

doi: 10.3969/j.issn.1007-2691.2024.05.11

多模式风光火储系统多目标优化调度

吴庆泽, 吕丽霞, 刘长良, 刘卫亮

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 风光发电具有波动性和随机性, 大规模并入电网影响电力系统的稳定性、安全性。建立考虑火电机组深度调峰和电储能寿命折损成本的风光火储能源系统模型, 提出负荷跟踪、功率平滑两种出力模式。以风光火储各子系统出力为决策变量, 建立了一种以风光火储能源系统运行成本最低、新能源消纳最多、环保性最好为目标的优化调度模型。通过 NSGA-II 算法分别求解两种模式的调度模型, 得到帕累托解集, 最后基于 AHP 决策方法确定最优调度方案, 实现能源系统出力跟踪负荷、能源系统功率平滑的功能, 降低风光发电并入电网带来的冲击。仿真计算结果表明两种模式下的调度策略可以提高风光火储能源系统的经济性, 增强新能源消纳能力, 减少污染性气体排放, 验证了优化调度模型的有效性。

关键词: 风光火储能源系统; 负荷跟踪; 功率平滑; 优化调度; NSGA-II; AHP

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2691 (2024) 05-0100-08

Multi-objective Optimal Scheduling of Multi-mode Wind-solar-thermal Power Storage System

WU Qingze, LÜ Lixia, LIU Changliang, LIU Weiliang

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Characterized by volatility and randomness, wind-solar power generation can affect power system stability and safety after its large-scale integration into power grid. We established a model of wind-solar-thermal power storage system considering deep peak load changing of thermal power generating unit and energy storage life collapse cost and proposed load tracking and power smoothing output modes. Taking each subsystem output of wind-solar-thermal power storage as the decision variable, we established an optimal scheduling model aiming at the lowest operation cost, the most dissipation of new energy, and the optimal environmental protection. And we solved the dispatching model of NSGA-II algorithm to obtain pareto solution set. Finally, we used AHP decision method to determine the optimal dispatching scheme, realized output tracking loading and energy system power smoothing of energy system, and reduced the effect caused by the integration. The simulation results show that the scheduling strategy under two modes can improve the economy of wind-solar-thermal power storage system and the new energy dissipation capacity, reduce polluted gases emission, which verifies the effectiveness of the optimal scheduling model.

Key words: wind-solar-thermal power storage system; load tracking; power smoothing; optimized scheduling; NSGA-II; AHP

0 引言

为了缓解化石燃料枯竭给全球发展带来的危

机,我国电力事业在快速发展和推进结构转型。煤炭消费比重稳步下降,非化石能源占能源消费总量比重提高到 17.3%左右,新增电能替代电量 1 800 亿 kW·h 左右,风光发电发电量占全社会用电量的比重达到 12.2%左右。风光发电的不确定性和波动性,加大了电力系统的调峰负担,同时会导致火电机组频繁启停。发电系统^[1]现有调节能

收稿日期: 2022-08-27.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2019MS100).

力很难同时满足运行成本低、新能源消纳、环保的需求。因此有必要建立风光火储能源互补协调机制,从供电侧发掘灵活调节潜力,在满足负荷跟踪或功率平滑的同时,降低运行成本,增加新能源消纳,减少污染物排放。

近年来,国内外相关学者在风光火储能源系统优化调度领域展开了广泛研究。杜婷^[2]建立了多时间尺度调度模型,其中的日前调度模型以经济性为指标,在新能源利用率和环保性方面较差。曲炯辉^[3]以系统总运行成本为目标函数,建立了以经济性为主的单目标优化调度模型,并研究了不同场景下的优化调度策略。但没有考虑各类发电的初期建设成本,得到的结论与实际情况有差异。李铁^[4]提出了火电机组深度调峰的优化调度模型,通过深度调峰,更灵活地消纳风光出力,但是只考虑了负荷跟踪的情况,具有一定的局限性。檀勤良^[5]提出了以购电成本最小、新能源发电量最大、新能源出力平滑为目标的多目标优化调度模型,但其火电机组的启停造成了一定的经济损失。叶泽^[6]提出了考虑最优弃能率的优化调度模型,通过舍弃一定量的风光能源达到更好的经济目标,但是模型中的储能的充电只考虑来源于火电机组,不能很好地描述风光火储的协调调度。

本研究为了更好满足电网调度需求,提出了负荷跟踪和功率平滑两种出力模式。通过火电机组的深度调峰及储能系统充放电,实现优化调度模型的经济性、新能源消纳、环保性目标。

1 电池储能及火电建模

1.1 电池储能寿命折损模型

本文采用改进吞吐量法对储能寿命^[7-9]进行建模,公式如下:

$$E_{tp} = \sum_{i=1}^N 2E_b DOD_i n_i / N \quad (1)$$

式中: E_{tp} 为电池总吞吐量, E_b 为电池的额定容量, N 为总试验次数, DOD_i 为第 i 次试验的放电深度, n_i 是第 i 次试验的电池循环次数。

$f(SOC(t))$ 为吞吐量损耗权重因子,其与电池荷电状态的关系如图 1 所示。

由图 1 可知, SOC 较低时,吞吐量损耗权重因子更大,当 SOC 超过 0.5 左右时,吞吐量损耗权重因子随着 SOC 的增大而降低, $f(SOC(t))$ 的表达式如下:

