

DOI: 10.19666/j.rlfed.202307111

# 风光火储联合供应火电厂厂用电 系统优化调度

李炳阳<sup>1</sup>, 李新利<sup>1</sup>, 杨国田<sup>1</sup>, 王连友<sup>1</sup>, 赵娟<sup>2</sup>

(1.华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2.鹤壁鹤淇发电有限责任公司, 河南 鹤壁 458000)

**[摘要]** 随着风电和光伏发电量逐年增长, 其消纳问题日益凸显。同时, 大容量火电机组厂用电负荷也相对较高, 造成额外的运行成本。对此, 基于多能互补思想, 建立了一种风光火储联合供应火电厂厂用电优化调度模型。首先, 提出了风光火储联合供应火电厂厂用电的组成结构, 将风电、光伏发电优先供应厂用电负荷; 其次构建了风光火储联合供应火电厂厂用电优化调度模型, 考虑了火电机组不同负荷率下的运行成本和风光储成本, 采用层次分析法建立了基于总成本、弃风弃光成本和环境成本的多目标函数, 设置相应约束条件; 最后, 设置不同的场景对比分析联合供应厂用电系统的优化结果, 试验结果表明: 所提出的联合供应厂用电系统模型可以减少机组运行成本和环境成本, 并促进风光消纳。

**[关键词]** 风光消纳; 联合供应; 厂用电; 多能互补; 优化调度

**[引用本文格式]** 李炳阳, 李新利, 杨国田, 等. 风光火储联合供应火电厂厂用电系统优化调度[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 142-152. LI Bingyang, LI Xinli, YANG Guotian, et al. Optimized dispatching of wind-PV-thermal-storage for auxiliary power system of thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 142-152.

## Optimized dispatching of wind-PV-thermal-storage for auxiliary power system of thermal power plant

LI Bingyang<sup>1</sup>, LI Xinli<sup>1</sup>, YANG Guotian<sup>1</sup>, WANG Lianyou<sup>1</sup>, ZHAO Juan<sup>2</sup>

(1.School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2.Hebi Heqi Power Generation Limited Liability Company, Hebi 458000, China)

**Abstract:** With the increasing annual growth of wind and solar power generation, the issue of power consumption has become increasingly prominent. Meanwhile, high-capacity thermal power plants face relatively high auxiliary power loads, resulting in additional operating costs. To address these issues, a joint optimization dispatch model for wind-PV-thermal-storage for auxiliary power system of thermal power plant is developed based on the concept of multi-energy complementarity. Firstly, the compositional structure of the wind-PV-thermal-storage integrated power supply for auxiliary power of thermal power plants is outlined, prioritizing the supply of auxiliary power loads with wind power and photovoltaic power. Secondly, a wind-PV-thermal-storage integrated power supply optimization scheduling model is developed, taking into account the operating costs of thermal power units at different load rates and the costs associated with wind power, photovoltaic power, and energy storage. A hierarchical analysis method is employed to establish a multi-objective function based on the total cost, wind and solar curtailment costs, and environmental costs, while considering corresponding constraint conditions. Finally, various scenarios are set up to compare and analyze the optimization results of the integrated power supply system for auxiliary power. Experimental results demonstrate that the proposed model for the integrated power supply system can effectively reduce unit operating costs and environmental costs, as well as promote the integration of wind and photovoltaic power.

**Key words:** wind and photovoltaic power consumption; joint supply; auxiliary power; multi-energy complement; optimal dispatch

收稿日期: 2023-07-05

第一作者简介: 李炳阳 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源优化调度、模式识别与智能系统, liby1998@qq.com。

通信作者简介: 李新利 (1973), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为综合能源系统、模式识别与智能系统、图像处理, lixinli@ncepu.edu.cn。

为实现“碳达峰碳中和”目标，目前我国大力发展新能源，推动电力脱碳，加快能源转型<sup>[1]</sup>。根据国家能源局发布的数据统计，截至2022年5月底，中国新能源发电总装机容量达到1.1 TW<sup>[2]</sup>，装机规模居世界首位，但风光发电量占比仅约11%，现有的电力系统结构与机制难以实现更高比例的风光消纳<sup>[3]</sup>，局部地区消纳矛盾逐渐凸显<sup>[4]</sup>。主要原因有3个方面：1) 由于风电、光伏等新能源出力的随机性、间歇性和波动性，若将其大规模并网，会对电网的运行及安全造成冲击<sup>[5]</sup>；2) 可再生能源装机容量的增加及用电需求的放缓，新能源所发电量难以跨区域输送，就地消纳能力欠缺<sup>[4, 6]</sup>；3) 新能源对于火力发电呈现一定的反调峰特性，导致弃风弃光现象增加<sup>[7]</sup>。仅2022年第1季度，我国弃风弃光电量约8.4 TW<sup>[8]</sup>，特别是在“三北”地区，由于缺乏优质调节能力的水电电源，风光消纳受限，大量再生清洁能源被浪费<sup>[9]</sup>，同时大量煤炭等化石能源的使用造成了严重的资源与环境问题。因此，有必要对提升可再生能源的利用率进行研究。

在此背景下，国内外诸多学者对多种可再生能源与火电互补协调发电进行了大量研究，该发电模式一方面充分挖掘了电力系统的灵活调节能力，另一方面在满足调峰需求的同时促进了可再生能源消纳<sup>[10-14]</sup>。文献[15]提出了风光水火储多能互补协调优化策略，对火电的调峰补偿收益进行分配，利用联合系统分层调度方案进行求解。文献[16]提出了风光火储运行过程中负荷跟踪、功率平滑2种出力模式，考虑了储能发电成本，对多个目标函数进行求解分析。文献[17]基于鲁棒优化方法，在风电规模化并网场景下计算火电机组深度调峰下的经济成本，

获得优化调度方案。文献[18]在考虑最优弃能率的基础上，研究弃风弃光对火电调峰及经济性的影响，以电网的运行成本最小为目标函数进行优化调度。

上述基于多能互补的消纳方法均将可再生能源与火电机组作为电源侧对外部负荷进行供电，忽略了火电厂本身的厂用电负荷，没有将新能源与火电机组进行深度融合。火电厂的运行过程中，其厂用电率约为5%~10%<sup>[19]</sup>，对大型机组而言，厂用电负荷相对较高。随着近年来新能源发电控制策略逐渐成熟<sup>[20]</sup>，可根据火电厂与新能源发电项目所在的地区特点，将难以消纳的风电、光伏发电等接入火电厂厂用电系统，与火电机组共同承担厂用电负荷，不仅可以提高火电厂向电网输电能力、降低煤炭消耗、实现节能减排，而且促进了新能源消纳。

因此，针对大型火电机组，本文基于多能互补思想，提出了风光火储联合供应火电厂厂用电系统结构，建立联合供应火电厂厂用电系统优化调度模型，分析了风光火储各环节的发电成本，构建了目标函数和约束条件，并对其中的复杂模型进行线性化处理。在不同场景下进行仿真试验，试验结果表明通过该模型供应火电机组厂用电负荷，可以降低系统运行成本，促进新能源消纳，减少污染物排放。

