

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240128

# 基于变时段设计改进多目标差分进化算法的风/光/火/储 日前优化调度

齐 郑<sup>1</sup>, 徐希茜<sup>1</sup>, 熊 巍<sup>2</sup>, 陈艳波<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 陕西黄河集团有限公司, 陕西 西安 710005)

**摘要:** 在高比例新能源馈入的新型电力系统中, 新能源出力的不确定性导致火电难以满足调度计划的精度需求, 风/光/火/储系统的经济调度求解算法面临严峻挑战。为此, 提出一种基于变时段设计的多目标差分进化算法。首先按各时段负荷特征构建风/光/火/储系统的变时段日前调度规则。进而以系统运行经济成本与污染排放量为目标, 基于多目标差分进化算法求解变时段系统日前调度模型的 Pareto 解集。最后, 用 IEEE 39 节点系统进行测试。结果表明在风、光、储与火电的约束条件均符合校验的情形下, 相较于其他算法, 该方法使计算结果更加优化, 火电机组出力跟踪调度计划效果显著提高, 验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 风/光/火/储系统; 变时段设计; 日前调度计划; 多目标差分进化算法; 优化调度

## An improved multi objective differential evolution algorithm based on variable time period design for a wind/photovoltaic/thermal/storage system day ahead optimization scheduling

QI Zheng<sup>1</sup>, XU Xixi<sup>1</sup>, XIONG Wei<sup>2</sup>, CHEN Yanbo<sup>1</sup>

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

2. Shaanxi Yellow River Group Co., Ltd., Xi'an 710005, China)

**Abstract:** In the new power system, with a high proportion of new energy, the uncertainty of new energy output not only makes it difficult for thermal power to meet the accuracy requirements of scheduling plans, but also poses serious challenges to the economic scheduling algorithm for wind/photovoltaic/thermal/storage systems. For this reason, a multi-objective differential evolution algorithm based on variable time period design is proposed. First, the variable time period day ahead scheduling rules of a wind/photovoltaic/thermal/storage system are constructed according to the load characteristics of each time period. Then, taking the economic cost of system operation and the amount of pollution emission as the objectives, the Pareto solution set of the day ahead scheduling model of the system with variable time periods is solved based on the multi-objective differential evolution algorithm. Finally, the IEEE 39-bus system is tested. The results show that, under the constraint conditions of wind, photovoltaic power, storage, and thermal power all meet the verification criteria. Compared to other algorithms, the objective function obtained by the proposed method tends to be optimal, and the effectiveness of the thermal power unit output tracking scheduling plan is significantly improved, verifying the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077076).

**Key words:** wind/photovoltaic/thermal/storage system; variable time period design; day ahead scheduling plan; multi-objective differential evolution algorithm; optimized dispatching

## 0 引言

我国正在大力推动“双碳”目标的实现, 新能

源在电力系统中占比显著提升, 但新能源出力的间歇性和随机性严重威胁电力系统稳定运行<sup>[1-3]</sup>。在新能源渗透率较高的电力系统中, 火电机组的调度能力往往难以精准地满足跟踪净负荷变化的需求, 启停状况和运行状况逐渐恶化<sup>[4-7]</sup>。为应对此情形, 抽

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077076)

水蓄能电站与火电机组联合调度的运行方式得到了快速发展<sup>[8-10]</sup>。抽水蓄能电站作为一种具备双向快速响应能力的大容量储能方式,能更有效地应对新能源发电的波动性,进一步提高新型电力系统的稳定性和调度灵活性。如何更有效地实现新型电力系统中火电与抽水蓄能的协同运行,已成为该领域研究的关键技术之一<sup>[11-14]</sup>。

在新型电力系统火电与抽蓄协同运行的相关研究中,从经济成本角度考虑,文献[15-16]考虑源侧与需求侧的波动性特点,提出风-热-储能三阶段随机多目标的主辅市场日前调度方法。但该方法忽视了多时间尺度特性对源-储-荷模型的影响。为此,有研究者以高分辨率数据集来制定日前调度计划,旨在通过更精细化的时间尺度实现更精准的负荷跟踪,并进一步降低运行成本<sup>[17-18]</sup>。除经济成本外,发电的环境成本同样重要。在火电机组调度过程中,必须严格控制SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>等大气污染物的排放,将其控制在最低限度<sup>[19]</sup>。

