\text{pun}}^s(t) = \begin{cases} P_{\text{up},1st}(t) \{ P_{\text{w,com}}^s(t) - [P_{\text{w},1st}(t) + \Delta P_{\text{up},1st}(t)] \}, & \text{if } P_{\text{w,com}}^s(t) > P_{\text{w},1st}(t) + \Delta P_{\text{up},1st}(t); \\ 0, & \text{if } P_{\text{w},1st}(t) - \Delta P_{\text{down},1st}(t) \leq P_{\text{w,com}}^s(t) \leq P_{\text{w},1st}(t) + \Delta P_{\text{up},1st}(t); \\ P_{\text{down},1st}(t) \{ [P_{\text{w},1st}(t) - \Delta P_{\text{down},1st}(t)] - P_{\text{w,com}}^s(t) \}, & \text{if } P_{\text{w,com}}^s(t) < P_{\text{w},1st}(t) - \Delta P_{\text{down},1st}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{\text{w},1st}(t)$  为调度第一层次日前上报的风储联合出力;  $p_{\text{up},1st}(t)$ 、 $p_{\text{down},1st}(t)$  分别为风储联合出力大于和小于日前上报出力范围的费用惩罚系数;  $\Delta P_{\text{up},1st}(t)$ 、 $\Delta P_{\text{down},1st}(t)$  分别为日前上报出力允许的向上和向下波动范围。

#### 2.1.2 约束条件

与风电出力相关的约束包括风电出力限制约束, 风储联合出力公式

$$P_{\text{w,sch}}^s(t) \leq P_{\text{w,f}}^s(t) \quad (15)$$

$$P_{\text{w,com}}^s(t) = P_{\text{w,sch}}^s(t) - P_{\text{ch}}^s(t) + P_{\text{dh}}^s(t) \quad (16)$$

其中:  $P_{\text{w,sch}}^s(t)$  为风机在场景  $s$  时段  $t$  的调度出力;  $P_{\text{w,f}}^s(t)$  为风机在场景  $s$  时段  $t$  的预测出力。

同时, 风储联合系统还应满足蓄电池的运行约束条件(1)~(5), 以及蓄电池的寿命损耗公式(10)。

蓄电池在日前调度周期末的剩余容量约束, 如式(17)所示。

$$E^s(T) = E^s(0) + \Delta E^s \quad (17)$$

其中  $\Delta E^s$  为在日前调度周期蓄电池始末剩余容量能量差, 调整  $\Delta E^s$  可使日前调度周期末蓄电池剩余容量保持在理想水平。如果  $\Delta E^s = 0$ , 表示蓄电池周期始末剩余容量平衡。

### 2.2 日内调度

日内调度为在日前调度基础上的滚动调度, 与日前调度相似, 日内调度同样存在预测误差, 需要应用多场景模拟的方法, 求取日内调度结果的期望值。由于日内调度的预测误差比日前调度小, 所以日内调度结果需要更精确, 相应的出力偏差惩罚也

应与日前调度不同。

### 2.2.1 目标函数

日内调度的目标函数中风电场向电网卖电收益和蓄电池运行成本的公式与日前调度相同，但是风电出力偏差的惩罚费用有所区别，具体描述如下

$$\begin{aligned} \min C_{2nd} = & \sum_{s=1}^{S_{2nd}} p_{pro}^s \sum_{t=1}^{T_{2nd}} [C_{OM}^s(t) + C_{DP}^s(t)] - \\ & \sum_{s=1}^{S_{2nd}} p_{pro}^s \sum_{t=1}^{T_{2nd}} [P_{sell}(t) P_{w,com}^s(t)] + \\ & \sum_{s=1}^{S_{2nd}} p_{pro}^s \sum_{t=1}^{T_{2nd}} [C_{pun}^s(t)] \end{aligned} \quad (18)$$

式中： $S_{2nd}$  表示第二层次日内调度的风电场景总数； $T_{2nd}$  表示第二层次的计算周期；其他变量中的场景  $s$  与时段  $t$  均为第二层次调度，变量释义与第一层次相同。

日内调度的惩罚费用除了日内计算周期内的惩罚外，还应包括之前计划出力的偏差惩罚，如日前调度计划偏差和之前时段的日内调度计划偏差，如下式所示。

$$C_{pun}^s(t) = C_{pun,1st}^s(t) + C_{pun,2nd}^s(t) + \sum_{t'=1}^{\min(t, 4h/\Delta t)} C_{pun,2nd}^s(t-t') \quad (19)$$