## 1 风光火储联合供应火电厂厂用电系统组成

根据《火力发电厂厂用电设计技术规程》(DL/T 5153—2014)，对于火电厂大容量机组，其公用负荷较多、容量较大，可采用集中供电方式，同时设立高压公用母线段。针对以上特点，本文建立风光火储联合供应火电厂厂用电的组成结构(图1)。

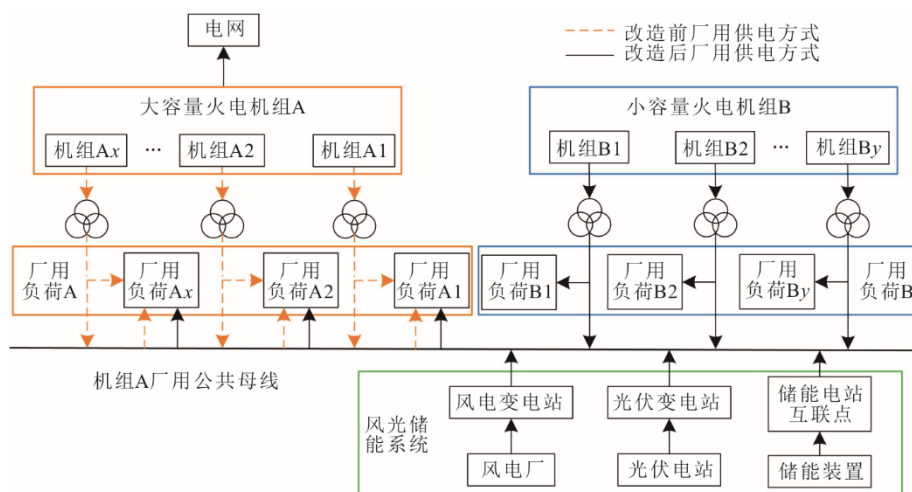


图1 风光火储联合供应火电厂厂用电系统组成

Fig.1 The structure of the wind-PV-thermal-storage supply system for plant auxiliary

在风光火储联合供应火电厂厂用电系统中,火电厂含有一定数量的大容量机组 A 和小容量机组 B。风电厂、光伏电站和储能装置所发电力通过各自的接口单元送至大容量机组 A 的厂用公共母线,小容量机组 B 在满足自身厂用负荷 B 的情况下,输送电力到机组 A 的厂用公共母线。

运行过程中,风力发电与光伏发电作为清洁能源,在系统运行能力范围内优先利用。当风光储输送功率不满足火电机组 A 的厂用电时,机组 B 承担机组 A 剩余的厂用电负荷。该模型在保证功率平衡的基础上,合理规划各个电源的出力情况,实现经济运行,同时可通过储能装置的充放电能力,平抑风光接入厂用电后带来的波动,从而保证风光火储供应厂用电时的稳定性和经济性。

## 2 系统主要设备数学模型及成本分析

### 2.1 火电机组输出功率模型

一般来说,火电机组所产生的功率分为 2 部分:一部分用于满足电厂本身的需求,例如驱动电机、辅助设备和提供照明等,这部分被称为“厂用电负荷”;另一部分则通过输电网向外供应。火电机组  $i$  在  $t$  时刻的厂用电功率  $P_{i,t,aux}$  和外送功率  $P_{i,t,tra}$  可以分别表示为:

$$\begin{cases} P_{i,t,aux} = P_{i,t,g} e_i(P_{i,t,g}) \\ P_{i,t,tra} = P_{i,t,g} - P_{i,t,aux} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{i,t,g}$  为火电机组  $i$  在  $t$  时刻的有功功率; $e_i(P_{i,t,g})$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的厂用电率,其与机组功率有关。

### 2.2 不同负荷率下的火电机组成本分析

本文以 55%、45% 和 30% 3 个负荷率界限将火电机组运行过程划分为 3 个阶段,每个阶段的构成成本不同。

#### 2.2.1 第 1 阶段负荷率为 55%~100%

此阶段下的火电机组运行成本主要为锅炉燃煤的煤耗、环境成本和机组启停成本<sup>[21]</sup>。

根据《中华人民共和国环境保护税法》<sup>[22]</sup>,本文考虑火电机组燃煤时排放  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、烟尘 3 类大气污染物的环境成本,各污染物的应税税额按其排放量折合的污染当量值确定。此外,根据风电和光伏发电的波动性,火电机组会存在启停活动以调节负荷平衡。该阶段下的火电机组运行成本  $C_1$ 、煤耗成本  $C_{i,t,coal}$ 、燃煤环境成本  $C_{i,t,env}$  和启停成本  $C_{i,t,ss}$  分别表示为:

$$\begin{cases} C_1 = C_{i,t,coal} + C_{i,t,env} + C_{i,t,ss} \\ C_{i,t,coal} = (a_i P_{i,t,g}^2 + b_i P_{i,t,g} + c_i) S_{coal} \\ C_{i,t,env} = \sum_{v=1}^{N_v} (a_i P_{i,t,g}^2 + b_i P_{i,t,g} + c_i) \frac{G_v}{G_{v,eqv}} \mu_v \\ C_{i,t,ss} = u_{i,t,g} (1 - u_{i,t-1,g}) C_{i,on} + u_{i,t-1,g} (1 - u_{i,t,g}) C_{i,off} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  均为煤耗特性系数; $S_{coal}$  为当月煤炭价格; $N_v$  为污染物排放种类; $G_v$  为污染物  $v$  的实际排放量; $G_{v,eqv}$  为污染物  $v$  的污染当量值; $\mu_v$  为污染物  $v$  的单位应税税额; $u_{i,t,g}$  为火电机组  $i$  在  $t$  时刻的运行状态,0 表示关机,1 表示开机; $C_{i,on}$ 、 $C_{i,off}$  分别为机组  $i$  的开机、停机成本。

#### 2.2.2 第 2 阶段负荷率为 45%~55%

此阶段相较于第 1 阶段,机组功率变化会使发电机转子产生疲劳损耗和蠕变损耗,从而影响机组的寿命和机组运行的经济性<sup>[23]</sup>。该阶段下的火电机组运行成本  $C_2$  和机组寿命损耗成本  $C_{i,t,was}$  分别为:

$$\begin{cases} C_2 = C_1 + C_{i,t,was} \\ C_{i,t,was} = \frac{\beta S_{i,unit}}{2N_g(P_{i,t,g})} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\beta$  为机组运行损耗系数; $S_{i,unit}$  为机组  $i$  的购机成本; $N_g(P_{i,t,g})$  为转子致裂循环次数,该数值与机组功率有关,可通过 Manson-Coffin 公式计算<sup>[24]</sup>。