兼顾经济成本和环境成本的风/光/火/储日前调度问题,是一个高维、复杂且涉及多目标优化的问题。在处理具有复杂特征的风/光/火/储系统的多目标联合调度问题时,常采用多目标粒子群优化算法、竞争粒子群优化算法与多目标差分进化算法等进行求解。文献[20-21]指出,由于多目标差分进化算法流程有变异交叉、环境适应等环节,且具备自适应的步长和搜索方向,使得该算法有较高的收敛速度及丰富的种群多样性,因此在工程领域得到了广泛应用。

文献[22]基于扩展多目标差分进化算法来处理在新能源不确定出力下的电力系统经济调度问题。虽然该方法在经济调度中已验证具有较好的收敛性,但在高分辨率下存在火电精准跟踪负荷与求解时长之间的矛盾。为此,文献[23-24]提出了分段式日前调度优化方案,该方案在算法前期提高数据分辨率,而在后期更换为较为粗略的时间尺度,通过仿真验证,该方法能够有效解决新能源波动性导致的火电爬坡能力难以满足需求的问题。同时,文献[25]提出一种将低分辨率数据处理任务转移至高分辨率数据时段的方案,从而提高了火电跟踪净负荷的能力。为进一步依据各时段特点设计火-储-荷的变时段控制规则,文献[26]采用高斯混合模型对净负荷进行时序特性聚类,以此为基础来优化日前调度。

上述研究表明在高分辨率时间尺度下,系统中火电机组调度计划精度需求能够得到较好的满足。然而,频繁改变火电机组出力状态以实现跟踪与经

济运行原则相违背,且随着数据集分辨率的提高,多目标差分进化算法的求解过程也会变得更繁琐。

基于上述原因,本文按各时段负荷特征构建风/光/火/储系统的变时段日前调度规则,以系统运行经济成本与污染排放量为目标,提出基于变时段设计的改进多目标差分进化算法,兼顾优化模型的高求解效率与火电的净负荷强跟踪能力。

本文首先建立风/光/火/储系统模型,详细介绍基于变时段设计的多目标差分进化算法的流程;然后构造考虑变时段的火-储-荷优化调度模型;最后用IEEE 39节点系统进行测试,并进行约束校验与算法性能的对比分析。

## 1 风/光/火/储系统模型

为了不失一般性,本文构建了含抽水蓄能电站的风/光/火/储新型电力系统模型,结构如图1所示。图中: $P_{w,t}$ 、 $P_{pv,t}$ 、 $P_{g,t}$ 、 $P_{ps,t}$ 、 $P_{L,t}$ 分别为 $t$ 时刻的风电站出力、光伏电站出力、火电站出力、抽水蓄能电站出力以及总负荷。

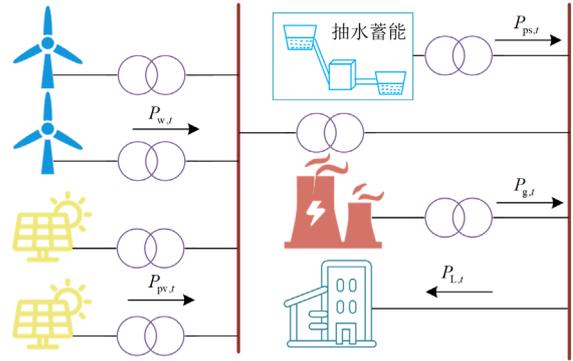


图1 风/光/火/储新型电力系统模型

Fig. 1 A new power system model for wind/photovoltaic/thermal/storage system

为便于分析火电站出力计划并建立含抽水蓄能电站的新型电力系统的经济调度模型,本文将 $P_{w,t}$ 与 $P_{pv,t}$ 引入原始负荷需求中,得到净负荷需求 $P_{pl,t}$ ,如式(1)所示。

$$P_{pl,t} = P_{L,t} - P_{w,t} - P_{pv,t} \quad (1)$$

图2为风/光/火/储新型电力系统的净负荷曲线,其数据来自西北某省电网日内采集数据。系统由风电站、光伏电站、火电站以及抽水蓄能电站系统组成,为保证高比例新能源馈入时较高的消纳率,系统净负荷需求特性曲线波动剧烈,仅靠火电站进行调峰无法满足精确跟踪计划出力的需求,同时也在部分时段无法满足系统的调度需求。因此,选择额外调配抽水蓄能电站辅助火电站进行调度以平抑净负

