

DOI: 10.7667/PSPC161442

# 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源—荷—储” 协调互动优化调度策略

许汉平<sup>1</sup>, 李姚旺<sup>2</sup>, 苗世洪<sup>2</sup>, 罗纯坚<sup>1</sup>, 徐秋实<sup>1</sup>

(1. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为了提升可再生能源消纳率, 降低电力系统运行成本, 考虑以“源—荷—储”协调互动作为提升系统运行经济性与消纳可再生能源的手段。将常规机组、储能装置与负荷侧调度资源同时进行优化调度, 综合考虑系统常规机组运行成本、负荷侧调度成本和可再生能源消纳效益, 建立了基于“源—荷—储”协调互动的电力系统优化调度模型。根据决策变量的不同特性, 提出了一种两级优化方法。第一阶段采用离散粒子群算法优化常规机组启停成本、弃风弃光成本和负荷调度成本; 第二阶段采用双层连续粒子群算法优化常规机组燃料成本。通过算例仿真验证了该优化调度模型的有效性。

**关键词:** “源—荷—储”协调互动; 需求响应; 粒子群算法; 优化调度

## Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system

XU Hanping<sup>1</sup>, LI Yaowang<sup>2</sup>, MIAO Shihong<sup>2</sup>, LUO Chunjian<sup>1</sup>, XU Qiushi<sup>1</sup>

(1. State Grid HBEPC Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to increase the accommodation rate of renewable energy and cut the system operation cost, this paper takes “source-load-energy storage” coordination as an important mean to improve the system operation economy and the accommodation rate of renewable energy. Then, an optimization dispatch model based on “source-load-energy storage” coordination which considers thermal units, energy storage device and demand response as dispatching resources is established. The objective of this model including the operation costs of thermal units, the costs of demand response and the benefits from renewable energy consumption. Based on the different characteristics of the decision variables, a two-stage optimal algorithm is proposed. The first stage algorithm uses binary particle swarm optimization algorithm to minimize the start costs of thermal units, costs of wind power and photovoltaic curtailment and costs of demand response; the second stage uses double layer continuous particle swarm optimization algorithm to minimize the fuel costs of thermal units. The simulation results verify the validity of the proposed optimization dispatch strategy.

**Key words:** “source-load-energy storage” coordination; demand response; particle swarm optimization algorithm; optimization dispatch

## 0 引言

风电和光伏作为可再生能源的代表, 具有无污染和可持续等诸多优点, 发展前景广阔, 但其出力具有间歇性、波动性和随机性等特点, 给电网优化

调度带来一定挑战<sup>[1-4]</sup>。国内外学者已对含风电或光伏电力系统的优化调度问题进行了大量的研究。文献[5]提出了一种通过需求侧响应技术对风电进行消纳的优化调度策略, 降低了系统运行成本。文献[6]研究了高载能负荷的调度特性, 建立了一种计及风电消纳效益的电力系统源荷协调二层优化模型, 并采用混合智能算法对该模型进行了求解。文献[7]

在考虑了电网安全约束的基础上建立了应对风电消纳的需求响应优化调度策略, 该策略能够较好地应对风电的波动特性。文献[8]以风光储总出力曲线与给定的计划出力曲线的余弦相似度为目标函数, 提出了基于随机机会规划的储能优化控制方法, 该方法能够使储能装置配合风光混合系统出力, 使风光储混合出力能够有效跟随计划出力。目前, 针对含风电和光伏电力系统的优化调度策略, 国内外学者主要从源-荷互动和储能装置配合风光出力的角度进行研究, 通过对柔性负荷的调控或调度储能装置充放电功率来适应可再生能源的大规模接入<sup>[9-12]</sup>。

随着储能技术的不断完善及需求侧响应技术的不断发展, 未来电力系统中常规机组、负荷侧调度资源和储能装置可能同时作为系统调度资源。应充分考虑多种调度资源的调度特性, 从整体的角度给出电力系统优化调度方案, 实现“源—荷—储”协调互动, 达到系统资源的最大化利用。目前, 国内外已有学者对基于“源—荷—储”协调互动的电力系统优化调度模型进行了一定研究。文献[13]以常规机组运行成本和污染物排放成本最小为优化目标, 建立了基于“源—网—荷—储”协调的电力系统优化调度模型, 但该模型仅考虑风电与光伏全消纳情况, “荷”与“储”只是作为降低常规机组运行成本的手段, 而并未考虑可再生能源渗透率较高和出现弃风弃光现象的情况, 其对风电与光伏消纳率的提升作用并不十分明显。文献[14]考虑了风电在日前和超短期两个时间尺度下预测精度的不同, 提出了基于需求响应技术和储能技术的两阶段优化调度策略, 该策略主要在日前调度阶段处理弃风的问题, 而在日前时间尺度基本未考虑风电消纳问题, 因此, 其日前优化调度策略仍有可完善之处。