#### 2.2.3 第 3 阶段负荷率为 30%~45%

此阶段相较于第 2 阶段,火电机组运行时需投入助燃油以维持锅炉燃烧稳定,同时投油燃烧会产生  $NO_x$ 、烟尘等污染物,导致火电厂的废弃排污费增加<sup>[25]</sup>。该阶段下的火电机组运行成本  $C_3$ 、附加投油成本  $C_{i,t,oil}$  和环境附加成本  $C_{i,t,evo}$  分别表示为:

$$\begin{cases} C_3 = C_2 + C_{i,t,oil} + C_{i,t,evo} \\ C_{i,t,oil} = \alpha_{oil} Q_{i,oil} \\ C_{i,t,evo} = w_{i,oil} Q_{i,oil} + S_{pu,oil}(P_{i,t,g}, Q_{i,oil}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\alpha_{oil}$  为当月柴油价格; $Q_{i,oil}$  为机组  $i$  在第 3 阶段的耗油量; $w_{i,oil}$  为单位燃油产生的排污成本; $S_{pu,oil}$  为排污量超标时的罚款函数。

综上所述,火电机组  $i$  在  $t$  时刻的运行成本  $C_{i,t,g}$  以分段函数表示为:

$$C_{i,t,g} = \begin{cases} C_1, & 55\% \leq R_{i,t} \leq 100\% \\ C_2, & 45\% \leq R_{i,t} < 55\% \\ C_3, & 30\% \leq R_{i,t} < 45\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: $R_{i,t}$  为火电机组  $i$  在  $t$  时刻的负荷率,以百分比表示。

### 2.3 风光储成本分析

根据 IEC60300-3-3 标准, 本文考虑风力发电机、光伏电池板和储能装置的寿命周期成本, 该成本指在系统寿命周期内, 投资、运行、维护等过程中发生的或可能发生的所有直接、间接、派生的或非派生费用的总和。采用资金回收系数对其及相关配套设备的投资成本进行修正, 资金回收系数可以表示为:

$$C(r, n) = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (6)$$

式中:  $r$  为贴现率;  $n$  为设备的使用寿命。

#### 2.3.1 风力发电成本

1) 风电厂折旧后的投资成本可以表示为:

$$C_{w, in} = \frac{c_{w, in} P_{w, rp}}{365} C(r, n_w) + \frac{c_{w, aom} P_{w, rp}}{365} \quad (7)$$

式中:  $c_{w, in}$  为风电厂投资单价;  $P_{w, rp}$  为风机额定功率;  $n_w$  为风机使用寿命;  $c_{w, aom}$  为风机年维护成本。

2) 风机发电成本为:

$$C_{t, w, om} = c_{w, om} P_{t, w} \quad (8)$$

式中:  $c_{w, om}$  为风机单位出力的运维成本;  $P_{t, w}$  为  $t$  时段的风力发电量。

#### 2.3.2 光伏发电成本

1) 光伏电站折旧后的投资成本可以表示为:

$$C_{pv, in} = \frac{c_{pv, in} P_{pv, rp}}{365} C(r, n_{pv}) + \frac{c_{pv, aom} P_{pv, rp}}{365} \quad (9)$$

式中:  $c_{pv, in}$  为光伏电站投资单价;  $P_{pv, rp}$  为光伏电池板额定功率;  $n_{pv}$  为光伏电池板使用寿命;  $c_{pv, aom}$  为光伏电站年维护成本。

2) 光伏电池板发电成本为:

$$C_{t, pv, om} = c_{pv, om} P_{t, pv} \quad (10)$$

式中:  $c_{pv, om}$  为光伏电池板单位出力的运维成本;  $P_{t, pv}$  为  $t$  时段的光伏发电量。

#### 2.3.3 储能发电成本

1) 储能装置可以平抑风光能源接入带来的波动性, 同时可以辅助火电机组运行<sup>[26]</sup>, 折旧后的投资成本可以表示为:

$$C_{be, in} = \frac{c_{bc, in} E_{bc} + c_{be, in} P_{be}}{365} C(r, n_{be}) + \frac{c_{be, aom} P_{be}}{365} \quad (11)$$

式中:  $E_{bc}$ 、 $P_{be}$  分别为储能的容量、额定功率;  $c_{bc, in}$ 、 $c_{be, in}$  分别为储能容量、额定功率的投资成本;  $n_{be}$  为储能使用寿命;  $c_{be, aom}$  为储能额定功率的年运行维护成本。

2) 储能充放电成本可以表示为:

$$C_{t, be, om} = c_{be, om} (P_{t, cha} + P_{t, dis}) \quad (12)$$

式中:  $c_{be, om}$  为储能的充放电成本系数;  $P_{t, cha}$ 、 $P_{t, dis}$  分别为储能  $t$  时刻的充、放电功率。

## 3 风光火储联合供应火电厂厂用电系统调度模型

### 3.1 目标函数

风光火储联合供应火电厂厂用电系统调度模型的目标函数包含经济型目标、环保型目标和系统消纳新能源能力目标。

1) 经济型目标函数

经济型目标函数主要考虑火电机组运行成本、风机运维成本、光伏运维成本、储能充放电成本、弃风成本、弃光成本; 风机投资成本、光伏投资成本、储能投资成本。一个调度周期  $T$  的总成本可以表示为:

$$\min f_{tc} = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{t=1}^T C_{i, t, g} + \sum_{t=1}^T (C_{t, w, om} + C_{t, pv, om} + C_{t, be, om} + C_{t, w, aban} + C_{t, pv, aban}) + C_{w, in} + C_{pv, in} + C_{be, in} \quad (13)$$

$t$  时段的弃风、弃光成本为:

$$\begin{cases} C_{t, w, aban} = c_{w, aban} (P_{t, w, max} - P_{t, w}) \\ C_{t, pv, aban} = c_{pv, aban} (P_{t, pv, max} - P_{t, pv}) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $c_{w, aban}$ 、 $c_{pv, aban}$  分别为单位弃风、弃光成本;  $P_{t, w, max}$ 、 $P_{t, pv, max}$  分别为风电厂、光伏电站  $t$  时刻的最大输出功率。

2) 环保型目标函数

环保型目标函数主要考虑火电机组燃煤排放污染物的成本、燃油产生的环境附加成本, 一个调度周期  $T$  的环境成本可以表示为:

$$\min f_{ev} = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{t=1}^T (C_{i, t, evc} + C_{i, t, evo}) \quad (15)$$

3) 系统消纳新能源能力目标函数

系统消纳风光的能力主要考虑系统运行过程中因为弃风、弃光产生的惩罚成本, 弃风、弃光成本越小, 系统消纳新能源的能力就越强, 一个调度周期  $T$  的弃风、弃光成本可以表示为:

$$\min f_{aban} = \sum_{t=1}^T (C_{t, w, aban} + C_{t, pv, aban}) \quad (16)$$

对于多目标优化问题, 本文采用层次分析法构造判断矩阵, 由于总成本中含有另外 2 个目标的成本, 令总成本所占权重最大, 其次尽可能地消纳风

电、光电，最后考虑环境成本。构造判断矩阵：

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 & 5/2 \\ 1/5 & 2/5 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

该矩阵通过一致性检验，利用特征值法得到归一化后的权重  $I=[0.588 \ 2 \ 0.294 \ 1 \ 0.117 \ 6]$ ，总目标函数表示为：

$$\min f_1 = I[f_{tc}; f_{aban}; f_{ev}] \quad (18)$$

综上所述，将多目标函数转化为单目标函数后，可利用目标规划的数学方法进行求解。

### 3.2 约束条件

#### 3.2.1 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t,tra} + P_{t,w} + P_{t,pv} = P_{t,load} + P_{t,cha} + P_{t,dis} \quad (19)$$