荷需求特性曲线的剧烈波动显得尤为重要。

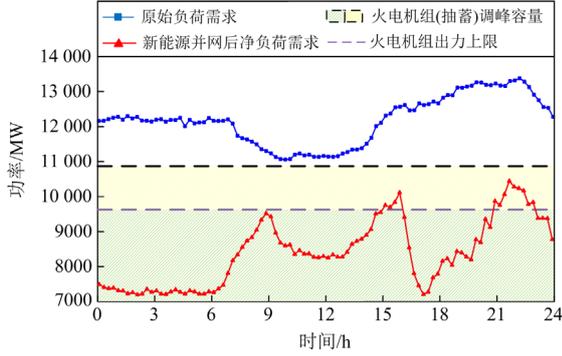


图2 风/光/火/储新型电力系统的净负荷曲线

Fig. 2 Net load curve in a new type of wind/photovoltaic/thermal/storage power system

## 2 变时段多目标差分进化算法的流程

### 2.1 变时段数据集划分

变时段数据集的划分需一定量标准作为判定阈值，可通过净负荷在单数据点邻域内的梯度均值  $K_{b,av}$ 、标准差  $K_{b,st}$ 、邻域内方向变化频次均值  $f_{b,av}$  与标准差  $f_{b,st}$  来界定<sup>[23]</sup>。定义  $K_{T,av}$ 、 $K_{T,st}$ 、 $f_{T,av}$ 、 $f_{T,st}$  为上述参数阈值。为降低模型复杂度，变时段数据集可划分为三类。

1) 满足  $K_{b,av} \geq K_{T,av}$ 、 $K_{b,st} \geq K_{T,st}$ 、 $f_{b,av} \geq f_{T,av}$ 、 $f_{b,st} \geq f_{T,st}$  时，净负荷数据集在某邻域内，幅值波动剧烈、梯度方向变化频次较高，定义为高分辨率时段  $T_H$ ，日前调度计划分辨率取 15 min 为时间尺度，以应对复杂度较高的净负荷特性曲线。

2) 满足  $K_{b,av} \geq K_{T,av}$ 、 $K_{b,st} \geq K_{T,st}$ 、 $f_{b,av} \leq f_{T,av}$ 、 $f_{b,st} \leq f_{T,st}$  时，净负荷数据集在某邻域内，幅值波动剧烈、梯度方向变化频次较低，定义为中分辨率时段  $T_M$ ，日前调度计划分辨率取 30 min 为时间尺度，以应对具有明显升降趋势的净负荷特性曲线。

3) 满足  $K_{b,av} \leq K_{T,av}$ 、 $K_{b,st} \leq K_{T,st}$  时，净负荷数据集在某邻域内，幅值波动不剧烈，净负荷特性曲线总体呈现平稳趋势，定义为低分辨率时段  $T_L$ ，日前调度计划分辨率取 60 min 为时间尺度。

### 2.2 变时段调度规则设计

基于变时段数据集的划分可得三类时段的净负荷特性，如图3所示。为保证含抽蓄电站的新能源电力系统协调经济运行，需要对火电站、抽蓄电站的出力特性进行分时段控制。

1) 在高分辨率时段  $T_H$ ，虽然净负荷特性曲线呈

剧烈波动且梯度方向频繁改变的特征，但未见显著增减趋势，无需火电站进行大容量爬坡出力，由抽蓄机组联合火电机组运行进行净负荷曲线跟踪。

2) 在中分辨率时段  $T_M$ ，净负荷特性曲线呈显著升降趋势，需火电站进行大容量爬坡出力，此时采用伴随抽蓄机组辅助的火电站常规运行模式进行跟踪。

3) 在低分辨率时段  $T_L$ ，净负荷特性曲线呈平稳趋势，无需火电站进行大容量爬坡出力，由抽蓄机组可进行波动平抑，火电站运行方式为定功率。

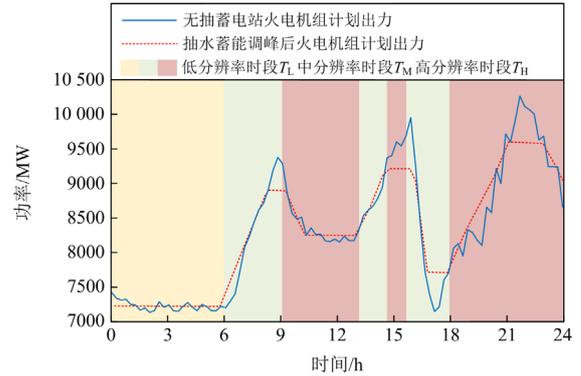


图3 变时段处理后的火电机组日前调度计划

Fig. 3 Day ahead dispatching plan of thermal power unit after variable time interval treatment