式中： $C_{pun,1st}^s(t)$  表示对日前调度计划偏差的惩罚费用； $C_{pun,2nd}^s(t)$  表示对日内调度计划偏差的惩罚费用； $C_{pun,2nd}^s(t-t')$  表示对当前滚动时段  $t$  之前时段的日内调度计划偏差的惩罚费用。日前调度与日内调度的惩罚费用公式如式(20)(21)所示，其中当前滚动时段与之前时段的惩罚费用的公式相同，但其惩罚系数不同。

$$C_{pun,1st}^s(t) = \begin{cases} P_{up,1st}(t) \{ P_{w,com}^s(t) - [P_{w,1st}(t) + \Delta P_{up,1st}(t)] \}, & \text{if } P_{w,com}^s(t) > P_{w,1st}(t) + \Delta P_{up,1st}(t); \\ 0, & \text{if } P_{w,1st}(t) - \Delta P_{down,1st}(t) \leq P_{w,com}^s(t) \leq P_{w,1st}(t) + \Delta P_{up,1st}(t); \\ P_{down,1st}(t) \{ [(P_{w,1st}(t) - \Delta P_{down,1st}(t)) - P_{w,com}^s(t)] \}, & \text{if } P_{w,com}^s(t) < P_{w,1st}(t) - \Delta P_{down,1st}(t) \end{cases} \quad (20)$$

$$C_{pun,2nd}^s(t) = \begin{cases} P_{up,2nd}(t) \{ P_{w,com}^s(t) - [P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}(t)] \}, & \text{if } P_{w,com}^s(t) > P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}(t); \\ 0, & \text{if } P_{w,2nd}(t) - \Delta P_{down,2nd}(t) \leq P_{w,com}^s(t) \leq P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}(t); \\ P_{down,2nd}(t) \{ [P_{w,2nd}(t) - \Delta P_{down,2nd}(t)] - P_{w,com}^s(t) \}, & \text{if } P_{w,com}^s(t) < P_{w,2nd}(t) - \Delta P_{down,2nd}(t) \end{cases} \quad (21)$$

其中： $P_{up,1st}(t)$ 、 $P_{down,1st}(t)$  分别为对日前调度计划偏差的惩罚系数； $P_{up,2nd}(t)$ 、 $P_{down,2nd}(t)$  分别为对日内调度计划偏差的惩罚系数，注意，对当前滚动时段之前时段的惩罚系数会在当前滚动时段惩罚系数的基础上适当减少； $\Delta P_{up,2nd}(t)$ 、 $\Delta P_{down,2nd}(t)$  分别为日内调度的允许偏差范围。

各调度惩罚项之间的关系如图3所示。

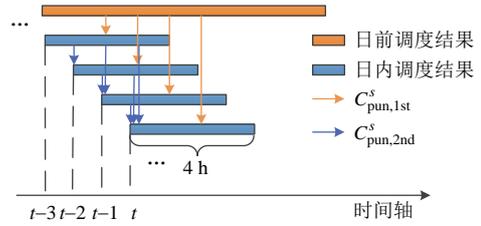


图3 分层调度出力偏差惩罚项关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of relationship of different layers dispatch deviations penalty

由图3可以看出，在  $t$  时段的日内滚动调度计划偏差惩罚，不仅要考虑  $t$  时段的预测出力，还应考虑日前调度计划和  $t$  之前(4 h 内)的日内调度计划结果。

### 2.2.2 约束条件

日内调度的约束条件包括与日前调度相同的式(1)~(5)、式(10)和式(15)(16)，但是没有蓄电池首末剩余容量相同的约束。

### 2.3 实时调度

实时调度为在线调度，根据实际风机出力与日内滚动调度出力进行调整，在调度过程中，除了经济性外，也注重时效性。因此本文实时调度是对前两层调度跟踪，保证风储联合系统出力的波动在调度范围内。具体实时调度策略规则如下。

1) 如果风机实际出力大于风储联合出力的调度波动范围，即  $P_{w,real}(t) > P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}$  (式中下标 real 表示实际值，下同)，则蓄电池充电以消纳超出部分的风电，直到超出充电能力，此时风机降出力。风储联合出力维持在  $P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}$  不变，风机、蓄电池的出力具体公式如下：

$$P_{w,3rd}(t) = \begin{cases} P_{w,real}(t), & \text{if } P_{w,real}(t) - [P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}] < P_{ch,max}(t); \\ P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd} + P_{ch,max}(t), & \text{if } P_{w,real}(t) - [P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}] > P_{ch,max}(t) \end{cases} \quad (22)$$

$$P_{ch,3rd}(t) = \begin{cases} P_{w,real}(t) - [P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}], & \text{if } P_{w,real}(t) - [P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}] < P_{ch,max}(t); \\ P_{ch,max}(t), & \text{if } P_{w,real}(t) - [P_{w,2nd}(t) + \Delta P_{up,2nd}] > P_{ch,max}(t) \end{cases} \quad (23)$$