式中： $P_{t,load}$  为  $t$  时刻外部火电机组的厂用电总负荷。

#### 3.2.2 火电机组约束

##### 1) 功率约束

$$\begin{cases} u_{i,t,g} P_{i,g,z} \leq P_{i,t,g} \leq u_{i,t,g} P_{i,g,max} \\ P_{i,g,z} = R_{i,g,min} P_{i,g,max} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $P_{i,g,z}$ 、 $P_{i,g,max}$ 、 $R_{i,g,min}$  分别为火电机组  $i$  的最小出力、最大出力、最低负荷率。

##### 2) 最小启停时间约束

$$\begin{cases} (u_{i,t-1,g} - u_{i,t,g})(T_{i,t-1,g,on} - T_{i,g,on}) \geq 0 \\ (u_{i,t,g} - u_{i,t-1,g})(T_{i,t-1,g,off} - T_{i,g,off}) \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中： $T_{i,t-1,g,on}$ 、 $T_{i,t-1,g,off}$  分别为机组  $t-1$  时刻的连续运行时间、停机时间； $T_{i,g,on}$ 、 $T_{i,g,off}$  分别为机组允许的最小连续运行时间、停机时间。

#### 3.2.3 风、光出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,w} \leq P_{t,w,max} \\ 0 \leq P_{t,pv} \leq P_{t,pv,max} \end{cases} \quad (22)$$

#### 3.2.4 储能装置约束

##### 1) 荷电状态约束

$$\begin{cases} S_{SOC,t} = S_{SOC,t-1}(1 - \eta_{sd}) + \frac{P_{t,cha} \eta_{cha}}{E_{be}} - \frac{P_{t,dis}}{\eta_{dis} E_{be}} \\ S_{SOC,min} \leq S_{SOC,t} \leq S_{SOC,max} \\ S_{SOC,init} = S_{SOC,final} \end{cases} \quad (23)$$

式中： $S_{SOC,t}$  为  $t$  时刻储能的荷电状态； $\eta_{sd}$  为储能的自放电率； $\eta_{cha}$ 、 $\eta_{dis}$  分别为储能的充、放电效率； $S_{SOC,min}$ 、 $S_{SOC,max}$  分别为储能荷电状态的上、下限； $S_{SOC,init}$ 、 $S_{SOC,final}$  分别为储能初始、结束时刻的荷电状态。

##### 2) 充、放电功率约束

$$\begin{cases} u_{t,cha} P_{cha,min} \leq P_{t,cha} \leq u_{t,cha} P_{cha,max} \\ u_{t,dis} P_{dis,min} \leq P_{t,dis} \leq u_{t,dis} P_{dis,max} \end{cases} \quad (24)$$

式中： $u_{t,cha}$ 、 $u_{t,dis}$  分别为储能装置  $t$  时刻的充、放电状态； $P_{cha,min}$ 、 $P_{cha,max}$  分别为储能充电功率的最小值、最大值； $P_{dis,min}$ 、 $P_{dis,max}$  分别为储能放电功率的最小值、最大值。

### 3.3 模型求解

模型中，火电机组的厂用电功率和寿命损耗成本为非线性函数，煤耗函数为二次函数，不便代入模型进行求解。因此，本文分别对其进行处理。

#### 3.3.1 厂用电功率线性化

根据文献[27]，火电机组的负荷每降低 10%，厂用电率增加 14%左右，为简化计算，火电机组  $i$  在  $t$  时刻的厂用电功率可以改写为：

$$P_{i,t,aux} = P_{i,t,g} e_{i,dv} \left( -\frac{1.4P_{i,t,g}}{P_{i,g,max}} + 2.4 \right) \quad (25)$$

式中： $e_{i,dv}$  为厂用电率设计值，表示火电机组  $i$  在满负荷下厂用电量占总发电量的百分比。式(25)可以进一步表示为：

$$P_{i,t,aux} = P_{i,g,max} e_{i,dv} (-1.4R_{i,t}^2 + 2.4R_{i,t}) \quad (26)$$

在机组出力范围内采用线性最小二乘法对式(26)进行拟合，得到：

$$P_{i,t,aux} = P_{i,g,max} e_{i,dv} (-1.4R_{i,t}^2 + 2.4R_{i,t}) \quad (27)$$

最后，火电机组  $i$  在  $t$  时刻的厂用电功率转化为与功率  $P_{i,t,g}$  有关的线性函数，可以表示为：

$$P_{i,t,aux} = e_{i,dv} (0.72P_{i,t,g} + 0.448P_{i,g,max}) \quad (28)$$

#### 3.3.2 机组损耗成本线性化

参考文献[28]，利用有限元软件 ANSYS 计算不同变负荷率下的转子总应变幅，得到相应的机组寿命损耗率，具体数值见表 1。

表 1 不同变负荷幅度的机组寿命损耗率  
Tab.1 Life degradation rate of units with different load variation amplitudes

变负荷幅度/%	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
寿命损耗率/( $\times 10^{-4}$ )	0.02	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.1	0.13	0.16	0.17	0.19

引入布尔变量  $\delta_{i,t,j,was}$  表示火电机组  $i$  在  $t$  时刻的有功功率是否达到机组寿命损耗率的第  $j$  分段, 可以表示为:

$$\delta_{i,t,j,was} = \begin{cases} 1, & \chi_{j-1} P_{i,g,max} \leq |P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq \chi_j P_{i,g,max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $\chi_j$  为不同变负荷幅度区间的端点值。机组寿命损耗成本可以改写为:

$$C_{i,t,was} = \beta S_{i,unit} \delta_{i,t,j,was} d_j \quad (30)$$

式中:  $d_j$  为第  $j$  分段机组的寿命损耗率。

### 3.3.3 机组煤耗成本分段线性化

对煤耗成本函数进行分段处理, 并引入布尔变量  $\delta_{i,t,m,coal}$  表示火电机组  $i$  在  $t$  时刻的有功功率是否达到煤耗成本函数的第  $m$  分段, 可以表示为:

$$\delta_{i,t,m,coal} = \begin{cases} 1 & P_{i,g,z} + \sum_{l=1}^{m-1} P_{i,g,\Delta} \leq P_{i,t,g} \leq P_{i,g,z} + \sum_{l=1}^m P_{i,g,\Delta} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $P_{i,g,\Delta}$  为分段间隔。

机组  $i$  在  $t$  时刻的有功功率和煤耗成本可以分别表示为:

$$\begin{cases} P_{i,t,g} = \delta_{i,t,m,coal} (P_{i,g,z} + \sum_{l=1}^{m-1} P_{i,g,\Delta} + \Delta P_{i,t,m,g}) \\ C_{coal}(P_{i,t,g}) = \delta_{i,t,m,coal} (C_{coal}(P_{i,g,z}) + \sum_{l=1}^{m-1} k_{i,t,l} P_{i,g,\Delta} + k_{i,t,m} \Delta P_{i,t,m,g}) \end{cases} \quad (32)$$