## 3 考虑变时段的风/光/火/储优化调度模型

### 3.1 目标函数

为方便计算系统成本并降低日前调度模型的复杂性，假设风光运行成本为 0，只有火电机组消耗化石燃料，系统的运行成本取决于火电燃料费用和抽水蓄能的运行成本。系统运行成本  $f_1$  包括燃料费用  $f_{11}$  与抽水蓄能运行成本  $f_{12}$ 。

$$f_1 = f_{11} + f_{12} \quad (2)$$

$$f_{11} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} [A_{i,2} \times (P_{g(i,t)})^2 + A_{i,1} \times P_{g(i,t)} + A_{i,0}] \quad (3)$$

$$f_{12} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_p} \left[ \left( E_{cp,ps} + \frac{E_{g,ps}}{\eta_p} \right) \times \eta_g \times K_{g,t} \times P_{ps(i,t)} + \left( E_{cp,ps} + \frac{E_{s,ps}}{\eta_p} \right) \times \eta_s \times K_{s,t} \times P_{ps(i,t)} \right] \quad (4)$$

式中： $T$  为总运行时间段； $A_{i,2}$ 、 $A_{i,1}$ 、 $A_{i,0}$  为第  $i$  台机组的耗量特性系数； $P_{g(i,t)}$  为第  $i$  个火电机组  $t$  时刻的出力； $P_{ps(i,t)}$  表示第  $i$  个抽水蓄能电站  $t$  时刻的出力； $N_g$ 、 $N_p$  分别为火电机组与抽水蓄能水电站的总数； $K_{s,t}$  为  $t$  时刻抽水蓄能电站抽水机组的数

量;  $K_{g,t}$  为  $t$  时刻抽水蓄能电站发电机组的数量;  $\eta_g$ 、 $\eta_s$  分别为抽水蓄能电站发电与蓄水状态经济系数;  $E_{cp,ps}$  为单位运行成本;  $E_{g,ps}$ 、 $E_{s,ps}$  分别为水电站发电与蓄水运行消耗的单位电费;  $\eta_p$  为抽水蓄能电站能量转化效率。

此外, 运行费用还考虑弃电惩罚成本  $f_2$  和发电机组运行时所产生有害气体(如  $SO_2$ 、 $CO_2$ ) 的环境成本  $f_3$ ,  $f_2$  为弃风、弃光成本之和。

$$f_2 = \sum_{t=1}^T [\xi_w \Delta P_{w,t} + \xi_{pv} \Delta P_{pv,t}] \quad (5)$$

$$f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\alpha_i + \beta_i P_{g(i,t)} + \gamma_i (P_{g(i,t)})^2 + \eta e^{\delta \cdot g(i,t)}] \quad (6)$$

式中,  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $\eta$ 、 $\delta$  为第  $i$  台常规机组的污染气体排放特征系数;  $\xi_w$ 、 $\xi_{pv}$  分别为风、光弃量的惩罚费用;  $\Delta P_{w,t}$  为  $t$  时刻弃风总量;  $\Delta P_{pv,t}$  为  $t$  时刻的弃光总量。

多目标函数可表示为经济成本最优与环境成本最优的联合最优解集。

$$\begin{cases} \min F_1 = \min(f_1 + f_2) \\ \min F_2 = \min f_3 \end{cases} \quad (7)$$

$$\min F = \min(F_1, F_2) \quad (8)$$

### 3.2 约束条件

#### 1) 功率平衡约束

电力系统平衡约束考虑风、光的系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{g(i,t)} + \sum_{i=1}^{N_{ps}} P_{ps(i,t)} + \sum_{i=1}^{N_w} P_{w(i,t)} + \sum_{i=1}^{N_{pv}} P_{pv(i,t)} = P_{L,t} \quad (9)$$

式中:  $P_{w(i,t)}$  为第  $i$  个风电机组  $t$  时刻的出力;  $P_{pv(i,t)}$  为第  $i$  个光伏阵  $t$  时刻的发电功率。

#### 2) 火电组出力与爬坡约束

$$P_{g \min} \leq P_{g(i,t)} \leq P_{g \max} \quad (10)$$

$$-R_{di} \Delta t \leq P_{g(i,t)} - P_{g(i,t-1)} \leq R_{ui} \Delta t \quad (11)$$

式中:  $P_{g \max}$ 、 $P_{g \min}$  分别为第  $i$  台火电机组的出力上下限;  $R_{ui}$  和  $R_{di}$  分别为机组增、减负荷时的调节速度;  $\Delta t$  为调度时段的时间长度。