式中： $P_{w,3rd}(t)$ 、 $P_{ch,3rd}(t)$ 分别为风机在实时调度中的出力 和 蓄电池在实时调度中的充电功率； $P_{ch,max}(t)$ 表示  $t$  时段蓄电池的充电功率上限，影响因素包括充电功率允许最大值和剩余容量，具体在下一节蓄电池分组管理阐述。

2) 如果风机实际出力小于风储联合出力的调度波动范围，即  $P_{w,real}(t) < P_{w,2nd}(t) - \Delta P_{down,2nd}$ ，则蓄电池放电以弥补风电出力不足，直到超出放电能力。风机保持实际最大出力  $P_{w,real}(t)$ ，蓄电池的出力具体公式如下

$$P_{dh,3rd}(t) = \begin{cases} [P_{w,2nd}(t) - \Delta P_{down,2nd}] - P_{w,real}(t), \\ \text{if } [P_{w,2nd}(t) - \Delta P_{down,2nd}] - P_{w,real}(t) < P_{dh,max}(t); \\ P_{dh,max}(t), \\ \text{if } [P_{w,2nd}(t) - \Delta P_{down,2nd}] - P_{w,real}(t) > P_{dh,max}(t). \end{cases} \quad (24)$$

式中： $P_{dh,3rd}(t)$ 为蓄电池在实时调度中的放电功率； $P_{dh,max}(t)$ 表示  $t$  时段蓄电池的放电功率上限。

3) 如果风机实际出力在风储联合出力的调度波动范围内，则风机按照实际出力运行，蓄电池不工作。

### 3 蓄电池分组管理

蓄电池的出力模型与寿命模型在第1节中介绍过，蓄电池分组后，各组蓄电池的模型与之前相似，但是需要增加下标以区分不同蓄电池的组号，具体公式如下：

$$P_{ch,k}(t)U_{ch,k}(t) < P_{ch,k}(t) < \bar{P}_{ch,k}(t)U_{ch,k}(t) \quad (25)$$

$$P_{dh,k}(t)U_{dh,k}(t) < P_{dh,k}(t) < \bar{P}_{dh,k}(t)U_{dh,k}(t) \quad (26)$$

$$U_{dh,k}(t) + U_{ch,k}(t) \leq 1 \quad (27)$$

$$\underline{E}_k \leq E_k(t) \leq \bar{E}_k \quad (28)$$

$$E_k(t) = E_k(t-1)(1 - \sigma_k) - P_{dh,k}(t)\Delta t / \eta_{dh,k} + P_{ch,k}(t)\Delta t\eta_{ch,k} \quad (29)$$

$$E_{loss,k} = \int_{t=0}^T [P_{ch,k}(t) + P_{dh,k}(t)]f_k[S_{OCk}(t)]dt \quad (30)$$

式中，与第1节比较，增加了下标  $k$ ，表示第  $k$  组蓄电池，变量的释义与之前相同，下同。

实时调度中的蓄电池的充放电功率的最大值，除了考虑整体的最大值外，还应考虑蓄电池各组的情况，具体公式如下：

$$P_{ch,max}(t) = \sum_{k=1}^K P_{ch,k,max}(t) = \sum_{k=1}^K \min\left[\frac{\bar{E}_k - E_k(t)}{\Delta t_r \cdot \eta_{ch,k}}, \bar{P}_{ch,k}(t)\right] \quad (31)$$

$$P_{dh,max}(t) = \sum_{k=1}^K P_{dh,k,max}(t) = \sum_{k=1}^K \min\left[\frac{E_k(t) - \underline{E}_k}{\Delta t_r} \eta_{dh,k}, \bar{P}_{dh,k}(t)\right] \quad (32)$$

式中： $K$ 表示蓄电池组的总数； $P_{ch,k,max}(t)$ 、 $P_{dh,k,max}(t)$ 分别为蓄电池组  $k$  在时段  $t$  的最大充电功率和放电功率； $\Delta t_r$ 表示实时调度的时段间隔。

蓄电池分组主要针对风储系统实时调度部分，在得到蓄电池的整体出力后，进行蓄电池的分组优化，优化原则包括：各组蓄电池均衡使用，不能总使用几组电池；剩余容量大的优先放电，剩余容量小的优先充电；在允许条件下，蓄电池的充放电深度应大于  $D_{min}$ 。