在已有研究的基础上, 本文将首先分析高耗能、高自动化负荷和电池储能系统的调度特性, 并在此基础上, 考虑负荷侧调度资源、储能设备和常规机组相间的协调配合, 建立基于“源—荷—储”协调互动的电力系统优化模型, 模型中定义了风电与光伏出力上最大预测误差系数和下最大预测误差系数, 并在目标函数中考虑了可再生能源消纳效益。最后, 提出了一种可以求解该优化模型的两级优化方法, 并结合具体算例验证了基于“源—荷—储”协调互动的优化调度策略的优越性。

## 1 互动资源调度特性分析与建模

### 1.1 激励型需求侧响应

激励型需求侧响应是直接采用奖励方式来激励和诱导用户参与的负荷削减项目<sup>[15-17]</sup>。其目前通

常仅在系统发生较为紧急的情况下才会使用, 但是, 随着柔性负荷比例的提升, 尤其是具有能够快速投切、高自动化、高载能工业负荷的增加, 使得负荷通过与电网公司签订协议参与电网优化调度的途径成为可能。对于具有上述特性的工业负荷而言, 由于其具有能耗高、工作时间灵活的特点<sup>[18]</sup>, 采用的激励型需求响应调度模式可以为: 通过负荷控制中心向签订协议的工业用户发出调度指令, 调配用户的负荷转移量, 并向用户提供相应的补偿。

图1为该类型工业负荷参与调度的示意图。调度后, 时段12—时段14的负荷转移至时段1—时段3。由此可见, 该类型负荷具有灵活的调节能力, 是避免系统发生弃风弃光的重要调节手段<sup>[6]</sup>。

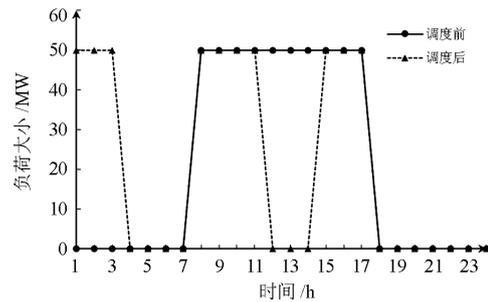


图1 调度前后某高载能工业负荷出力曲线

Fig. 1 Output curve of high energy industrial load before and after dispatch

为简化计算, 考虑用户只有执行负荷增加、执行负荷削减或不响应3种状态, 负荷转移大小取固定值, 用户的赔付函数选取固定值进行描述<sup>[19]</sup>。负荷的调度成本为

$$Cost = \sum_{t=1}^T |\rho U^1(t) P_1 \Delta t| \quad (1)$$

式中:  $Cost$  表示负荷调度成本;  $\rho$  表示用户的单位补偿成本;  $U^1(t)$  表示用户在第  $t$  时段的响应状态, 若执行负荷增加, 则  $U^1(t)=1$ , 若执行负荷削减, 则  $U^1(t)=-1$ , 不执行, 则  $U^1(t)=0$ ;  $P_1$  表示负荷转移大小;  $\Delta t$  表示一个调度时段的时长。

为了保证工业用户的正常生产, 负荷控制中心不能够削减或增加负荷, 只能使负荷转移, 因此, 引入负荷转移量平衡约束。

#### 1) 负荷转移量平衡约束

$$\sum_{t=1}^T U^1(t) = 0 \quad (2)$$

工业用户可供灵活调整负荷容量有限, 因此, 引入最大响应容量约束。

#### 2) 最大响应容量约束

$$\sum_{t=1}^T \max(U^1(t), 0) P_1 \Delta t \leq q_1 \quad (3)$$

式中,  $q_1$  表示用户的最大响应容量约束。

## 1.2 储能装置

随着电池储能技术的不断完善, 电池储能装置的应用将会更加普及, 其将会成为未来电网优化调度的重要资源之一。

对储能装置进行日前优化调度需要满足如下约束条件<sup>[8]</sup>。

### 1) 储能装置最大充放电功率约束

$$P_{S,\min} \leq P_S(t) \leq P_{S,\max} \quad (4)$$

式中:  $P_S(t)$  表示储能装置在第  $t$  时段的出力大小, 充电时  $P_S < 0$ , 放电时  $P_S > 0$ ;  $P_{S,\max}$  和  $P_{S,\min}$  ( $P_{S,\min} < 0$ ) 分别表示储能装置的最大放电功率和最大充电功率。