#### 3) 风光约束条件

风光上网功率( $P_w$ 、 $P_{pv}$ )要小于风光最大出力

( $P_{w \max}$ 、 $P_{pv \max}$ )。

$$0 \leq P_w \leq P_{w \max} \quad (12)$$

$$0 \leq P_{pv} \leq P_{pv \max} \quad (13)$$

#### 4) 抽蓄电站出力约束

抽水蓄能电站不能同时工作在发电和放电两种状态, 因此不仅要满足上下限约束, 而且不能同时出现储能和发电的情况。

$$\begin{cases} K_{g,t} P_{g,ps \min} \leq P_{g,ps} \leq K_{g,t} P_{g,ps \max} \\ K_{s,t} P_{s,ps \min} \leq P_{s,ps} \leq K_{s,t} P_{s,ps \max} \\ K_{s,t} K_{g,t} = 0 \\ K_{s,t} + K_{g,t} \leq K \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $K$  为抽蓄电站总的机组台数;  $P_{g,ps}$  表示抽蓄电站发电总功率;  $P_{s,ps}$  表示抽蓄电站吸收总功率;  $P_{g,ps \max}$  与  $P_{g,ps \min}$  分别为单个抽蓄电站发电功率的最大、最小值;  $P_{s,ps \max}$  与  $P_{s,ps \min}$  分别为单个抽蓄电站吸收功率的最大、最小值。

#### 5) 水库能量平衡约束

$$\frac{\sum_{t=1}^T P_{g,ps} \eta_2}{\eta_1} = \sum_{t \in T} P_{s,ps} K_{s,t} \quad (15)$$

式中,  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分别为抽水和发电时的平均水量、电量转换系数。

#### 6) 抽蓄机组启停次数约束

过于频繁的启停会对抽蓄机组造成损害, 并且启停也会增加水头的损失、增加成本, 因此需要对每日机组的启停次数进行限制。

$$\sum_{t=1}^T (|K_{s,t} - K_{s,t-1}| + |K_{g,t} - K_{g,t-1}|) \leq KM_{ps} \quad (16)$$

式中,  $M_{ps}$  为每台机组每天启停限制次数。

#### 7) 抽水蓄能机组特殊运行方式的约束

在高寒地区的冬季, 若抽水蓄能机组长时间停机, 会导致水库表面形成厚冰层, 此时若启动机组, 冰层将破碎, 从而对机组的稳定运行造成不利影响。而机组运行时会产生水流波动以及水位的交替变化, 水库表面难以形成完整的冰层, 有利于抽水蓄能机组的正常运行, 水库运行经验表明, 在冬季保持至少 1 台机组运行可以有效防止水库表面结冰。

由上可得, 需满足式(17)的约束条件。

$$K_{s,t} + K_{g,t} \geq 1 \quad (17)$$

#### 8) 需求响应约束

需求响应可分为可削减负荷与可转移负荷, 其约束条件可表达为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{de,t} \leq \mu_m P_{de,max} \\ t_{de,min} \leq t_{de} \leq t_{de,max} \end{cases} \quad (18)$$

$$\mu_m P_{t,min} \leq P_t \leq \mu_m P_{t,max} \quad (19)$$

式中： $\mu_m$  为需求响应状态变量，发生需求响应时取 1，不发生需求响应时取 0； $t_{de,max}$  和  $t_{de,min}$  分别为可削减负荷的最大和最小持续时间； $P_{l,max}$  和  $P_{l,min}$  分别为可转移负荷功率  $P_l$  的上下限； $P_{de,i}$  为可削减负荷功率， $P_{de,max}$  为其上限。

### 3.3 基于变时段设计的改进差分进化算法流程

基于变时段设计的改进差分进化算法流程如图 4 所示，基于 2.1 节划分时段后程序会被启动。该方法首先在不同时段确定火电机组及抽蓄机组的运行模式，详见 2.2 节。