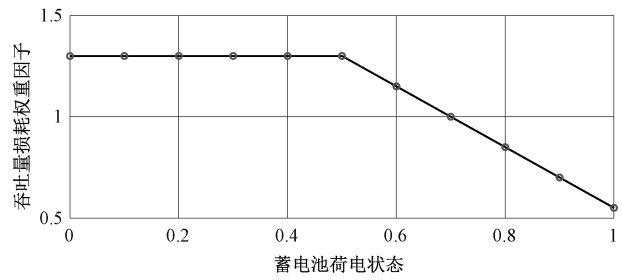


图 1 电池吞吐量损耗权重因子与荷电状态曲线图

Fig. 1 Graph of battery throughput loss weight factor and state of charge

$$f(SOC(t)) = \begin{cases} K & SOC(t) < \varepsilon \\ aSOC(t) + b & SOC(t) \geq \varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

式中: K, a, b 均为常数。

假定电池在 Δt 时间段内充放电功率不变,可得到电池在 Δt 时间段内累计吞吐量 E_{tp} 如下:

$$E_{tp} = \sum_{t=0}^T \int_0^T f(SOC(t)) | P(t) | \Delta t \quad (3)$$

式中: $P(t)$ 为 Δt 内的充放电功率。

电池的寿命损耗因子 L_{loss} 为累计吞吐量与总吞吐量之比:

$$L_{loss} = \frac{E_{tp}}{E_{tp}} \quad (4)$$

当寿命损耗因子 L_{loss} 为 1 时,表示电池寿命耗尽,需要更换设备。

1.2 考虑深度调峰的火电成本模型

在常规调峰阶段,火电机组的成本主要为煤耗成本^[10]:

$$C_{1,i}(t) = a_i P_{the,i}^2(t) + b_i P_{the,i}(t) + c_i \quad (5)$$

式中: $P_{the,i}(t)$ 为 t 时间内火电机组 i 的出力, a_i, b_i, c_i 为火电机组 i 的煤耗系数。

在不投油深度调峰阶段,除了要考虑煤耗成本,还需要考虑损耗成本。火电机组的深度调峰寿命折损成本可表示为

$$C_{2,i}(t) = C_{pur} / N_f \quad (6)$$

式中: C_{pur} 为火电机组的购置成本, N_f 为转子致裂循环周次。

在火电机组投油深度调峰阶段,需采取投油措施维持火电机组运行稳定,火电机组的投油成本为

$$C_{3,i}(t) = Q_{oil} C_{oil} \quad (7)$$

式中: Q_{oil} 为火电机组采取投油措施的耗油量, C_{oil} 为当月油价。

综上可得火电机组的运行成本可以用分段函数表示如下:

$$C_{\text{the},i}(t) = \begin{cases} C_{1,i}(t) & P_{a,i} \leq P_i(t) \leq P_{\max,i}, \\ C_{1,i}(t) + C_{2,i}(t) & P_{b,i} \leq P_i(t) < P_{a,i}, \\ C_{1,i}(t) + C_{2,i}(t) + C_{3,i}(t), & P_{c,i} \leq P_i(t) < P_{b,i} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{\max,i}$ 、 $P_{a,i}$ 、 $P_{b,i}$ 、 $P_{c,i}$ 分别为最大出力值、常规调峰最小出力值、不投油调峰最小出力值和投油调峰最小出力值。

2 多目标风光火储优化调度模型

根据上级调度指令,将风光火储能源系统出力分为两种模式:负荷跟踪模式、功率平滑模式。切换为负荷跟踪指令模式,风光火储能源系统的出力能够跟踪用电侧的负荷;切换为功率平滑模式,通过调整火电机组出力和储能充放电,来尽可能地平抑风光发电给系统出力带来的波动,增强风光火储能源系统的安全性、稳定性。

针对上述两种运行模式,制定风光火储能源系统运行成本最小、新能源消纳最多以及污染物排放最小的目标函数。

2.1 待优化参数

将1天分为24个调度时段,每个调度时段为1h,取决策变量如表1所示。

表1 决策变量 x_d 及说明

Tab. 1 Decision variables and explain	
变量名称	变量说明
$P_{\text{the},i}(t), i \in [1,5]$	火电机组1~5实时功率
$P_b(t)$	储能充放电实时功率(“+”为储能设备充电,“-”为储能设备发电)
$P_w(t)$	风力发电实时功率
$P_{pv}(t)$	光伏发电实时功率

2.2 目标函数

2.2.1 经济性目标函数

经济性目标函数^[11-15]主要考虑风光火储能源系统的发电成本 C_{ec} ,包括火电机组的发电成本 $C_{\text{the},i}$;考虑初始投资的风力发电成本 C_w 、光伏发电成本 C_{pv} ;电池储能充放电成本 C_b ;电池储能寿命折损成本 C_{bl} ,即

$$\min C_{ec}(x_d) = \min(C_{\text{the},1}(x_d) + C_{\text{the},2}(x_d) + C_{\text{the},3}(x_d) + C_{\text{the},4}(x_d) + C_{\text{the},5}(x_d) + C_w(x_d) + C_{pv}(x_d) + C_b(x_d) + C_{bl}(x_d)) \quad (9)$$