### 2) 储能装置荷电状态约束

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (5)$$

式中:  $SOC(t)$  表示储能装置在第  $t$  时段的荷电状态;  $SOC_{\min}$  和  $SOC_{\max}$  分别表示储能装置荷电状态的上下限。

为了延长储能设备的使用寿命, 需要使整个调度周期内储能系统的能量平衡, 引入储能装置充放电平衡约束。

### 3) 储能装置充放电平衡约束

$$\sum_{t=1}^T P_S(t) = 0 \quad (6)$$

## 2 基于“源—荷—储”协调互动的电力系统优化调度模型

### 2.1 目标函数

系统优化调度模型以降低系统运行成本和提升可再生能源(本文主要考虑风电和光伏)消纳效益为目标。系统运行成本包括常规机组发电成本、激励型需求响应负荷调度成本。

#### 1) 常规机组发电成本<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} [f_i(P_{Gi}(t)) \cdot U_i(t) + S_i(t) \cdot (1 - U_i(t-1)) \cdot U_i(t)] \\ f_i(P_{Gi}(t)) = a_i \cdot P_{Gi}(t)^2 + b_i \cdot P_{Gi}(t) + c_i \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $F_1$  表示常规机组运行成本;  $N_G$  表示常规机组总台数;  $f_i$  表示常规机组  $i$  的运行成本;  $P_{Gi}$  表示常规机组  $i$  的输出功率;  $S_i$  表示常规机组  $i$  的开机成本;  $U_i(t)$  及  $U_i(t-1)$  分别表示常规机组  $i$  的当前时刻与前一时刻的启停状态, 若机组为开机状态

$U_i(t) = 1$ , 反之  $U_i(t) = 0$ ;  $a_i$ ,  $b_i$  及  $c_i$  表示常规机组  $i$  的运行费用参数。

#### 2) 激励型需求侧响应负荷调度成本

$$F_2 = Cost \quad (8)$$

#### 3) 可再生能源消纳效益

在实际系统中, 可再生能源消纳率越高, 则常规机组的出力越小, 其不但减少了化石燃料的消耗, 还具有显著的环境效益。因此, 可再生能源消纳效益与风电与光伏最大可消纳发电量成正相关, 表示为式(9)。

$$R = r \sum_{t=1}^T P_{WS}(t) \Delta t \quad (9)$$

式中:  $R$  表示可再生能源消纳效益;  $r$  表示可再生能源单位消纳效益;  $P_{WS}(t)$  表示第  $t$  时段风电与光伏最大可消纳出力。

然而, 在本文提出的优化问题中, 系统运行成本目标为极小化目标, 而可再生能源消纳效益目标为极大化目标; 因此, 需要对目标进行转换处理。本文采用将可再生能源消纳效益转换成弃风弃光成本的方式将可再生能源消纳效益极大化问题转换为弃风弃光成本极小化问题。弃风弃光电量与风电与光伏最大可消纳出力间的关系为

$$q_{WS,cur}(t) = [P_{WS}^{high}(t) - P_{WS}(t)] \Delta t \quad (10)$$

式中:  $q_{WS,cur}(t)$  表示第  $t$  时段弃风弃光量;  $P_{WS}^{high}(t)$  表示第  $t$  时段风电与光伏出力上限; 假设  $P_{WS,fore}(t)$  表示第  $t$  时段风电与光伏的预测出力;  $P_{WS}^{high}(t)$  和  $P_{WS,fore}(t)$  间的关系可以表示为

$$P_{WS}^{high}(t) = k^{high} P_{WS,fore}(t) \quad (11)$$

式中,  $k^{high}$  定义为风电与光伏出力上最大预测误差系数,  $k^{high} \geq 1$ ,  $k^{high}$  即越接近 1 表示预测精度越高。

因此, 弃风弃光成本定义为

$$F_3 = \sum_{t=1}^T \lambda q_{WS,cur}(t) \quad (12)$$

式中,  $\lambda$  表示单位弃风弃光成本。

综上所述, 优化调度模型的目标函数为

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (13)$$

式中,  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  分别表示常规机组发电成本、激励型需求侧响应负荷调度成本和弃风弃光成本。