为方便对蓄电池进行分组优化，引入3个0、1控制变量：充电标志位  $f_{lag,ch,k}$ 、放电标志位  $f_{lag,dh,k}$  和锁定标志位  $f_{lag,force,k}$ 。 $f_{lag,ch,k}$  为0，表示蓄电池组  $k$  在一个遍历循环内一直处于非充电状态； $f_{lag,ch,k}$  为1，表示蓄电池组  $k$  之前一段时间处于充电状态。 $f_{lag,dh,k}$  的释义类似， $f_{lag,dh,k}$  为0，表示蓄电池组  $k$  在一个遍历循环内一直处于非放电状态； $f_{lag,dh,k}$  为1，表示蓄电池组  $k$  之前一段时间处于放电状态。 $f_{lag,force,k}$  为0，表示蓄电池组  $k$  可以进行充电或放电操作； $f_{lag,force,k}$  为1，表示蓄电池组  $k$  在条件允许下，只能充电( $f_{lag,ch,k}=1$ )或只能放电( $f_{lag,dh,k}=1$ )。

对各标志位的运算规则简述如下： $f_{lag,ch,k}$  在一个遍历循环内如果没有充电则其值为0，如果有过充电操作则其值为1，如果所有蓄电池组的  $f_{lag,ch,k}$  都为1，表明所有蓄电池组都经过了充电过程，则可以将  $f_{lag,force,k}$  为0的蓄电池组的  $f_{lag,ch,k}$  置为0。 $f_{lag,dh,k}$  的控制与  $f_{lag,ch,k}$  相似，不再赘述。蓄电池组的充放电状态发生转换，则  $f_{lag,force,k}$  为1，当蓄电池的充放电深度大于  $D_{min}$ ，则  $f_{lag,force,k}$  置为0。

在经历3层调度后，如果  $P_{ch,3rd}(t) > 0$ ，则需要蓄电池充电，而蓄电池组的充电顺序需要根据蓄电池组的 SOC 状态和之前的充放电状况决定。具体顺序如下：

1) 检测  $f_{lag,force,k}$  和  $f_{lag,ch,k}$ ，如果存在  $f_{lag,force,k}=1 \cap f_{lag,ch,k}=1$  的蓄电池组，则在蓄电池组中按照 SOC 由小到大的顺序进行充电，如果充电满足要求，则结束，否则，进入顺序2)；如果没有  $f_{lag,force,k}=1 \cap f_{lag,ch,k}=1$  的蓄电池组，则进入顺序2)。

2) 检测  $f_{lag,force,k}$  和  $f_{lag,dh,k}$ ，如果存在  $f_{lag,force,k}=0 \cap f_{lag,dh,k}=0$  的蓄电池组，则在蓄电池

组中按照 SOC 由小到大的顺序进行充电，如果充电满足要求，则结束，否则，进入顺序 3)；如果没有  $f_{lag,force,k} = 0 \cap f_{lag,ch,k} = 0$  的蓄电池组，则进入顺序 3)。

3) 检测  $f_{lag,force,k}$  和  $f_{lag,ch,k}$ ，如果存在  $f_{lag,force,k} = 0 \cap f_{lag,ch,k} = 1$  的蓄电池组，则在蓄电池组中按照 SOC 由小到大的顺序进行充电，如果充电满足要求，则结束，否则，进入顺序 4)；如果没有  $f_{lag,force,k} = 0 \cap f_{lag,ch,k} = 0$  的蓄电池组，则进入顺序 4)。

4) 检测  $f_{lag,force,k}$  和  $f_{lag,ch,k}$ ，如果存在  $f_{lag,force,k} = 1 \cap f_{lag,ch,k} = 0$  的蓄电池组，则在蓄电池组中按照 SOC 由小到大的顺序进行充电，如果充电满足要求，则结束，否则，需要弃风；如果没有  $f_{lag,force,k} = 1 \cap f_{lag,ch,k} = 0$  的蓄电池组，则需要弃风，此时的风机出力见式(22)。

如果  $P_{dh,3rd}(t) > 0$ ，则需要蓄电池放电，蓄电池的放电顺序与充电的排序类似，放电顺序分为 4 类，其中各类中的蓄电池组按照 SOC 由大到小的顺序排序，各类放电顺序如下：1)  $f_{lag,force,k} = 1 \cap f_{lag,dh,k} = 1$ ；2)  $f_{lag,force,k} = 0 \cap f_{lag,dh,k} = 0$ ；3)  $f_{lag,force,k} = 0 \cap f_{lag,dh,k} = 1$ ；4)  $f_{lag,force,k} = 1 \cap f_{lag,dh,k} = 0$ 。如果所有蓄电池组都无法满足要求，则需要接收发电偏差的惩罚费用。需要指明，放电顺序并不是充电顺序的逆过程。

以此蓄电池组的充放电顺序进行充放电管理，有以下优点：1) 在充放电的过程中，每隔一段时间，会遍历每个蓄电池组，使得蓄电池组的使用寿命基本相同，为更换蓄电池提供方便，也节省了成本；2) 在条件允许的情况下，蓄电池组的充放电深度都大于  $D_{min}$ ，防止蓄电池组以较浅的充放电深度进行频繁启动，增加了蓄电池的使用寿命；3) 在蓄电池组每类充放电顺序中，按照剩余容量或 SOC 进行排序，使得蓄电池的总体充放电能力保持在较高水平，同时因为蓄电池在 SOC 较高时的寿命损耗较小，会同样增加蓄电池的使用寿命；4) 将蓄电池分组按顺序充放电，避免多个蓄电池组同时以较小功率充放电，增加蓄电池的充放电效率。