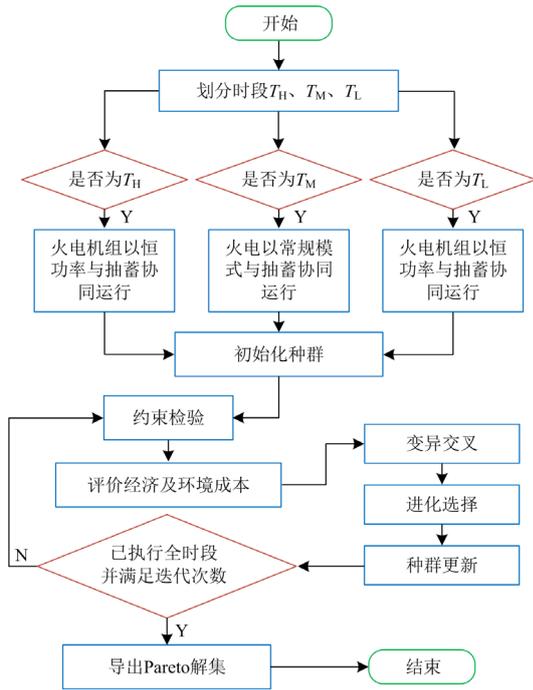


图 4 基于变时段设计的改进差分进化算法流程

Fig. 4 Improved differential evolution algorithm process based on variable time period design

在对种群进行初始化操作后，种群的适应值也即目标函数设置为  $\min F$ ，以确保在多目标优化下求解系统的 Pareto 解集。Pareto 解被称作非支配解或不受支配解：在有多个目标时，由于存在目标之间的冲突和无法比较的现象，一个解在某个目标上为最优解时，在其他的目标上可能是最差的解。这些在改进任何目标函数的同时，必然会削弱至少一个其他目标函数的解称为非支配解或 Pareto 解。

本文多目标优化目标分为经济成本最优以及环境成本最优，在这两个目标上的非支配解作为优化方案的 Pareto 解集。种群在迭代过程中的更新是约束及目标函数构成的环境对其筛选的结果。进化选择过程应满足多目标优化理论，即选择系统支配解

(淘汰非支配解)的过程。由此可得到优化规划模型的 Pareto 前沿面，以便于综合地评价含风/光/火/储新型电力系统的经济性。

## 4 算例分析

为了验证所提方法的有效性，采用高渗透率的风电光伏、抽水蓄能以及常规火电机组的系统进行验证。如图 5 所示，以 IEEE 39 节点系统作为算例系统进行仿真分析：系统火电机组最大可调出力为 9590 MW，火电机组主要参数见表 1—表 3；可再生能源占比 25.81%，其中风电总装机容量为 2300 MW，光伏总装机容量为 550 MW；抽水蓄能电站 1 座，装机容量为 1350 MW；系统日负荷峰值为 11 180 MW；需求响应最大出力为 800 MW。本文计算环境为 Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU @ 1.80 GHz，8 GB RAM，Win 10 操作系统。求解流程中的算法主要参数整定方法见表 4。

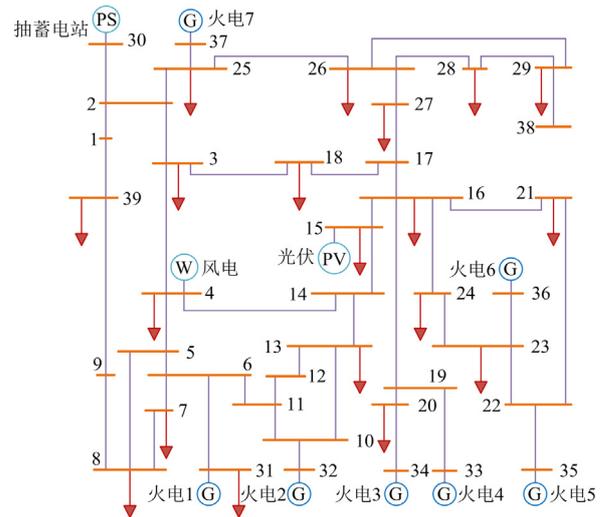


图 5 改进的 IEEE 39 节点系统结构图

Fig. 5 Improved IEEE 39-bus system architecture diagram

表 1 火电机组主要参数(经济效益)

Table 1 Main parameters of thermal power units (economic benefits)

机组类型	$P_{max}/MW$	$P_{min}/MW$	$A_{2,i}/$ (元/MW <sup>2</sup> )	$A_{1,i}/$ (元/MW)	$A_{0,i}/元$
N1	450	150	0.1524	38.5397	786.7988
N2	270	65	0.0179	38.2704	1356.659
N3	220	60	0.0354	38.3055	1243.531
N4	200	50	0.0354	38.3055	1243.531
N5	130	20	0.0211	36.3278	1658.570
N6	120	40	0.0211	36.3278	1658.570
N7	55	20	0.0179	38.2704	1356.659

表 2 火电机组主要参数(污染排放)