### 2.2 约束条件

约束条件分为系统约束, 常规机组约束, 激励型需求侧响应负荷侧约束和储能装置约束。

#### 1) 系统约束

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i}(t) + \min[P_{WS,fore}(t), P_{WS}(t)] + P_S(t) = P_L(t) + U^l(t)P_1 \\ \sum_{i=1}^{N_G} U_i(t)P_{G_i,max} + P_{S,max} + P_{WS}^{low}(t) \geq (l+1) \times P_L(t) + U^l(t)P_1 \\ \sum_{i=1}^{N_G} U_i(t)P_{G_i,min} + P_{S,min} + P_{WS}(t) \leq P_L(t) + U^l(t)P_1 \end{cases} \quad (14)$$

$$P_{WS}^{low}(t) = k^{low} P_{WS,fore}(t) \quad (15)$$

式中: 从上到下分别为系统负荷平衡约束、系统正旋转备用约束和系统负旋转备用约束;  $P_{WS}^{low}(t)$  表示第  $t$  时段风电与光伏的出力下限,  $P_{WS}^{low}(t)$  和  $P_{WS,fore}(t)$  的关系如式(13)所示;  $k^{low}$  定义为风电与光伏出力下最大预测误差系数,  $0 \leq k^{low} \leq 1$ ,  $k^{low}$  越接近 1 表示预测精度越高。由式(12)可以看出, 为了保证不失负荷, 正旋转备用约束必须满足, 但当可再生能源渗透率较大时, 无法保证风电与光伏的全消纳, 因此在负旋转备用约束中, 可再生能源出力选用  $P_{WS}(t)$  而不是  $P_{WS}^{high}(t)$ , 则  $P_{WS}^{high}(t) - P_{WS}(t)$  的部分就是第  $t$  时段潜在弃风量。由上述关系易知:

$$0 \leq P_{WS}(t) \leq P_{WS}^{high}(t)。$$

## 2) 常规机组约束<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} P_{G_i,min} \leq P_{G_i}(t) \leq P_{G_i,max} \\ P_{G_i}(t) - P_{G_i}(t-1) \leq r_{ui} \Delta t \\ P_{G_i}(t-1) - P_{G_i}(t) \leq r_{di} \Delta t \\ T_i^{on}(t) \geq T_{i,min}^{on} \\ T_i^{off}(t) \geq T_{i,min}^{off} \end{cases} \quad (16)$$

式中: 从上到下分别表示常规机组出力约束、爬坡约束、最小持续运行时间约束和最小持续停运时间约束;  $P_{G_i}(t)$  表示第  $t$  时段常规机组出力;  $P_{G_i,max}$  和  $P_{G_i,min}$  分别表示常规机组的最大最小出力;  $r_{ui}$  和  $r_{di}$  分别表示常规机组  $i$  功率上升最大速率和下降最大速率;  $T_i^{on}(t)$  和  $T_i^{off}(t)$  分别表示常规机组  $i$  在第  $t$  时段连续运行时间和连续停运时间;  $T_{i,min}^{on}$  和  $T_{i,min}^{off}$  分别表示常规机组  $i$  允许的最小持续运行时间和最小持续停运时间约束。

激励型需求侧响应负荷侧约束如式(2)和式(3)所示; 储能装置约束如式(4)、式(5)和式(6)所示。

## 3 模型求解

由于本优化模型中的决策变量同时包括整型变量和连续型变量, 且优化过程具有可以分步进行的特性, 本文提出了一种两级优化方法对该优化模型进行求解。

第一阶段采用离散粒子群算法优化常规机组启停成本、弃风弃光成本和负荷调度成本; 在第一阶段的求解结果基础上, 第二阶段采用双层连续粒子群算法优化常规机组燃料成本。

### 3.1 第一阶段优化

本优化调度问题的决策变量为: 常规机组运行状态、常规机组出力、需求响应状态和储能系统出力。其中, 常规机组出力需要在已知常规机组运行状态的基础上进行, 且由式(12)可知, 常规机组运行状态是决定系统弃风弃光大小的重要因素, 因此, 第一阶段优化的主要优化变量为常规机组运行状态, 选用离散粒子群算法作为第一阶段优化算法。