火电机组的运行成本根据式(8)得到。

风力发电成本 C_w 为

$$C_w(x_d) = \sum_{t=1}^T C_{\text{co}_w} P_w(t) \quad (10)$$

光伏发电成本 C_{pv} 为

$$C_{pv}(x_d) = \sum_{t=1}^T C_{\text{co}_{pv}} P_{pv}(t) \quad (11)$$

电池储能运行维护成本 C_b 为

$$C_b(x_d) = \sum_{t=1}^T C_{\text{co}_b}(t) P_b(t)$$

$$C_{\text{co}_b}(t) = \begin{cases} C_{\text{co}_b}^+(t), & P_b(t) > 0 \\ C_{\text{co}_b}^-(t), & P_b(t) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

电池储能寿命折损成本 C_{bl} 为

$$C_{bl}(x_d) = L_{\text{loss}} C_{\text{in}_b\text{ess}} \quad (13)$$

式中: C_{co_w} 、 $C_{\text{co}_{pv}}$ 、 C_{co_b} 为风电单位发电量总成本、光伏单位发电量总成本及电池储能单位充放电成本, $C_{\text{in}_b\text{ess}}$ 为电池储能的初始投资成本。

2.2.2 新能源消纳目标函数

新能源消纳的目标是减少弃风弃光量,计算方式为弃风弃光成本 C_{Ab} 最小,即

$$\min C_{Ab} = \min \sum_{t=1}^T (C_{a_w}(P_{r_w}(t) - P_w(t)) + C_{a_{pv}}(P_{r_{pv}}(t) - P_{pv}(t))) \quad (14)$$

式中:弃风弃光成本分别为 C_{a_w} 、 $C_{a_{pv}}$, $P_{r_w}(t)$ 、 $P_{r_{pv}}(t)$ 为 t 时段风力发电、光伏发电量。

2.2.3 环保性目标函数

能源系统的污染主要来自火电排放的 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等污染气体,排放系数 λ_e 如表2所示。

表2 污染物排放系数

Tab. 2 Pollutant emission coefficient			
排放气体	CO_2	SO_2	NO_x
排放系数(kg/(MW·h))	326.47	3.54	1.03

污染气体 f_{pe} 最少的环保性目标函数如下:

$$\min f_{pe} = \min \sum \lambda_e (P_{\text{the},1}(t) + P_{\text{the},2}(t) + P_{\text{the},3}(t) + P_{\text{the},4}(t) + P_{\text{the},5}(t)) \Delta T \quad (15)$$

2.3 约束条件

2.3.1 负荷跟踪^[16-20]模式

(1)功率平衡约束:

$$P_{\text{in}_\text{load}}(t) = \sum_{i=1}^N P_{\text{the},i}(t) + P_w(t) + P_{pv}(t) + P_b(t) \quad (16)$$

式中: $P_{\text{in}_\text{load}}(t)$ 为 t 时刻电网电负荷调度指令。

(2) 电池储能荷电状态约束:

$$\underline{SOC} \leq SOC(t) \leq \overline{SOC} \quad (17)$$

式中: $SOC(t)$ 为 t 时刻电池储能的荷电状态, \overline{SOC} 、 \underline{SOC} 为荷电状态的上下限, 一般设置荷电状态上下限为 0.1~0.9。为了储能系统能有合适的电量用于充放电, 需要令调度开始时刻荷电状态 SOC_{init} 与结束时刻荷电状态 SOC_{final} 相同, 即

$$SOC_{init} = SOC_{final} \quad (18)$$

(3) 功率上下限约束:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{c,i} \leq P_{the,i}(t) \leq P_{max,i} \quad i \in [1,5] \\ \underline{P}_b \leq P_b(t) \leq \overline{P}_b \\ 0 \leq P_w(t) \leq \overline{P}_w \\ 0 \leq P_{pv}(t) \leq \overline{P}_{pv} \end{array} \right. \quad (19)$$

式中: \overline{P}_b 、 \underline{P}_b 为电池储能功率上下限, \overline{P}_w 为风电功率上限, \overline{P}_{pv} 为光伏发电功率上限。

(4) 火电机组爬坡速率约束:

$$|P_{the,i}(t+1) - P_{the,i}(t)| \leq P_{v,i}, \quad i \in [1,5] \quad (20)$$

式中: $P_{v,i}$ 为第 i 个火电机组的最大爬坡速率。

(5) 火电机组备用容量约束:

$$\sum_{i=1}^N P_{max,i} \geq R(t) + P_{in_load}(t) \quad (21)$$

式中: $R(t)$ 为 t 时刻电力系统的备用容量要求。

2.3.2 功率平滑模式

(1) 功率平滑约束:

$$|P_{op}(t) - P_{op,a}| \leq \mu_{op} \quad (22)$$

式中: $P_{op}(t)$ 为 t 时刻风光火储能源系统出力值, $P_{op,a}$ 为风光火储能源系统出力曲线的平均值, μ_{op} 为出力曲线的最大波动幅度。

(2) 其余约束条件同负荷跟踪模式的(2)~(5)约束条件。

3 算例分析

本文选取的风光火储能源系统的配置如下: 风力发电 300 MW、光伏发电 200 MW、储能容量 450 MW·h、储能功率 100 MW, 弃风成本为 600 元/(MW·h), 弃光成本为 500 元/(MW·h)。5 台火电机组的参数^[4]如表 3 所示。