式中:  $\Delta P_{i,t,m,g}$ 、 $k_{i,t,m}$  分别为机组  $i$  在  $t$  时刻煤耗成本函数第  $m$  分段的有功功率和斜率。

综上所述, 该模型最终转化为混合整数线性规划模型。在 MATLAB 平台中, 使用 YALMIP 调用 CPLEX 求解器的方法<sup>[29]</sup>, 对火电机组实时功率  $P_{i,t,g}$ 、风电实时功率  $P_{t,w}$ 、光伏实时功率  $P_{t,pv}$ 、储能充放电功率  $P_{t,cha}$  和  $P_{t,dis}$  这 5 种变量进行优化求解。

## 4 算例分析

为验证本文所建模型有效性, 对其进行算例仿真分析, 以 4 台容量分别为 600、300、200、135 MW 的火电机组供应厂用负荷为例, 分别记为机组 1、机组 2、机组 3、机组 4, 相关参数见表 2<sup>[17,28]</sup>和表 3<sup>[22,30]</sup>。新能源总装机容量选择为 300 MW, 风光比为 2:1, 储能容量为 100 MW, 风电厂、光伏电站、储能装置的相关参数见表 4<sup>[26]</sup>和表 5<sup>[31-32]</sup>。

表 2 火电机组参数

Tab.2 Parameters of thermal power units

机组编号	最大出力/MW	厂用电率设计值/%	启停成本/ $(\times 10^4$ 元)	第 3 阶段煤耗率系数	煤耗特性系数			最小启/停时间/h	购机成本/ $(\times 10^8$ 元)	第 3 阶段投油量/t	燃油环境附加成本/ $(\text{元}\cdot\text{t}^{-1})$
					$a/(\times 10^{-4}\text{t}\cdot(\text{MW}^2\cdot\text{h})^{-1})$	$b/(\text{t}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1})$	$c/(\text{t}\cdot(\text{MW}\cdot\text{h})^{-1})$				
1	600	5.0	23.902	1.12	0.785	0.228	25.540	18/18	21.937	4.7	4 781
2	300	7.0	11.879	1.14	1.310	0.232	17.007	9/9	13.330	2.7	3 324
3	200	8.5	7.723	1.14	2.580	0.234	12.356	6/6	9.216	1.8	2 137
4	135	9.0	5.474	1.17	3.610	0.238	9.302	4/4	6.325	1.3	1 825

表 3 火电机组燃煤环保代价参数

Tab.3 Environmental cost parameters of coal-fired power units

污染物	实际排放量/ $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	污染当量值	单位应税税额/ $(\text{元}\cdot\text{kg}^{-1})$
SO <sub>2</sub>	8.8	0.95	7.2
NO <sub>x</sub>	7.7	0.95	8.0
烟尘	58.0	2.18	6.6

表 4 储能装置参数

Tab.4 Parameters of energy storage system

项目	数值	项目	数值
储能容量/(MW·h)	100	充/放电效率/%	90/90
自放电率/%	0.005	荷电上/下限	1.0/0.2
最大充/放电功率/MW	30	初始荷电状态	0.5

表 5 风光储成本参数

Tab.5 Parameters of wind, solar, and energy storage cost

能源类型	装机容量/MW	单位容量投资成本/ $(\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	单位功率投资成本/ $(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	单位功率年维护成本系数/ $(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	运维成本/ $(\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$	寿命/a	贴现率/%
储能装置		1 250	2 200	120	0.0726	15	5
风电厂	200		4 500	30	0.0207	25	5
光伏电站	100		4 000	40	0.089	25	5

弃风、弃光惩罚系数均为 600 元/(MW·h)<sup>[16]</sup>，当月煤价、油价分别为 720、6 600 元/t。火电机组运行损耗系数 $\beta$ 在第 1 阶段取 0，第 2 阶段取 1.2，第 3 阶段取 1.5<sup>[33]</sup>；调度周期  $T$  取 24 h，时间尺度取 1 h。厂用电负荷、风力发电和光伏发电的预测曲线<sup>[15]</sup>如图 2 所示。

#### 4.1 模型调度优化结果分析

本文对 5 种调度场景下的各成本组成和平均厂用电率进行对比分析，5 种调度场景下的仿真结果见表 6。

场景 1 仅由火电机组供应厂用电负荷，火电机组最低负荷率为 30%。

场景 2 不含储能，由风光火联合供应厂用电负荷，火电机组最低负荷率为 55%。

场景 3 不含储能，由风光火联合供应厂用电负荷，火电机组最低负荷率为 30%。

场景 4 风光火储联合供应厂用电负荷，火电机组最低负荷率为 55%。

场景 5 风光火储联合供应厂用电负荷，火电机组最低负荷率为 30%。

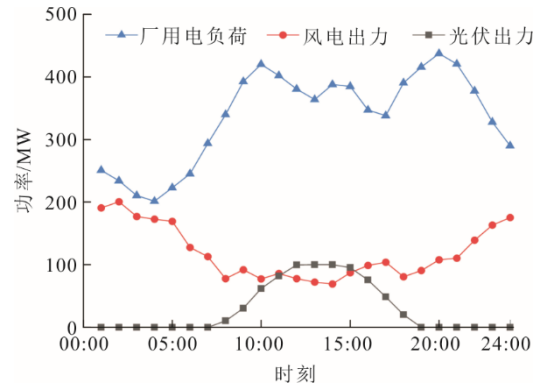


图 2 厂用电负荷、风电和光伏发电预测曲线  
Fig.2 Forecasting curves of auxiliary power load, wind power and photovoltaic power

表 6 5 种场景下系统优化结果  
Tab.6 System optimization results in five scenarios

场景	总成本/万元	燃料成本/万元	环境成本/万元	机组损耗成本/万元	启停成本/万元	弃风弃光率/%	风光储成本/万元	供应厂用电机组	机组达到最低负荷率/%	平均厂用电率/%
1	334.30	214.80	91.50	2.93	25.08			2, 3, 4	40	10.03
2	273.12	131.89	56.26		39.20	12.45	24.41	2, 3	55	10.65
3	240.98	129.03	55.04	2.48	22.83	3.89	24.92	2, 4	45	11.00
4	232.58	128.17	54.67		13.20	2.04	32.15	3, 4	55	11.46
5	227.08	126.71	54.05	0.83	13.20	0	32.30	3, 4	45	11.54

场景 1 中，厂用电负荷选择了 3 台小容量火电机组供应，而没有选择 600 MW 大容量机组单独供应，这是因为大容量机组单独承担负荷时平均负荷率高，带来高额的燃料成本和环境成本，同时跟踪负荷变化时变负荷成本高。此外，小容量火电机组运行时也需要实时调整出力以跟踪负荷变化，机组启停成本与损耗成本较高，存在额外的燃油费用。