根据第一阶段优化的求解目标, 采用分时段优化法<sup>[20]</sup>, 粒子位置矢量的表达式为

$$\mathbf{x}_1 = [U_1(t) \ U_2(t) \ \cdots \ U_{N_G}(t)] \quad (17)$$

该矩阵是一个  $1 \times N_G$  的矩阵。

当常规机组无法提供足够的负旋转备用来应对风电与光伏出力增加时, 需要安排储能装置和需求响应吸收多余的电能, 降低系统的弃风弃光成本, 因此, 在第一阶段优化中, 若某时刻出现弃风弃光, 首先安排储能装置在该时刻充电(由于不计储能装置运行成本), 剩余的电能则安排需求响应进行消纳。其他时段的储能装置出力和需求响应状态则由第二阶段优化确定。储能装置在出现弃风弃光时的充电功率可以表示为

$$P_S(t) = -\max[\min(\sum_{i=1}^{N_G} U_i(t)P_{G_i,min} + P_{WS}^{high}(t) - P_L(t), |P_{S,min}|), 0] \quad (18)$$

当两次弃风弃光发生的时间间隔较短, 且弃风弃光量较大时, 会造成储能装置荷电状态约束越限, 储能装置充电功率将由式(19)进行修正。

$$\begin{cases} P_S(t) = \frac{1}{T_c} (SOC_{c,min} - SOC_{max}) \\ SOC_{c,min} = \max(SOC_{max} - T_n P_{S,max} \Delta t, SOC_{min}) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $T_c$  表示发生弃风弃光的持续时长;  $SOC_{c,min}$  表示实际最小荷电状态;  $T_n$  表示发生两次弃风弃光之间的间隔时长。

若储能装置的充电量无法完全吸收弃风弃光量, 则将这些时段按照剩余弃风弃光量从大到小的顺序进行排列, 并在这些时段依次安排签订协议的工业负荷进行生产, 以吸收剩余电量, 直到不满足最大响应容量约束。

综上所述, 系统弃风弃光量可以表示为

$$\Delta P_{ws}(t) = \max \left\{ \left[ \sum_{i=1}^{N_G} U_i(t) P_{G_i, \min} + P_{ws}^{\text{high}}(t) + P_S(t) - P_L(t) - U^1(t) P^1 \right], 0 \right\} \quad (20)$$

式中,  $\Delta P_{ws}(t)$  表示系统潜在弃风弃光量, 即  $\Delta P_{ws}(t)$  为  $P_{ws}^{\text{high}}(t)$  和  $P_{ws}(t)$  之差。

通常情况下, 用户的单位补偿成本远大于常规机组运行成本, 因此, 当第一阶段优化确定负荷转移总量后(若负荷响应容量还有剩余), 第二阶段优化不会再增加负荷转移总量, 受负荷转移量平衡约束的限制, 系统负荷调度成本可以表示为

$$F_2 = 2T_1\rho \quad (21)$$

式中,  $T_1$  表示发生负荷转移的总时段数。以图 1 中的情况为例, 在图 1 所示的情况下  $T_1=3$ 。

### 3.2 第二阶段优化

在第一阶段优化结果的基础上, 第二阶段优化常规机组出力、储能装置放电功率和剩余时段的需求响应状态。本阶段采用双层连续粒子群算法求解。第一层用于确定储能装置放电功率和剩余时段的需求响应状态; 第二层用于确定常规机组输出功率。

根据第一阶段的求解结果, 可以确定部分时段需求响应的响应状态为 1 或 0, 对剩余需求响应状态进行松弛处理, 粒子位置矢量的表达式为

$$\mathbf{x}_2 = [U^1(1) \cdots U^1(T_{1,s2}) P_S(1) \cdots P_S(T_{S,s2})] \quad (22)$$

该矩阵是一个  $1 \times (T_{1,s2} + T_{S,s2})$  的矩阵, 前  $T_{1,s2}$  个元素为需求响应状态, 后  $T_{S,s2}$  个元素为储能充放电功率。式中,  $T_{1,s2}$  和  $T_{S,s2}$  分别表示第二阶段优化需要确定的需求响应状态时段数和储能装置放电时段数。 $T_{1,s2}$  等于调度前用户用电时段数与调度后用户不需要转移的时段数之差。以图 1 中的情况为例, 假设第一阶段优化要求时段 1~3, 8~9 用电, 以吸收剩余电能, 则调度后用户不需要转移的时段数为 2, 而调度前用户用电时段数为 10, 则在图 1 所示情况下  $T_{1,s2}=8$ 。经过松弛后,  $-1 \leq U^1 \leq 0$ , 通过罚函数使  $U^1$  在迭代过程中趋近于 -1 或 0。