表 3 火电机组基本参数

出力上限/ MW	出力下限/ MW	爬坡速率/ (MW·h)	燃料成本系数		
			a_i	b_i	c_i
460	138	80	0.021	21	1 313.5
300	90	80	0.07	24	471
240	72	60	0.08	21.6	480.3
120	36	45	0.05	23.2	639.4
130	39	45	0.06	16.5	502.7

选取 24 h 为一个调度周期, 1 h 为调度时长, 风电、光伏发电及电网负荷预测曲线如图 2 所示。

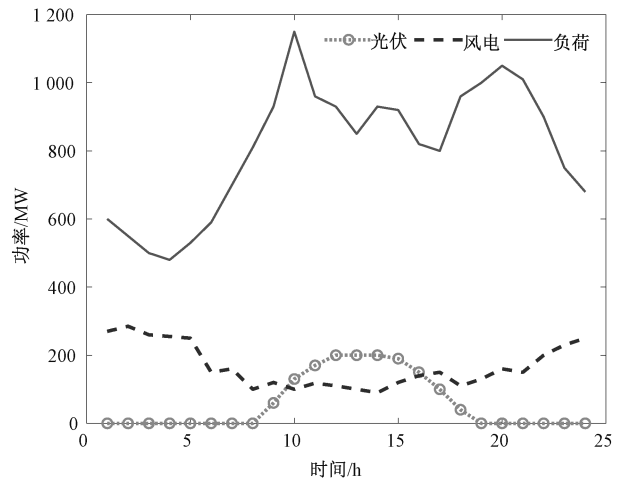


图 2 风电、光伏发电及电网负荷预测曲线图

Fig. 2 Wind power, photovoltaic power generation and grid load forecasting curve

3.1 负荷跟踪模式的调度模型求解

设置 NSGA-II 算法中的种群规模 $N_{pop} = 150$, 最大迭代次数 $g_{max} = 80\ 000$, 突变率 $P_m = 0.7$, 交叉率 $P_c = 0.9$ 。模型求解得到 Pareto 前沿如图 3 所示。

在图 3 中, 位于边缘的解分别为最经济、新能源消纳最多、最环保的单项指标最优调度方案。三种调度方案的目标函数值如表 4 所示。

表 4 调度方案目标函数值

目标函数	经济性/元	弃风弃光/元	污染气体/kg
最经济方案	6 239 670	1 702 965	5 610 275
新能源消纳方案	7 134 553	598 058	5 001 709
最环保方案	7 076 916	657 713	4 988 871

分析表 4 可知, 最经济性方案比新能源消纳最多方案发电成本降低 12.5%, 但是弃风弃光成

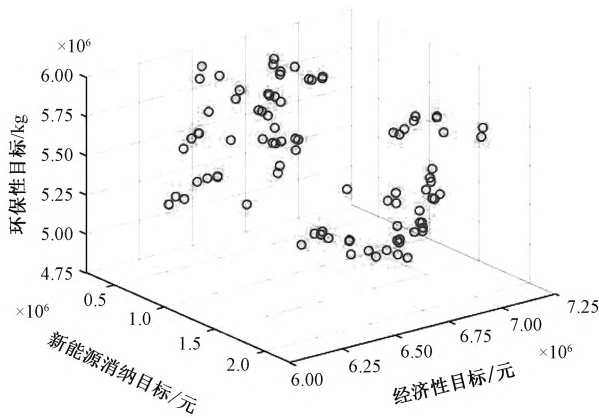


图3 负荷跟踪模式优化调度的 Pareto 前沿

Fig. 3 Pareto frontier of load tracking mode optimal

本上升了 184.7% ;比最环保方案发电成本降低 11.8%,但是多排放出 12.4%的污染气体。新能源消纳最多方案比最环保方案发电成本多 57 637 元,弃风弃光成本少 59 655 元,排放气体多 12 838 kg。可见经济性目标和新能源消纳、环保性目标是此消彼长的关系。绘制三种方案的调度结果如图 4~图 6。