场景 2 和场景 3 中引入了风光后，虽然带来了一定的风光成本，同时火电机组的启停和损耗成本也分别有所增加，但由于新能源的节煤效益，系统的总成本分别下降了 18.3%、27.9%。此外，由于平均负荷率的下降，平均厂用电率分别相对上升了 6.2%、9.7%。场景 3 相较于场景 2，火电机组可以在更低的负荷率下运行，为风、光提供了更多的消纳空间，弃风弃光率相对减少 68.8%。然而，相对于剩余的弃风弃光成本，火电机组进入第 3 阶段会带来附加的燃煤成本、损耗成本和燃油成本，厂用

电率也会进一步升高，造成电量浪费，因此场景 3 中机组只进入到第 2 阶段。

场景 4 相较于场景 2，引入储能装置，在一定程度上平抑了风、光的波动性，使得机组的启停成本大幅下降，总成本下降了 40.54 万元，弃风弃光率相对减少 83.6%。场景 4 相较于场景 3，风光的消纳率更高，这是因为系统在场景 3 中只进入到第 2 阶段，而场景 4 中系统选择了 2 台小容量机组供电，机组平均负荷率更低，风光出力增加。因此，从节约成本的角度来看，储能的充放电调节相较于火电的低负荷运行，对促进风光的消纳作用更为明显和经济。

场景 4 和场景 5 接入储能装置后，虽然带来了一定的储能成本，但减少了弃风、弃光和燃煤成本，此时仅由 2 台小容量机组供电，机组损耗和启停成本降低，较高的厂用电率设计值导致平均厂用电率进一步变高。

为验证本文模型的合理性，在场景 5 下研究了不同新能源装机容量及比例对系统调度结果的影响，具体如图 3 所示，其中新能源装机容量在 220~360 MW 区间变化。当系统中只有光伏时，由于光伏发电特性，其只在白天部分时间内可以发电，经济效益不高，总成本居高不下，而其余 4 种场景调度优化后的总成本基本相近，当风光比为 2:1，装机容量在 300 MW 及以上时总成本较低。由于风电全天都有功率输出，随着风电装机容量的增加，弃风弃光率总体呈现上升的趋势，相应的惩罚成本随之增加。同时，随着新能源装机容量增加，化石燃料燃烧减少，环境成本呈现下降趋势，小容量机组逐渐替代大容量机组工作，平均负荷率随之下降，平均厂用电率总体呈现上升趋势。

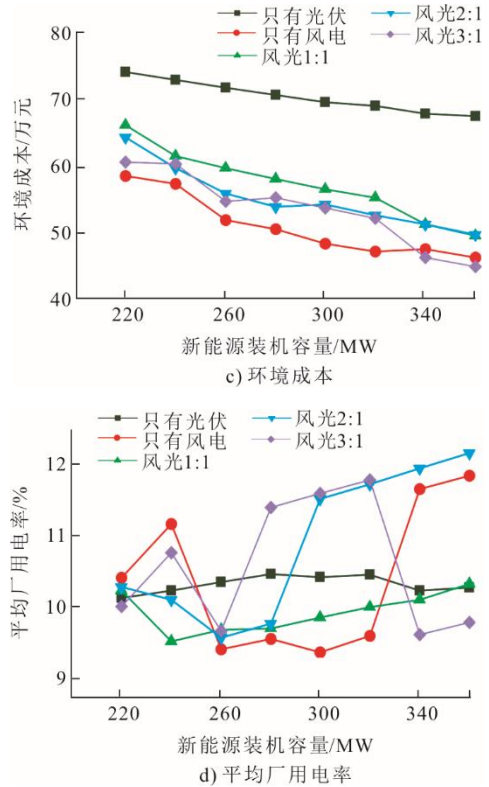
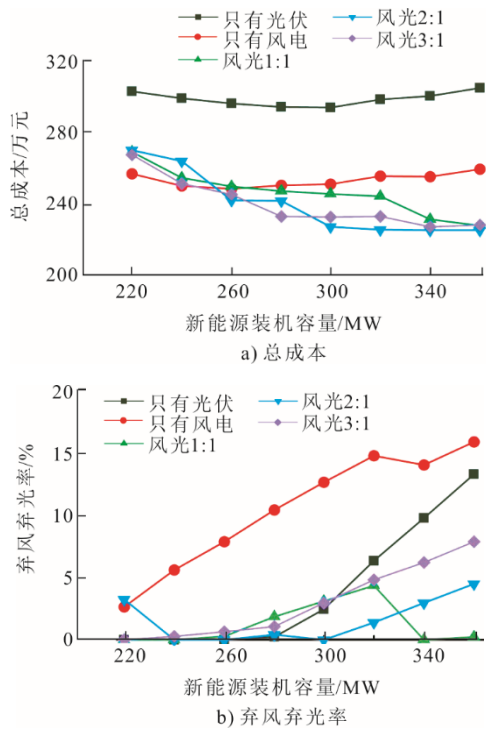


图 3 不同新能源装机容量及比例接入影响  
Fig.3 The influence of different installed capacities and proportional access of new energy

综合各方面考虑，该风光火储系统中，新能源装机容量应为 300 MW 及以上，其中风电占比应为光伏占比的 2 倍及以上，使二者充分互补，从而削弱风电、光伏发电的自身特性对系统的不利影响。

#### 4.2 厂用电负荷对系统影响

为验证火电机组自身厂用电负荷对系统优化结果的影响，本文对场景 5 下机组自身厂用电被外部能源供应前后各项成本的变化情况进行对比研究，结果见表 7，其中，场景 6 为场景 5 中火电机组不需要供应自身厂用电的调度场景。

表 7 不供应自身厂用电后系统参数对比

Tab.7 Comparison of system parameters after excluding self-supply of auxiliary power

场景	总成本/万元	燃料与环境成本/万元	弃风弃光率/%	损耗与启停成本/万元	平均厂用电率/%
5 供应厂用电	227.08	180.76	0	14.03	11.54
6 不供应厂用电	214.29	155.23	1.1	24.21	9.75

图 4 为场景 5 中火电机组需要供应自身厂用电负荷时各设备出力情况。由图 4 可以看出，系统选择了火电机组 3 和机组 4 进行供电，火电机组 3 在 22:00—24:00 时段处于第 2 阶段，火电机组 4 在 00:00—05:00 时段处于第 2 阶段。系统的风电、光伏发电全部被消纳。此外，储能装置在系统中起到

了很好的调节作用，负荷低谷时，储能放电，火电机组可以低负荷运行，提高了风光消纳率，负荷高峰时储能充电，起到了削峰填谷的作用。

图 5 为场景 6 中火电机组不需要供应自身厂用电负荷时各设备出力情况。由图 5 可以看出，系统选择了机组 2 和机组 4 进行供电，火电机组 2 在

06:00—07:00、22:00—24:00 时段处于第 2 阶段,火电机组 4 在 00:00—05:00、06:00—07:00 时段处于第 2 阶段。系统在 02:00—05:00 时段存在弃风现象。这是因为火电机组原本供应自身厂用电的功率用于供应外部负荷,导致风电出力减少,同时储能放电功率增加,荷电状态提前到达下限。场景 6 相较于场景 5,总成本减少了 12.79 万元,火电厂平均厂用电率相对减少 15.51%,燃烧化石燃料产生的成本减少了 25.53 万元,这是因为不供应自身厂用电后,火电机组出力减少,但在低负荷运行时的变负荷与启停次数变多,相应成本增加,同时存在弃风弃光的惩罚成本。