采用修正法处理负荷转移量平衡约束, 修正表达式为

$$\begin{cases} \min[U^1(1), \dots, U^1(T_{1,s2})] = 0 & \text{if } \sum_{t=1}^{T_{1,s2}} |U^1(t)| > T_1 \\ \max[U^1(1), \dots, U^1(T_{1,s2})] = -1 & \text{if } \sum_{t=1}^{T_{1,s2}} |U^1(t)| < T_1 \end{cases} \quad (23)$$

重复执行式(21), 直到约束条件被满足。需要说明的是式(21)中激励型需求响应的响应状态已进行松弛。

储能装置荷电状态约束和最大充放电功率可以

采用修正公式(24)处理。

$$\begin{cases} P_S(t) \geq \max(P_{S,\min}, \frac{SOC(t-1) - SOC_{\max}}{\Delta t}) \\ P_S(t) \leq \min(P_{S,\max}, \frac{SOC(t-1) - SOC_{\min}}{\Delta t}) \end{cases} \quad (24)$$

内层优化属于负荷经济调度问题, 现有文献已经提出许多基于连续粒子群算法求解该问题行之有效的方法<sup>[17-18]</sup>。当内层连续粒子群算法完成迭代后, 外层算法基于内层算法的优化结果更新粒子位置和速度, 直到达到迭代次数, 输出最优值。

## 4 算例分析

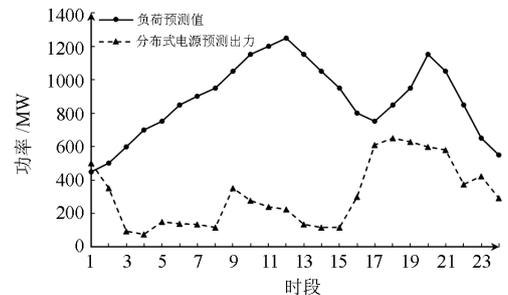
### 4.1 算例简介

本文选取一个含有风电场和光伏电站的10机系统作为算例进行仿真分析。此外, 假设系统内含有 1 座集中电池储能电站, 并有一家工业企业通过签订协议参与系统优化调度。

10 台常规机组的运行数据参见文献[21]。设一个调度周期设为 24 h, 每一个调度时段设为 1 h。调度前, 系统 24 h 负荷预测曲线和风电光伏总出力预测曲线如图 2 所示<sup>[5]</sup>。单位弃风弃光成本设为 350 元/MWh<sup>[6]</sup>, 表 1 列出了储能装置的调度参数。用户单位补偿成本为 200 元/MWh, 最大响应容量为 500 MWh, 负荷转移大小为 50 MWh, 调度前各时段该工业负荷出力曲线如图 1 中“调度前”情况所示。

表 1 储能装置调度参数

最大充电功率/MW	最大放电功率/MW	最大荷电状态/MWh	最小荷电状态/MWh	初始荷电状态/MWh
-20	20	55	5	10



错误!

图 2 各时段负荷及风光出力曲线

Fig. 2 Curve of system load, wind power and photovoltaic output

离散粒子群算法的初始种群大小为 50, 最大迭代次数为 100 次。外层连续粒子群算法和内层连续粒子群算法的初始种群大小均为 30, 最大迭代次数均为 50 次。采用线性惯性权重,  $w_{\max} = 0.9$ ,

$w_{\min} = 0.5$ ; 加速因子  $c_1=c_2=1.496$ 。本文采用 Matlab 2010b 实现该求解算法。

#### 4.2 算例简介

本文假设了 3 种运行场景。场景 1: 系统调度资源仅考虑常规火电机组; 场景 2: 系统调度资源考虑常规火电机组和储能装置; 场景 3: 系统调度资源包括常规火电机组、储能装置和负荷侧调度资源。假设风电与光伏出力上最大预测误差系数和下最大预测误差系数为 1.3 和 0.7。

采用本文提出的两级优化算法对模型进行求解, 求得各场景下的系统各项运行费用如表 2 所示, 各场景下系统各时段弃风弃光情况如图 3 所示。

表 2 不同场景下的系统运行费用

Table 2 Costs in different scenarios

情况	启停成本/元	燃料成本/元	弃风成本/元	需求响应成本/元	总成本/元
场景 1	128 280	2 114 729	147 333	—	2 390 342
场景 2	117 900	2 074 213	118 528	—	2 310 641
场景 3	96 030	2 012 157	77 578	30 000	2 216 465