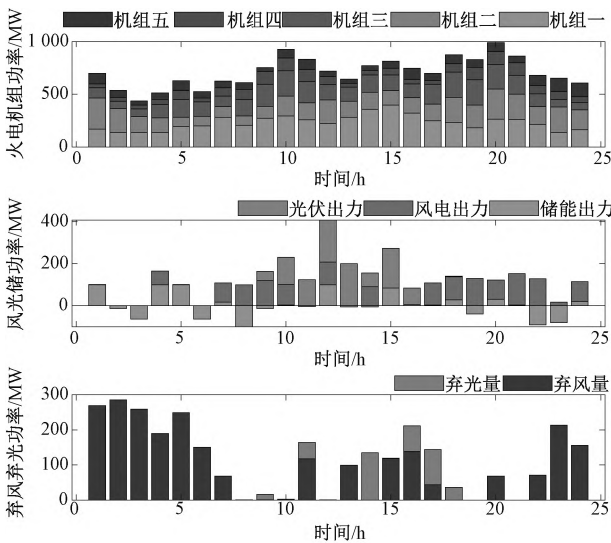


图4 最经济优化调度方案

Fig. 4 The most economical optimal scheduling scheme

最经济优化调度方案中,0~6 小时是用电低谷时段,这个时段弃风现象比较严重。在中午和晚上两个用电高峰期,电网负荷增大,弃风弃光相对降低。

图 5 中,在 0~6 时段,降低了火电机组的出力,配合储能的充电,降低弃风功率。与最经济性方案相比,火电机组深度调峰出现频率明显增多。

与前两个方案相比,最环保优化调度方案的

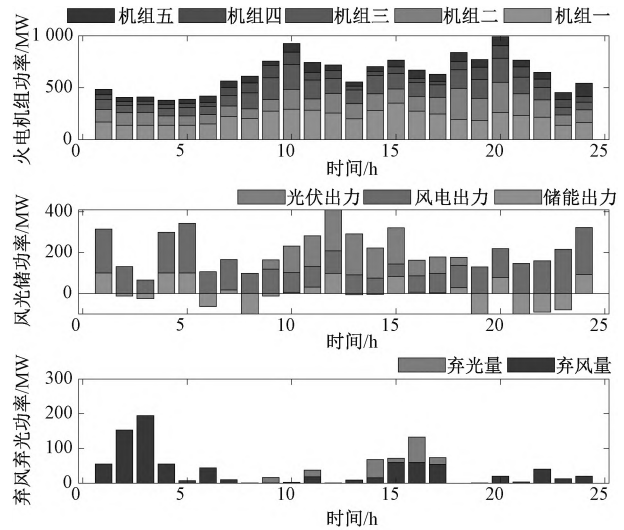


图5 新能源消纳优化调度方案

Fig. 5 New energy consumption and dispatching scheme

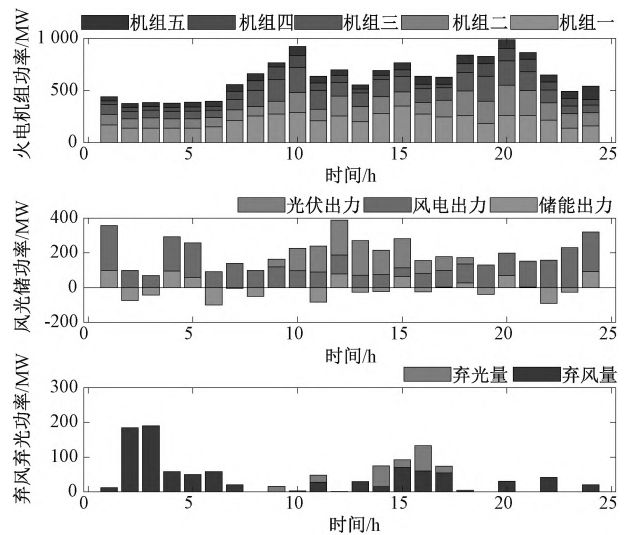


图6 最环保优化调度方案

Fig. 6 The most environmentally optimal scheduling scheme

弃风弃光功率也比较低,同时配合储能系统的放电,进一步降低火电机组的出力,减少污染性气体的排放。在风光出力较多的时间段,储能系统充电维持电量在合理范围内。

利用 AHP 法求解最优调度方案,构建两两比较判断矩阵 A,如表 5 所示,分析三个决策因素的权重。

表5 比较矩阵 A

Tab. 5 Comparison matrix A

重要性	经济性	新能源消纳	环保性
经济性	1	3	5
新能源消纳	1/3	1	3
环保性	1/5	1/3	1

层次单排序、经一致性校验和各指标归一化,得到权重值为 $W=[0.427\ 68\ 0.335\ 21\ 0.237\ 10]$,选取最佳调度方案如图 7。

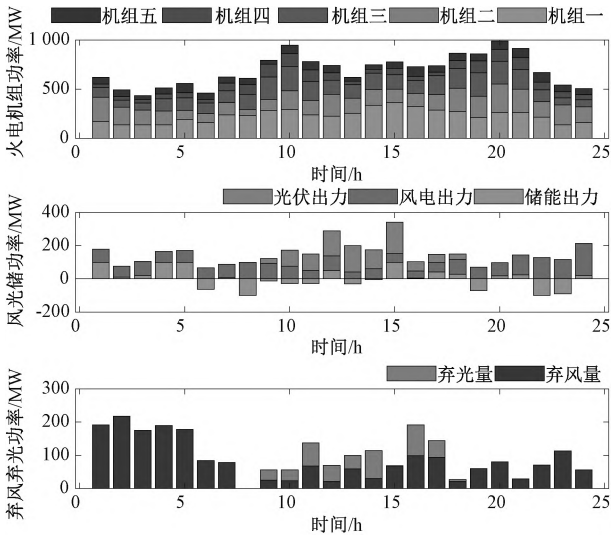


图 7 最优调度方案

Fig. 7 Optimal scheduling scheme

最优方案的平均功率差为 0.434 1 MW,平均误差率为 0.05%,可以很好地跟踪电网负荷。最优方案的火电出力高于新能源消纳和最环保方案,低于最经济方案;弃风弃光高于新能源消纳和最环保方案,低于最经济方案。三个目标函数值分别为:6 393 637 元、1 448 144 元、5 463 829 kg。