Table 2 Main parameters of thermal power units (pollution emissions)

机组类型	$\alpha_i'$ (lb/h)	$\beta_i'$ (lb/MWh)	$\gamma_i'$ (MW <sup>2</sup> h)	$\eta'$ (lb/h)	$\delta'$ (1/MW)
N1	103.3908	-2.4440	0.0312	0.5035	0.0207
N2	300.3910	-4.0695	0.0509	0.4968	0.0202
N3	320.0006	-3.8132	0.0344	0.4972	0.0200
N4	320.0006	-3.8132	0.0344	0.4972	0.0200
N5	330.0056	-3.9023	0.0465	0.5163	0.0214
N6	330.0056	-3.9023	0.0465	0.5163	0.0214
N7	360.0012	-3.9864	0.0470	0.5475	0.0234

表 3 火电机组节点装机台数

Table 3 Number of installed thermal power units at each node

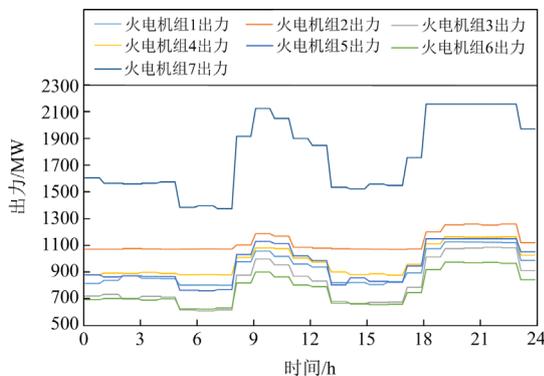
节点编号	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7
G1	2			2			
G2	2	2					
G3	2						2
G4	2		2				
G5	2				2		
G6	2					2	
G7	4			2			

表 4 差分进化算法的主要参数整定

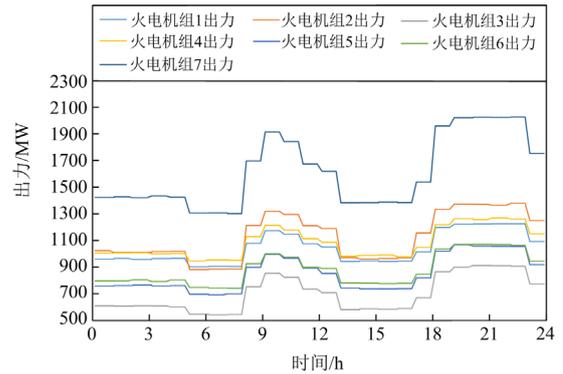
Table 4 Main parameters tuning of differential evolution algorithm

种群个数	突变因子	交叉因子	迭代次数
150	0.5	0.6	1000

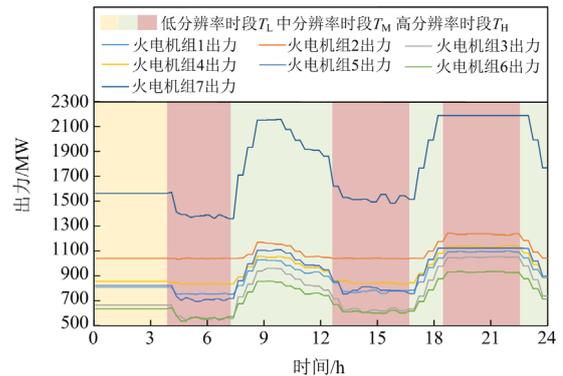
经济成本(环境成本)最优下的发电机不同时刻出力如图 6 所示。由图 6 可知, 不同机组的运行参数存在差异, 不同目标最优时出力情况不同。在不同时间尺度下, 可以直观地看出分时段时高分辨率的发电机出力频繁, 以匹配负荷的波动变化。此外, 可较为明显地看出传统差分法与改进差分法在计算机组出力时产生的差异, 但在预测精度方面显示不直观。



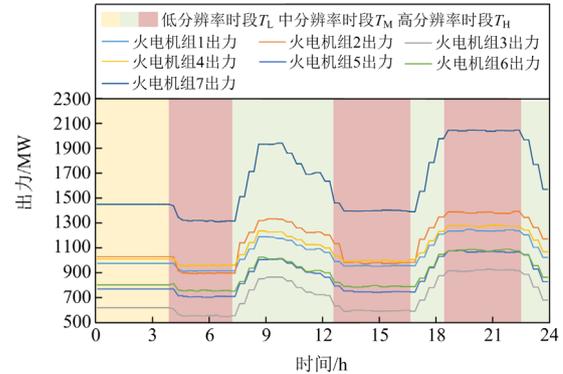
(a) 无变时段设计的经济成本最优火电出力



(b) 无变时段设计的环境成本最优火电出力



(c) 变时段设计的经济成本最优火电出力



(d) 变时段设计的环境成本最优火电出力

图 6 经济成本(环境成本)最优下的发电机不同时刻出力

Fig. 6 Generator output at different times under optimal economic cost (environmental cost)