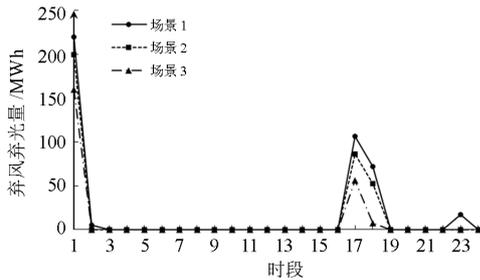


图 3 系统各时段弃风弃光量

Fig. 3 Energy loss of wind power and photovoltaic curtailment on each period

由表 2 和图 3 可知, 当储能装置和负荷侧调度资源参与系统优化调度后, 系统弃风量和系统弃风成本有较为显著的下降; 此外, 受风电“反调峰”特性和负荷转移量平衡约束影响, 为了消纳更多的风电出力, 系统负荷具有削峰填谷的趋势, 且能够代替经济性较差的机组出力, 常规机组的运行成本在一定程度上有所下降。

图 4 中展示了在场景 3 中, 考虑不同风电与光伏出力上最大预测误差系数和下最大预测误差系数, 系统各时段弃风弃光量的大小。

由图 4 可知, 在该调度策略下, 风电与光伏出力的不同预测精度会对系统弃风弃光量带来较大程度的影响; 预测精度越高, 系统弃风弃光量就会越低。

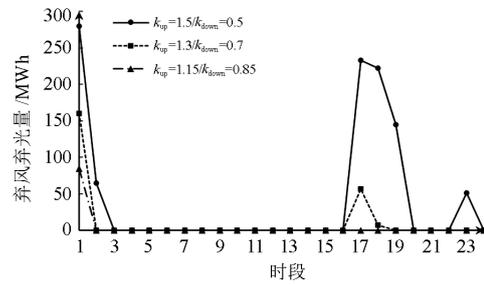


图 4 不同预测误差下各时段系统弃风弃光量

Fig. 4 Energy loss of wind power and photovoltaic curtailment under different forecast accuracy

表 3 列出了场景 3 中发生弃风弃光时段储能装置充电量和工业负荷用电量, 以及除去储能装置与负荷侧调度资源消纳电量外, 场景 3 的弃风弃光量与场景 1 的弃风弃光量的对比情况(电量单位为 MWh)。

表 3 弃风弃光量及发生弃风弃光时储能装置和工业负荷出力情况

Table 3 Energy loss and power consumption of energy storage device and DR

发生弃风弃光的时段	1	2	17	18	23
场景 1 下的弃风弃光量	220.00	5.00	106.44	72.21	17.30
场景 3 下的原始弃风弃光量	230.00	5.00	126.44	77.21	17.30
储能装置充电量	20.00	5.00	20.00	20.00	17.30
工业负荷用电量	50.00	0	50.00	50.00	0

由表 3 可以看出, 在某些时段, 场景 3 下的原始弃风弃光量反而大于场景 1 的弃风弃光大小。以时段 1 为例分析该现象的产生原因, 表 4 列出了场景 1 和场景 3 下各机组在时段 1 的启停情况和旋转备用情况。

表 4 时段 1 下机组启停及旋转备用情况

Table 4 On/off state of thermal units and spinning reserve capacity in period 1

场景编号	机组启停情况	正旋转备用容量/MW	正旋转备用容量下/MW	机组最小出力/MW	风光最大出力/MW
1	0000100000	162	145	20	430
3	0001000100	205	195	30	420

综合表 3 和表 4 可知, 将工业负荷用电量调整到时段 1 后, 有利于吸收系统多余的风电和光伏发电量, 但相应地也会增加系统的正旋转备用需求, 从而在一定程度上削弱消纳系统剩余电量的能力,

而储能装置由于不需要系统提供额外的正旋转备用容量,则不会出现类似的问题,因此,若增大储能装置的充电功率和容量,即可以实现系统风电和光伏的全消纳。

## 5 结论

本文建立了基于“源—荷—储”协调互动的电力系统日前优化调度模型。模型中考虑了高载能、高自动化工业负荷和电池储能装置的调度特性,以常规机组、储能装置和激励型需求响应作为调度资源进行优化调度,并在目标函数中考虑了可再生能源的消纳效益。在可再生能源出力较大且系统负荷低谷时段,安排签订协约的工业负荷出力和储能装置充电,吸收系统多余电能,减小弃风弃光成本。算例结果表明,本文提出的优化调度模型提高了系统运行经济性和可再生能源的消纳水平。