3.2 功率平滑模式的调度模型求解

设置 NSGA-II 算法中的参数同小节 3.1,得到三个单项指标最优方案如表 6 所示,Pareto 前沿如图 8 所示。

表 6 调度方案目标函数值

目标函数	经济性/元	弃风弃光/元	污染气体/kg
最经济方案	7 259 498	1 223 461	6 658 289
新能源消纳方案	7 791 151	239 384	6 057 121
最环保方案	7 706 148	278 608	5 979 179

分析表 6 可知,最经济性方案比新能源消纳最多方案发电成本降低 6.8%,但是弃风弃光成本上升了 411.0%;比最环保方案发电成本降低 5.7%,但是多排放出 11.4%的污染气体。绘制三种方案的调度结果如图 9~图 11。

从图 9 可知,功率平滑模式下的火电出力与负荷跟踪模式有所不同,风光多发时,火电出力减少;风光少发时,火电出力增加,使得能源系统总功率曲线平滑。2~5 h 的弃风弃光现象比较

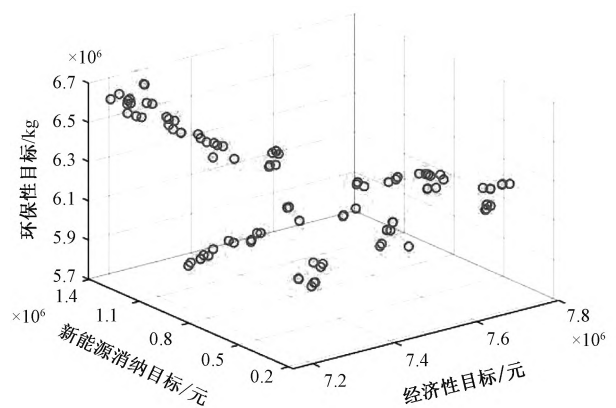


图 8 功率平滑模式优化调度的 Pareto 前沿

Fig. 8 Pareto frontier of power smoothing mode optimal scheduling

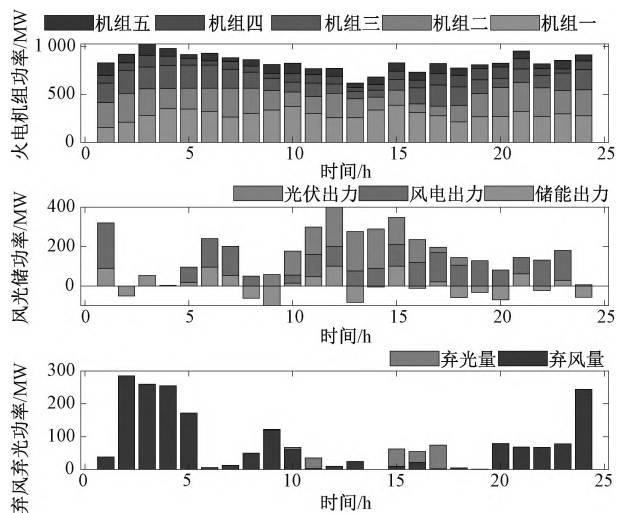


图 9 最经济优化调度方案

Fig. 9 The most economical optimal scheduling scheme

严重。

与最经济方案相比,新能源消纳方案的弃风弃光功率明显减少,减小了夜间火电机组出力。与模式一的新能源消纳最多方案相比,在 0~6 h 内弃风功率减少 490 MW,在整个调度周期内,火电机组出力波动更小,弃风弃光功率减少 624.97 MW。