综合各方面考虑,当引入新能源等外部能源供应火电厂用电负荷时,虽然机组低负荷运行时的运维成本和弃风弃光的惩罚成本有所增加,但平均负荷率下降,燃烧化石燃料产生的成本大幅减少,从而使总成本减少,同时系统可安排较大容量机组运行,平均厂用电率降低,系统供电效率提高。

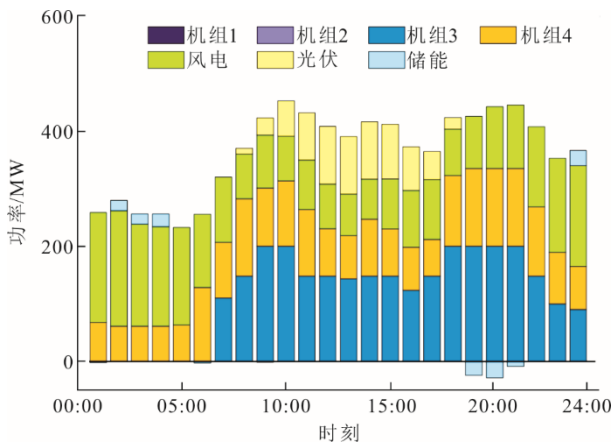


图 4 火电机组供应自身厂用电时各设备出力

Fig.4 The output of each power supply when thermal power units supply their own power

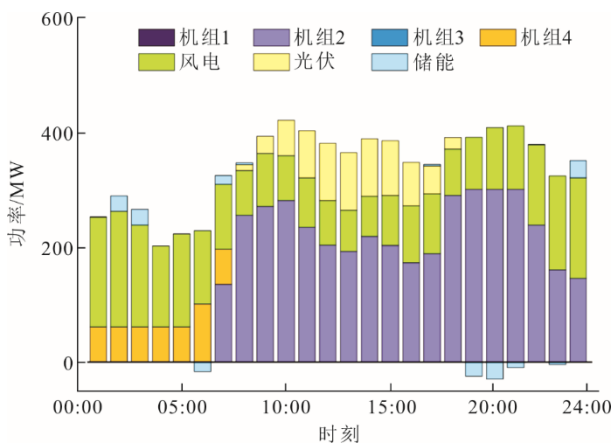


图 5 火电机组不供应自身厂用电时各设备出力

Fig.5 The output of each power supply when thermal power units don't supply their own power

## 5 结 论

本文针对风电、光伏发电难以消纳导致的弃风弃光问题,建立了一种风光火储联合供应火电厂厂用电的优化调度模型。研究的主要结论如下:

1) 将火电、风电、光伏发电和储能发电经专线引至火电厂厂用公共母线,四者共同承担火电厂厂用电负荷,提出了联合供应火电厂厂用电的优化调度策略,该策略可降低系统的运行成本,提高风光消纳率。

2) 火电机组低负荷运行时会带来高额的附加成本,厂用电率也较高,而储能装置可以辅助火电机组运行,减少火电机组变负荷和启停成本,促进风光消纳,使总成本降低。

3) 火电机组自身厂用电负荷被新能源联合供应后,系统会调整出力,机组平均负荷率降低,燃烧化石燃料产生的成本大幅减少,同时使火电厂优质电能得到有效利用。

## [参 考 文 献]

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.  
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 国家能源局. 我国可再生能源发电总装机突破 11 亿千瓦[EB/OL]. (2022-06-24) [2023-07-04]. [http://www.nea.gov.cn/2022-06/24/c\\_1310631956.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-06/24/c_1310631956.htm).  
National Energy Administration. China's total installed capacity of renewable energy generation exceeded 1.1 billion kilowatts[EB/OL]. (2022-06-24) [2023-07-04]. [http://www.nea.gov.cn/2022-06/24/c\\_1310631956.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-06/24/c_1310631956.htm).
- [3] 王文焯,姜飞,张新鹤,等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度[J/OL]. 电网技术, 1-15. (2023-03-13) [2023-07-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2511>.  
WANG Wenyue, JIANG Fei, ZHANG Xinhe, et al. Low carbon flexible scheduling of high-proportion wind and solar multi-energy system with comprehensive utilization of large-scale hydrogen energy[J/OL]. Power System Technology: 1-15. (2023-03-13) [2023-07-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2511>.
- [4] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [5] 范高锋,张楠,梁志锋,等. 我国“三北”地区弃风弃光原因分析[J]. 华北电力技术, 2016(12): 55-59.  
FAN Gaofeng, ZHANG Nan, LIANG Zhifeng, et al. Analysis on the “Three Norths” region wind and PV