## 参考文献

- [1] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源—网—荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6.  
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
- [2] PILO F, PISANO G, SOMA G G. Advanced DMS to manage active distribution network[C] // IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009.
- [3] 徐创学, 刘鲁清, 谢云明, 等. 基于实时数据的风力发电机组性能在线评价[J]. 热力发电, 2015, 44(4): 88-91.  
XU Chuangxue, LIU Luqing, XIE Yunming, et al. Real-time data based online evaluation of output performance for wind turbine units[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(4): 88-91.
- [4] 刘琳. 光伏电站有功功率优化分配[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 104-108.  
LIU Lin. Active power control in photovoltaic power plant[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 104-108.
- [5] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.  
BIE Zhaohong, HU Guowei, XIE Haipeng, et al. Optimal dispatch for wind farm power integrated systems considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.
- [6] 文晶, 刘文颖, 谢昶, 等. 计及风电消纳效益的电力系统源荷协调二层优化模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 247-256.  
WEN Jing, LIU Wenyong, XIE Chang, et al. Source-load coordination optimal model considering wind power consumptive benefits based on bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 247-256.
- [7] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 应对风电消纳中基于安全约束的价格型需求响应优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5571-5578.  
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Optimization dispatch modeling for price-based demand response considering security constraints to accommodate the wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5571-5578.
- [8] 赵书强, 刘晨亮, 王明雨, 等. 基于机会约束规划的储能日前优化调度[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3055-3059.  
ZHAO Shuqiang, LIU Chenliang, WANG Mingyu, et al. Chance-constrained programming based day-ahead optimal scheduling of energy storage[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3055-3059.
- [9] 卢鹏铭, 温步瀛, 江岳文. 基于多时间尺度协调机组组合的含风电系统旋转备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 94-100.  
LU Pengming, WEN Buying, JIANG Yuewen. Study on optimization of spinning reserve in wind power integrated power system based on multiple timescale and unit commitment coordination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 94-100.
- [10] 康守亚, 李嘉龙, 李燕珊, 等. 考虑峰谷分时电价策略的源荷协调多目标发电调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 83-89.  
KANG Shouya, LI Jialong, LI Yanshan, et al. Multi-objective generation scheduling model of source and load considering the strategy of TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 83-89.
- [11] DANESHI H, SRIVASTAVA A K. Security-constrained unit commitment with wind generation and compressed air energy storage[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2012, 6(2): 167-175.
- [12] 何青, 刘辉, 刘文毅. 风电-压缩空气储能系统火用和火用成本分析模型[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 34-39.  
HE Qing, LIU Hui, LIU Wenyi. Exergy and exergy cost analysis model for wind-compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 34-39.
- [13] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备, 2016,

- 36(2): 102-111.  
ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 102-111.
- [14] 鞠立伟, 于超, 谭忠富. 计及需求响应的风电储能两阶段调度优化模型及求解算法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1287-1293.  
JU Liwei, YU Chao, TAN Zhongfu. A two-stage scheduling optimization model and corresponding solving algorithm for power grid containing wind farm and energy storage system considering demand response[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1287-1293.
- [15] 王冬荣. 电力需求侧响应理论与实证研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
WANG Dongrong. Theory and empirical research on electric power demand response[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [16] DRIESEN J, KATIRAEI F. Design for distributed energy resources[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 30-39.
- [17] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26.  
ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.
- [18] 刘聪, 刘文颖, 王维洲, 等. 高载能负荷参与的电网消纳风/光电能力定量预评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 223-229.  
LIU Cong, LIU Wenying, WANG Weizhou, et al. A quantitative method to pre-evaluate power grid's capability of accommodation for wind/photovoltaic power under participation of high-energy load[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 223-229.
- [19] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.  
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal dispatch strategy of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [20] 李整, 谭文, 秦金磊. 一种用于机组组合问题的改进双重粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 189-195.  
LI Zheng, TAN Wen, QIN Jinlei. An improved dual particle swarm optimization algorithm for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 189-195.
- [21] TING T O, RAO M V C, LOO C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 411-418.

收稿日期: 2016-09-03; 修回日期: 2016-11-25

作者简介:

许汉平(1969—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统仿真、电力系统优化调度;

李姚旺(1993—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为新型储能技术及其应用、电力系统优化调度;  
yaowang\_li@126.com

苗世洪(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、主动配电网、新型储能技术及应用。

(编辑 周金梅)