与模式一相比,0~6 h 储能充放电功率减小,7~13 h 储能充放电功率增加,在 18 h 后储能主要以放电为主,进一步降低火电出力,减少污染性气体的排放。

利用 AHP 法求解最优调度方案,比较矩阵如表 7 所示。

层次单排序、经一致性校验和各指标归一化,得到权重值为 $W=[0.398\ 6\ 0.333\ 0\ 0.268\ 4]$,选

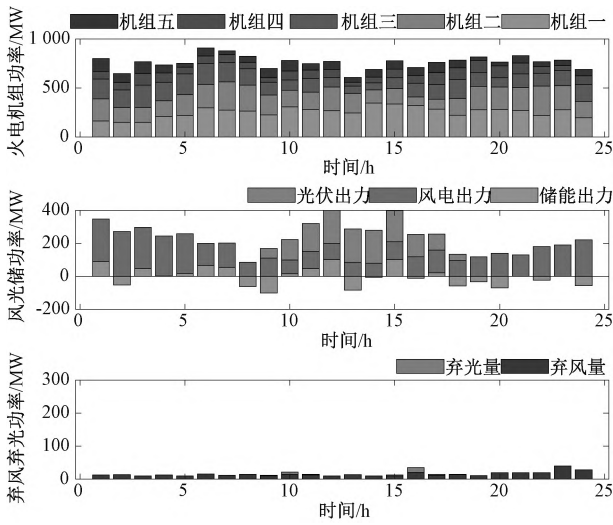


图 10 新能源消纳优化调度方案

Fig. 10 New energy consumption and dispatching scheme

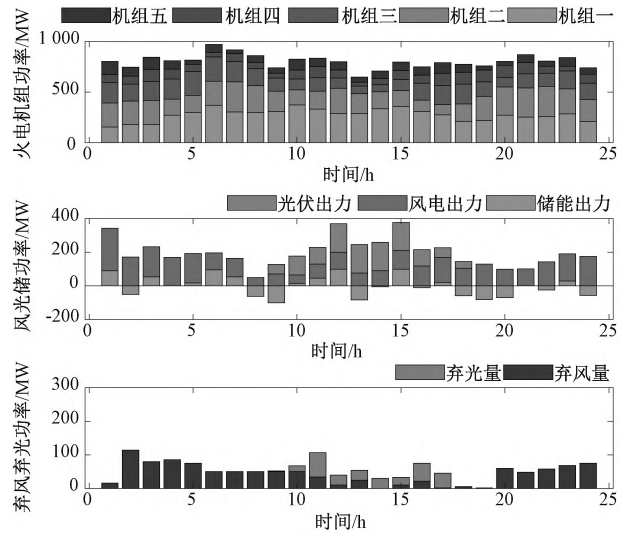


图 12 最优调度方案

Fig. 12 Optimal scheduling scheme

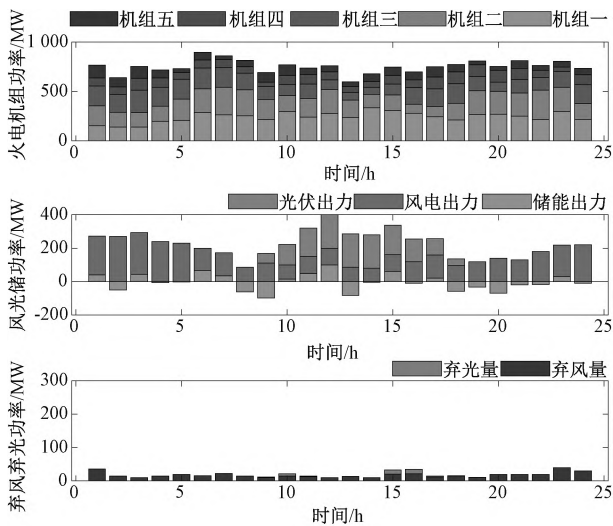


图 11 最环保性优化调度方案

Fig. 11 The most environmentally optimal scheduling scheme

取最佳调度方案如图 12 所示。

表 7 比较矩阵 A

Tab. 7 Comparison matrix A

重要性	经济性	新能源消纳	环保性
经济性	1	2	3
新能源消纳	1/2	1	2
环保性	1/3	1/2	1

最优调度方案的负荷波动幅度不超过 0.5%，经济性、新能源消纳和环保性目标值分别为：7 496 699 元、772 376 元、6 376 254 kg。与负荷跟踪模式相比，功率平滑模式的经济性、环保性更差些，原因是为了满足功率平滑的目标，需要风光火储能源系统的出力一直维持在比较高的水平。

4 结论

风电、光伏新能源发电具有随机性、波动性等特点，并入电网对电网的稳定性会造成冲击。根据电网的不同需求，提出一种不同供电模式的风光火储能源系统多目标优化调度方法，得到如下结论：

(1) 针对负荷跟踪模式，利用火电机组深度调峰和储能的充放电，提出了以经济性、新能源消纳、环保性为目标函数的调度方案。该方案可以在跟踪电网负荷的同时，降低风光火储能源系统的运行成本，减少弃风弃光，减少污染气体的排放。

(2) 对于功率平滑模式，提出的多目标调度方案可以减少风光火储能源系统总功率的波动，从而减小并入电网带来的冲击。

(3) 若针对负荷跟踪和功率平滑，电网调度指定没有明确要求，可以根据自身需求，选取不同调度方案。负荷跟踪模式的优化调度方案，系统的运行成本更低；功率平滑模式的优化调度方案，系统新能源消纳更多，环保性更好。

参考文献：

[1] 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. Analysis on key factors of new energy consumption and research on solutions [J]. Proceedings of the CSEE,