- power limitation[J]. North China Electric Power, 2016(12): 55-59.
- [6] 袁桂丽, 王琳博, 王宝源. 基于虚拟电厂“热电解耦”的负荷优化调度及经济效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4974-4985.  
YUAN Guili, WANG Linbo, WANG Baoyuan. Optimal dispatch of heat-power load and economy benefit analysis based on decoupling of heat and power of virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4974-4985.
- [7] 王辉君, 郑海涛, 贾云辉, 等. 风光发电微网负载分段选择供电优化管理[J]. 计算机仿真, 2019, 36(1): 122-126.  
WANG Huijun, ZHENG Haitao, JIA Yunhui, et al. Optimization management based on sectional energy supply of loads in microgrid with wind/photovoltaic generation[J]. Computer Simulation, 2019, 36(1): 122-126.
- [8] 国家能源局. 国家能源局2022年二季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2022-04-29) [2023-07-04]. [http://www.nea.gov.cn/2022-04/29/c\\_1310579541.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-04/29/c_1310579541.htm).  
National Energy Administration. Transcript of the National Energy Administration's online press conference in the second quarter of 2022[EB/OL]. (2022-04-29) [2023-07-04]. [http://www.nea.gov.cn/2022-04/29/c\\_1310579541.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-04/29/c_1310579541.htm).
- [9] 郭丰慧, 胡林献, 周升彧. 基于二级热网储热式电锅炉调峰的弃风消纳调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 50-56.  
GUO Fenghui, HU Linxian, ZHOU Shengyu. Dispatching model of wind power accommodation based on heat storage electric boiler for peak-load regulation in secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 50-56.
- [10] 李海波, 鲁宗相, 乔颖. 源荷储一体化的广义灵活电源双层统筹规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 46-54.  
LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying. Bi-level optimal planning of generation-load-storage integrated generalized flexibility resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 46-54.
- [11] 李宁, 齐尚敏, 刘海洋, 等. 基于机组出力特征解析的风光储联合规划[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 91-98.  
LI Ning, QI Shangmin, LIU Haiyang, et al. Wind power photovoltaic-energy storage joint planning based on unit output characteristic analysis[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 91-98.
- [12] 刘晓颖, 郭春义, 迟永宁. 不同风光水配比下多类型电源打捆直流外送系统的功率传输能力研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13. (2023-05-06) [2023-07-04]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230160>.  
LIU Xiaoying, GUO Chunyi, CHI Yongning. Study on the power transmission capacity of multiple type power bundled HVDC transmission system under different wind-PV-hydro ratio conditions[J]. Proceedings of the CSEE: 1-13. (2023-05-06) [2023-07-04]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230160>.
- [13] 赵书强, 吴杨, 李志伟, 等. 考虑风光出力不确定性的电力系统调峰能力及经济性分析[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1752-1761.  
ZHAO Shuqiang, WU Yang, LI Zhiwei, et al. Analysis of power system peaking capacity and economy considering uncertainty of wind and solar output[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1752-1761.
- [14] 杨勇, 郭苏, 刘群明, 等. 风电-CSP 联合发电系统优化运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 151-157.  
YANG Yong, GUO Su, LIU Qunming, et al. Research on optimization operation for wind-CSP hybrid power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Suppl.1): 151-157.
- [15] 李铁, 李正文, 杨俊友, 等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3622-3630.  
LI Tie, LI Zhengwen, YANG Junyou, et al. Coordination and optimal scheduling of multi-energy complementary system considering peak regulation initiative[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3622-3630.
- [16] 吴庆泽, 吕丽霞, 刘长良, 等. 多模式风光火储系统多目标优化调度[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-8. (2022-10-09) [2023-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20221008.1337.006.html>.  
WU Qingze, LYU Lixia, LIU Changliang, et al. Multi-objective optimization scheduling of multi-mode solar energy fire storage system[J/OL]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition):1-8. (2022-10-09) [2023-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20221008.1337.006.html>.
- [17] 王淑云, 娄素华, 吴耀武, 等. 计及火电机组深度调成本的大规模风电并网鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 118-125.  
WANG Shuyun, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Robust optimal dispatch of large-scale wind power integration considering deep peak regulation cost of thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 118-125.
- [18] 叶泽, 李湘旗, 姜飞, 等. 考虑最优弃能率的风光火储联合系统分层优化经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2270-2280.  
YE Ze, LI Xiangqi, JIANG Fei, et al. Hierarchical optimization economic dispatching of combined wind-PV-thermal-energy storage system considering the optimal energy abandonment rate[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2270-2280.
- [19] 蔡锋, 张明泽. 火电厂厂用电率计算方法及其降低措施[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2014(11): 307-308.  
CAI Feng, ZHANG Mingze. Calculation method of power consumption rate in thermal power plant and its reduction measures[J]. Management & Technology of SME, 2014(11): 307-308.
- [20] 刘春蕾, 庞鹏飞, 石纹赫, 等. 计及碳中和效益及清洁能源消纳的虚拟电厂双层协同优化调度[J]. 供用电, 2021, 38(9): 19-27.  
LIU Chunlei, PANG Pengfei, SHI Wenhe, et al. Taking into account carbon neutrality benefit and clean energy consumption of virtual power plant two-layer cooperative optimization dispatching[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(9): 19-27.
- [21] 邓婷婷, 娄素华, 田旭, 等. 计及需求响应与火电深度调峰的含风电系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 34-41.  
DENG Tingting, LOU Suhua, TIAN Xu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with wind power considering demand response and deep peak regulation of thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 34-41.
- [22] 国家税务总局. 中华人民共和国环境保护税法[EB/OL]. (2018-11-05) [2023-07-04]. <http://www.npc.gov.cn/>

- gov.cn/npc/c12435/201811/5e7d3cfb3afa4ef79428c0ff7a29fdd7.shtml.
- State Administration of Taxation. Environmental protection tax law of the People's Republic of China[EB/OL]. (2018-11-05) [2023-07-04]. <http://www.npc.gov.cn/npc/c12435/201811/5e7d3cfb3afa4ef79428c0ff7a29fdd7.shtml>.
- [23] 徐姗姗, 郭通, 王月, 等. 大规模火电灵活性改造背景下电-热能源集成系统优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(5): 27-37.
- XU Shanshan, GUO Tong, WANG Yue, et al. Optimal scheduling of electro-thermal energy integrated system under the background of flexibility retrofit of thermal power unit[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5): 27-37.
- [24] 林俐, 田欣雨. 基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2255-2262.
- LIN Li, TIAN Xinyu. Analysis of deep peak regulation and its benefit of thermal units in power system with large scale wind power integrated[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2255-2262.
- [25] 于国强, 刘克天, 胡尊民, 等. 大规模新能源并网下火电机组深度调峰优化调度[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 243-250.
- YU Guoqiang, LIU Ketian, HU Zunmin, et al. Optimal scheduling of deep peak regulation for thermal power units in power grid with large-scale new energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 42(1): 243-250.
- [26] 崔杨, 修志坚, 刘闯, 等. 计及需求响应与火-储深度调峰定价策略的电力系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4403-4415.
- CUI Yang, XIU Zhijian, LIU Chuang, et al. Dual level optimal dispatch of power system considering demand response and pricing strategy on deep peak regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4403-4415.
- [27] 赵斌, 王菇, 闫晨帅, 等. 超临界 600 MW 燃煤深度调峰运行热经济性分析[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 109-114.
- ZHAO Bin, WANG Zhe, YAN Chenshuai, et al. Thermal economy analysis on deep peak regulation operation of supercritical 600 MW coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 109-114.
- [28] 林俐, 邹兰青, 周鹏, 等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27.
- LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21-27.
- [29] 杨龙杰, 周念成, 胡博, 等. 计及火电阶梯式爬坡率的精合系统优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 153-164.
- YANG Longjie, ZHOU Niancheng, HU Bo, et al. Optimal scheduling method for coupled system based on ladder-type ramp rate of thermal power units[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 153-164.
- [30] 黄莹航, 李梦, 王燕楠, 等. 风电节能减排环境经济效益分析[J]. 中国市场, 2014(24): 135-139.
- HUANG Yingcan, LI Meng, WANG Yannan, et al. Analysis of environmental benefits of energy saving and emission reduction of wind power[J]. China Market, 2014(24): 135-139.
- [31] 王鑫, 姚一鸣, 唐瞻文, 等. 计及电池寿命折损成本的微电网储能系统容量分层优化配置[J]. 云南电力技术, 2022, 50(2): 2-9.
- WANG Xin, YAO Yiming, TANG Zhanwen, et al. Optimal configuration of microgrid energy storage system capacity hierarchically considering the cost of battery life impairment[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2022, 50(2): 2-9.
- [32] 汪宇航, 李琰, 应飞祥, 等. 计及可靠性成本的风光储微电网储能容量协同优化[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 59-65.
- WANG Yuhang, LI Yan, YING Feixiang, et al. Collaborative optimization for energy storage capacity of wind-solar-battery micro-grid considering reliability cost[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 59-65.
- [33] 李军徽, 张嘉辉, 穆钢, 等. 储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3961-3970.
- LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Hierarchical optimization scheduling of deep peak shaving for energy-storage auxiliary thermal power generating units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3961-3970.

(责任编辑 杜亚勤)