表 1 中给出了蓄电池组充放电顺序的简单地示例。表 1 中为描述方便，只提供了 1 号与  $K$  号蓄电池组的标志位为 1，其它蓄电池组的标志位为 0。在此种比较简单的情况下，蓄电池组的充电顺序由 SOC 大小、充电标志位、锁定标志位决定。只有 1 号蓄电池组充电标志位和锁定标志位都为 1，所

**表 1 蓄电池组充放电顺序示例**  
**Tab. 1 Example of battery units charging/ discharging ranks**

组号	SOC 由小到大(组号)	$f_{lag,ch,k}$	$f_{lag,dh,k}$	$f_{lag,force,k}$	充电顺序(组号)	放电顺序(组号)
1	2	1	0	1	1	$K$
2	1	0	0	0	2	$K-1$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$K-1$	$K-1$	0	0	0	$K-1$	2
$K$	$K$	0	1	1	$K$	1

以排在充电顺序的第一位；从 2 号到  $K-1$  号蓄电池组的充电标志位和锁定标志位都为 0，蓄电池组按照 SOC 由小到大的充电顺序排序； $K$  号蓄电池的充电标志位为 0、锁定标志位都为 1，所以排在充电顺序的最后一位。放电顺序的分析与充电顺序类似，不再赘述。

### 4 调度模型求解算法

第一层次日前调度模型和第二层次日内调度模型都为多场景的概率模型，需要模拟不同场景情况。本文利用蒙特卡洛方法进行场景生成，但是生成大量的场景会使计算量过大，而生成场景过少则容易造成过大的误差。本文采用场景削减技术，通过将相似的场景合为一个场景和去掉概率很低的场景，将蒙特卡洛方法生成的大量场景，简化为可以计算的少量场景，在保证信息相对完整的条件下，使得计算更加高效。

在得到有效的场景后，本文应用混合整数线性规划的方法对第一层次与第二层次的模型进行求解。模型中的大部分约束为线性约束，而蓄电池寿命约束可以通过分段线性化的方法进行处理<sup>[21]</sup>。

为保证在线调度的实效性，第三层次实时调度采用启发式算法，而最终蓄电池组的功率分配，则根据蓄电池分组管理的规则进行划分。三层调度的流程图如图 4 所示。

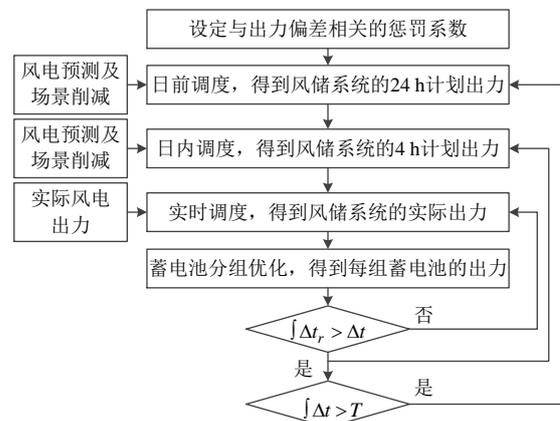


图 4 调度流程图

Fig. 4 Flow chart of dispatch

求解混合整数线性规划问题，目前已有比较成熟的软件(比如 LINGO、CPLEX)，本文使用 CPLEX 对模型进行求解。

## 5 算例分析

### 5.1 算例介绍

选取丹麦的 HORNS REV 监测点于 2014 年 6 月的风电数据作为算例参考，以 20 MW 装机的风电场及 50 MW·h 的蓄电池系统为风储联合系统，进行分层调度计算与分析，其中蓄电池系统由 5 组标准电池组构成，每组蓄电池为 3 MW/10 MW·h<sup>[11]</sup>。蓄电池组的基本参数如表 2 所示。

表 2 蓄电池组基本参数  
Tab. 2 Basic parameters of battery units

参数名称	额定容量/ MW·h	额定功率/ MW	剩余容量 量上限/ MW·h	剩余容量 下限/ MW·h	充电功率 上限/MW	放电功率 上限/MW
参数值	10	3	10	2	3	3
参数名称	充电效率	放电效率	自放 电率	单位容量 安装成本/ 元·kWh <sup>-1</sup>	单位功率 安装成本/ 元·kW <sup>-1</sup>	维护费用/ 元· kWh <sup>-1</sup>
参数值	0.9	0.9	0.001	200	300	0.083 2