- 2017, 37 (1): 1-9 (in Chinese).
- [2] 杜婷. 风光水火储联合系统多时间尺度协调调度研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
DU Ting. Research on multi time scale coordinated dispatching of combined wind, water and fire storage system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020 (in Chinese).
- [3] 曲炯辉. 风光火储发电系统互补调度方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
QU Tonghui. Research on the complementary scheduling method of wind, solar and thermal storage power generation system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019 (in Chinese).
- [4] 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. Complementary, coordinated and optimized dispatching of wind, water, fire and energy storage multi energy system considering peak shaving initiative [J]. Power System Technology, 2020, 44 (10): 3622-3630 (in Chinese).
- [5] 檀勤良, 丁毅宏, 李渝, 等. 考虑经济-环境平衡的风光火联合外送调度策略多目标优化 [J]. 电力建设, 2020, 41 (8): 129-136.
TAN Qinliang, DING Yihong, LI Yu, et al. Multi-objective optimization of the dispatch strategy of combined wind power and fire transmission considering economic environmental balance [J]. Electric Power Construction, 2020, 41 (8): 129-136 (in Chinese).
- [6] 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 optimal economic dispatch of combined wind power, fire and storage system considering optimal energy rejection rate [J]. Power System Technology, 2021, 45 (6): 2270-2280 (in Chinese).
- [7] 江朝朝. 独立微电网系统优化设计与经济调度研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
JIANG Chaochao. Research on optimal design and economic dispatch of independent micro grid system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [8] 谢鹏, 蔡泽祥, 刘平, 等. 考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储微电网系统储能容量协同优化 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (24): 7126-7136.
XIE Peng, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Collaborative optimization of energy storage capacity of wind power storage microgrid system considering the influence of multi time scale uncertainty coupling [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (24): 7126-7136 (in Chinese).
- [9] HAGHDAR K. Optimal DC source influence on selective harmonic elimination in multilevel inverters using teaching-learning based optimization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67 (2): 942-949.
- [10] 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 peak shaving capacity and economy of power system considering uncertainty of wind and power output [J]. Power System Technology, 2022, 46 (5): 1752-1761 (in Chinese).
- [11] 彭道刚, 张孟然, 沈丛奇, 等. 考虑不同控制策略下的多能互补能源互联网优化调度 [J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37 (1): 17-28.
PENG Daogang, ZHANG Mengran, SHEN Congqi, et al. Optimal scheduling of multi energy complementary energy internet considering different control strategies [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37 (1): 17-28 (in Chinese).
- [12] 秦泽宇, 马瑞, 张强, 等. 考虑风光互补的电力系统多目标随机优化发电方案研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30 (3): 53-60.
QIN Zeyu, MA Rui, ZHANG Qiang, et al. Study on multi-objective stochastic optimal generation scheme of power system considering wind and solar energy complementarity [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30 (3): 53-60 (in Chinese).
- [13] 许丹, 王斌, 张加力, 等. 特高压直流外送风光火电力一体化调度计划模型 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (6): 25-29+57.
XU Dan, WANG Bin, ZHANG Jiali, et al. Integrated dispatching planning model of UHV DC transmission, wind power, thermal power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40 (6): 25-29+57 (in Chinese).
- [14] BISWAS P, SUGANTHAN P, AMARATUNGA G. Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power [J]. Energy Conversion & Management, 2017, 148: 1194-1207.

(下转第117页)

- the limestone/gypsum wet flue gas desulphurization system [D]. Nanjing: Southeast University, 2015 (in Chinese).
- [15] DAVID N. Reshef et al. Detecting novel associations in large data sets [J]. *Science*, 2011, 334 (6062): 1518–1524.
- [16] 吕游. 基于过程数据的建模方法研究及应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
Lǚ You. The research and application of data-based process modeling methods [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014 (in Chinese).
- [17] GU Y, ZHAO W, WU Z. Online adaptive least squares support vector machine and its application in utility boiler combustion optimization systems [J]. *Journal of Process Control*, 2011, 21 (7): 1040–1048.
- [18] 张冲冲. 基于 LSTM 深度网络和改进核极限学习机的短期电力负荷预测 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
ZHANG Chongchong. Short-term load forecasting based on LSTM deep neural network and improved kernel extreme learning machine [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019 (in Chinese).
-
- 作者简介:**
闫浩思 (1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为燃煤电站脱硫系统优化控制, E-mail: yanhaosi123@163.com;
赵文杰 (1968), 男, 副教授, 通信作者, 研究方向为数据驱动建模方法及应用, E-mail: zwj12342234@126.com。
-
- (上接第 107 页)
- [15] WANG X, CHANG J, MENG X, et al. Short-term hydro-thermal-wind-photovoltaic complementary operation of interconnected power systems [J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 945–962.
- [16] 李湃, 方保民, 祁太元, 等. 基于源-荷匹配的区域电网风/光/储容量配比优化方法 [J]. *中国电力*, 2022, 55 (1): 46–54.
LI Pai, FANG Baomin, QI Taiyuan, et al. Optimization method of wind / light / storage capacity ratio of regional power grid based on source load matching [J]. *Electric Power*, 2022, 55 (1): 46–54 (in Chinese).
- [17] 程临燕, 冯艳虹, 徐林. 基于风光互补出力特性的可消纳容量研究 [J]. *中国电力*, 2019, 52 (7): 63–68.
CHENG Linyan, FENG Yanhong, XU Lin. Study on the absorptive capacity based on the output characteristics of wind and solar complementary [J]. *Electric Power*, 2019, 52 (7): 63–68 (in Chinese).
- [18] DUPIN N, ELHAZALI T. Parallel metaheuristics for the discrete unit commitment problem with min-stop ramping constraints [J]. *International Transactions in Operational Research*, 2020, 27 (1): 219–244.
- [19] XU L, WANG Z, LIU Y. The spatial and temporal variation features of wind-sun complementarity in China [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 154: 138–148.
- [20] RABIEE A, MOHSENI-BONAB S. Maximizing hosting capacity of renewable energy sources in distribution networks: a multi-objective and scenario-based approach [J]. *Energy*, 2017, 120: 417–430.
-
- 作者简介:**
吴庆泽 (1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为系统建模与仿真、新能源发电, E-mail: 1697370643@qq.com;
吕丽霞 (1963), 女, 副教授, 研究方向为热工系统建模仿真与控制, E-mail: lvlixia63@163.com;
刘长良 (1966), 男, 教授, 研究方向为风力发电技术及故障诊断, E-mail: 13603123513@163.com;
刘卫亮 (1983), 男, 副教授, 研究方向为新能源发电与微电网控制, E-mail: lwlfengzhiying@163.com。