风电上网电价采用陆上风电的二类资源区电价：0.52 元/kW·h。风储联合系统出力偏差的惩罚项取为电价的 1.5 倍，偏差范围  $\Delta P_{up,1st}(t)$  为风电场日前上报出力的 20%，偏差范围  $\Delta P_{up,2nd}(t)$  为风电场日内上报出力的 10%。

风电场风力发电的预测出力与实际出力比较如图 5 所示。

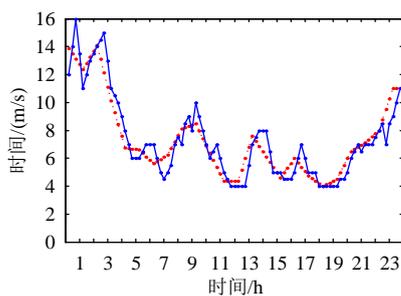


图 5 典型日风力发电预测出力和实际出力

Fig. 5 Forecast and real output of the wind farm in a typical day

本文为模拟风速应用蒙特卡洛方法生成 2000 个场景，而后使用快速前推法削减至 5 个场景。

### 5.2 调度结果与分析

采用多层次优化调度策略，得到的风电场的实际风储临河调度出力如图 6 所示，图中同时给出风电实际出力和风电场日内上报出力。

从图 6 可以看出，风电场的上报出力与风电实

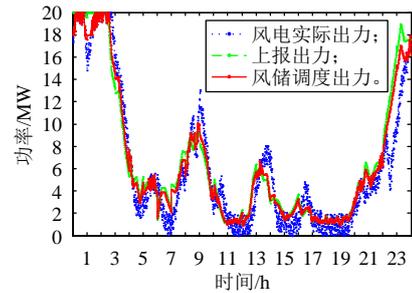


图 6 风电场实际风电出力、上报出力与风储联合调度出力  
Fig. 6 Actual generation output of wind turbine, bidding generation output of wind farms and actual generation output of wind-storage systems

际出力之间存在误差，风储联合系统通过蓄电池的调度，使得风储系统的出力在上报出力的允许波动范围内，达到增加风电出力可调度性的目的。风储系统中蓄电池的出力见图 7。

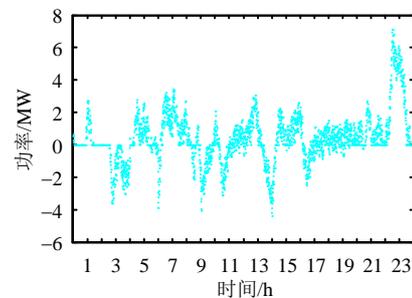


图 7 蓄电池储能系统出力

Fig. 7 Output of battery energy storage system

图 7 中正值表示蓄电池放电，负值表示蓄电池充电。从图 7 可以看出，蓄电池配合风电场出力，使风储联合系统出力在允许波动范围内，而频繁进行充放电操作。

如果不采用本文的蓄电池分组优化，一般蓄电池的总出力由每组蓄电池平均承担，每组蓄电池的出力相同，图 8 以蓄电池组 1 为例，展示蓄电池组的出力与 SOC 情况(假设蓄电池的初始 SOC 为 0.6)。

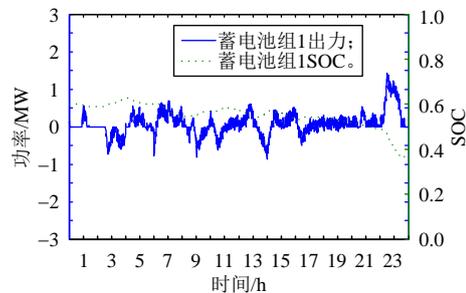


图 8 不分组优化时，蓄电池组 1 的出力与 SOC

Fig. 8 Output and SOC of battery unit 1 without battery units optimization individually

对比图 7 与图 8 可以看出，蓄电池组 1 的出力与图 7 中的蓄电池总出力的充放电操作相同，但是出力值为其五分之一，使得单个蓄电池组会频繁以

小功率充放电, 影响电池的使用寿命。图 7 中同样给出了蓄电池组 1 的 SOC, 由于最后一小时预测误差较大, 蓄电池出力较多, 最终蓄电池组 1 的 SOC 值比初始值低。

采用本文提出的蓄电池组分组优化方法, 则蓄电池各组的出力会进行优化, 避免无序的频繁切换充放电状态, 同样以蓄电池组 1 为例, 图 9 中给出蓄电池组 1 的出力及 SOC。

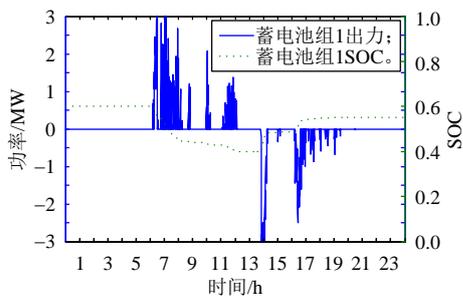


图 9 分组优化时, 蓄电池组 1 的出力与 SOC

Fig. 9 Output and SOC of battery unit 1 with battery units optimization individually

从图 9 中可以看出, 分组优化后的蓄电池组 1 在 0~13 h 处于放电状态, 蓄电池进行放电, 此时蓄电池组 1 的 SOC 减小, 当蓄电池组 1 的放电深度大于  $D_{\min}$  时, 蓄电池处于自由状态, 此后蓄电池组 1 由于 SOC 处于较低状态, 当需要蓄电池充电时, 蓄电池组 1 进入充电状态, 其 SOC 值逐渐增加。对比图 8 与图 9 可知, 蓄电池进行分组优化后, 每组蓄电池的充放电状态避免了频繁切换, 同时充放电的功率较未优化时大, 避免了多组蓄电池小功率充放电, 这对延长蓄电池的使用寿命与提高蓄电池的效率非常重要。

本算例系统中的蓄电池储能系统有 5 组蓄电池, 图 10 展示了 5 组蓄电池优化后的充放电情况。

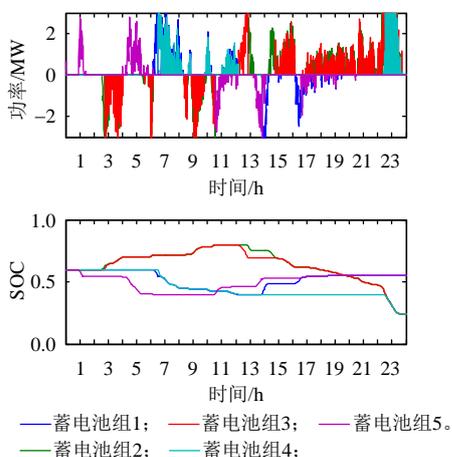


图 10 分组优化时, 各组蓄电池的出力与 SOC

Fig. 10 Output and SOC of each battery units with battery units optimization individually

由图 10 可知, 蓄电池储能系统中的 5 组蓄电池经过优化后, 避免了频繁进行充放电状态的切换, 在充电或放电的深度均大于  $D_{\min}$ , 增加了蓄电池的使用寿命, 同时各组蓄电池的出力均大于图 8 中未优化的蓄电池出力, 避免蓄电池在小功率充放电时的低效率问题。图 10 中显示, 在 24 h 内每组蓄电池都参与到充放电的优化中, 不会出现某些蓄电池一直承担充放电任务, 而另一些蓄电池闲置的情况, 事实上如果将测试周期延长, 每组蓄电池都会遍历充放电过程, 寿命折损几乎相同, 这样可以避免单独更换某组蓄电池, 节省成本, 因为单独更换某组蓄电池的成本较高。在 22 h 前, 所需蓄电池的容量较小, 在充放电深度大于  $D_{\min}$  的条件下, 各组蓄电池的 SOC 控制在相近的程度, 在 23 h, 蓄电池需要更多放电容量, 此时除了充电状态的蓄电池组, 其他蓄电池组均需进行放电, 如果仍满足不了放电要求, 则所有蓄电池组都需进入放电状态。

采用分组优化与不考虑分组优化对蓄电池的成本影响较大, 由于采用分层优化的策略, 蓄电池分组优化对上层调度的成本影响不大, 风电场采用蓄电池分组优化与未优化的经济效益对比如表 3 所示。

蓄电池优化模式	售电收益	蓄电池费用	惩罚费用	总收益
未分组优化	8.36	1.40	0.57	6.39
分组优化	8.36	1.13	0.57	6.66

表 3 中的蓄电池费用包括维护费用与折旧费用, 由于本文算例为日调度, 所以不计蓄电池更换费用, 事实上, 本文的分组优化管理方法会使更换费用更低。

从表 3 可以看出, 与未分组优化相比, 分组优化后, 风电场的蓄电池费用降低了 0.27 万元, 风电场总收益增加 4%。这是因为蓄电池分组优化后, 蓄电池运行在效率更高的状态中, 效果比较明显。

## 6 结论

本文提出了风储联合系统多层次优化调度策略, 建立了多层次优化调度模型。三层调度分别对应日前调度、日内调度与实时调度, 本文分别对三层的调度模型进行构建, 并确定三层调度之间的关系。

蓄电池储能系统是风储系统调度中的最重要部分, 本文建立了较完善的蓄电池模型, 使得统计

蓄电池使用寿命时更加准确,有利于提高风储系统优化调度的模型的准确性。

本文采用蓄电池分组优化的策略,对蓄电池储能系统进行分组管理,使得各组蓄电池的运行效率更高,寿命折损费用与更换费用等更低。

## 参考文献

- [1] Lu M S, Chang C L, Lee W J, et al. Combining the wind power generation system with energy storage equipment[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(6): 2109-2115.
- [2] GB/T 19963—2011. 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
- [3] Mendis N, Muttaqi K M, Perera S. Management of low- and high-frequency power components in demand-generation fluctuations of a DFIG-based wind-dominated raps system using hybrid energy storage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 2258-2268.
- [4] Zou J, Peng C, Shi J, et al. State-of-charge optimising control approach of battery energy storage system for wind farm[J]. IET Renewable Power Generation, 2015(9): 647-652.
- [5] Ding H, Hu Z, Song Y. Rolling optimization of wind farm and energy storage system in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014(30): 1-9.
- [6] Dicorato M, Forte G, Pisani M, et al. Planning and operating combined wind-storage system in electricity market[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 209-217.
- [7] 李丹, 刘俊勇, 刘友波, 等. 考虑风储参与的电力市场联动博弈分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1001-1007.  
Li Dan, Liu Junyong, Liu Youbo, et al. Analysis on electricity market linkage game considering participation of wind power and energy storage[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1001-1007(in Chinese).
- [8] Wen S, Lan H, Fu Q, et al. Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30: 644-652.
- [9] 管晟超, 程浩忠, 杨堤, 等. 基于风速预测的风储电压质量调节系统[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1341-1347.  
Guan Shengchao, Cheng Haozhong, Yang Di, et al. Voltage quality regulation with hybrid energy storage based on wind speed forecast in wind power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1341-1347(in Chinese).
- [10] 闫鹤鸣, 李相俊, 麻秀范, 等. 基于超短期风电预测功率的储能系统跟踪风电计划出力控制方法[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 432-439.  
Yan Heming, Li Xiangjun, Ma Xiufan, et al. Wind power output schedule tracking control method of energy storage system based on ultra-short term wind power prediction[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 432-439(in Chinese).
- [11] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10-17.  
Wu Xiong, Wang Xiuli, Li Jun, et al. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 10-17(in Chinese).
- [12] 杨家豪, 欧阳森, 吴裕生, 等. 计及风-储联合系统概率模型的配电网随机潮流[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 234-241.  
Yang Jiahao, Ouyang Sen, Wu Yusheng, et al. Stochastic power flow of distribution network considering probability model of wind-storage combined systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 234-241(in Chinese).
- [13] 陆秋瑜, 胡伟, 闵勇, 等. 考虑时间相关性的风储系统多模式协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 6-12.  
Lu Qiuyu, Hu Wei, Min Yong, et al. A multi-pattern coordinated optimization strategy of wind power and energy storage system considering temporal dependence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 6-12(in Chinese).
- [14] 石涛, 张斌, 晁勤, 等. 兼顾平抑风电波动和补偿预测误差的混合储能容量经济配比与优化控制[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 477-483.  
Shi Tao, Zhang Bin, Chao Qin, et al. Economic storage ratio and optimal control of hybrid energy capacity combining stabilized wind power fluctuations with compensated predictive errors[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 477-483(in Chinese).
- [15] 栗然, 党磊, 董哲, 等. 分时电价与风储联合调度协调优化的主从博弈模型[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3247-3253.  
Li Ran, Dang Lei, Dong Zhe, et al. Coordinated optimization of time-of-use price and dispatching model combining wind power and energy storage under guidance of master-slave game[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3247-3253(in Chinese).
- [16] Schaltz E, Khaligh A, Rasmussen P O. Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 3882-3891.
- [17] Vrettos E I, Papathanassiou S A. Operating policy and optimal sizing of a high penetration RES-BESS system for small isolated grids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 744-756.
- [18] Tankari M A, Camara M B, Dakyo B, et al. Use of ultracapacitors and batteries for efficient energy management in wind - diesel hybrid system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 414-424.
- [19] Department of Energy Technology. Accelerated life testing and life prediction of lithiumion batteries connected to wind turbine[EB/OL]. [2011-5-31].
- [20] Jenkins D P, Fletcher J, Kane D. Lifetime prediction and sizing of lead-acid batteries for microgeneration storage applications[J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(3): 191-200.
- [21] 刘春阳, 王秀丽, 刘世民, 等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 29-36.  
Liu Chunyang, Wang Xiuli, Liu Shimin, et al. Research on economic operation model of microgrids considering lifetime of batteries[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 29-36(in Chinese).



刘春阳

收稿日期: 2016-02-13。

作者简介:

刘春阳(1989), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行和规划, E-mail: 790868608@qq.com;

王秀丽(1961), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划和电力市场, E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 王晔)