本文所提方法可对种群进化过程中生成的所有个体进行校验, 确保其满足不等式约束, 并进一步直观地验证功率平衡。

传统差分法与改进差分法在两个目标分别最优时, 不同能源出力以及总负荷曲线如图 7 所示, 可以看出, 不论是满足经济最优目标还是满足环境最优目标, 分时段的改进差分法在满足负荷精度要求方面都要优于传统不分时段的差分法。

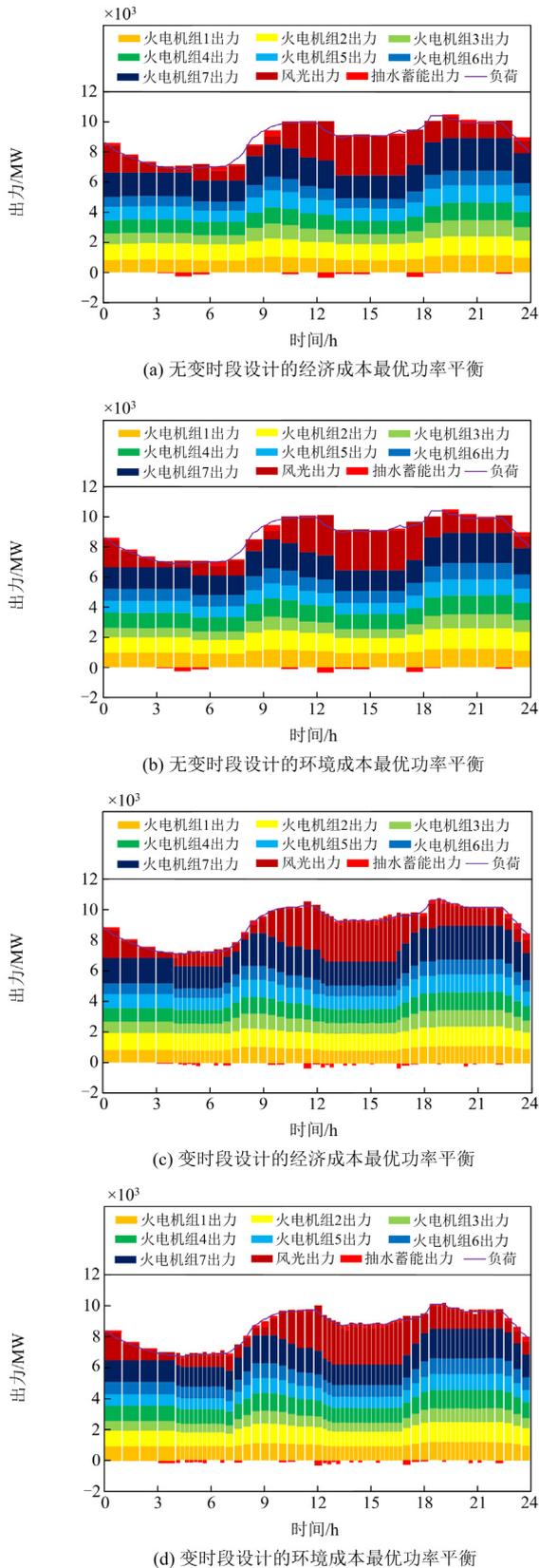


图7 约束条件校验结果

Fig. 7 Constraint verification result

在低分辨率区,传统差分法与改进差分法计算的出力结果差异较小;然而,在负荷变动频率大的高分辨率区以及变化幅度较大的中分辨率区,两者差异显著。此时不分时段的差分法误差较大,而采用分时段方法所得到的数据对负荷的变化具有更好的跟踪效果,并且可以在负荷变化时迅速做出响应。

本节拟用高分辨率呈现抽水蓄能电站辅助后净负荷需求曲线。由图8可知,无变时段设计的差分进化算法相比于本文所提方法得出的火电机组出力误差较大。该误差往往导致系统在运行时产生额外的弃风弃光或需求侧响应的额外成本。

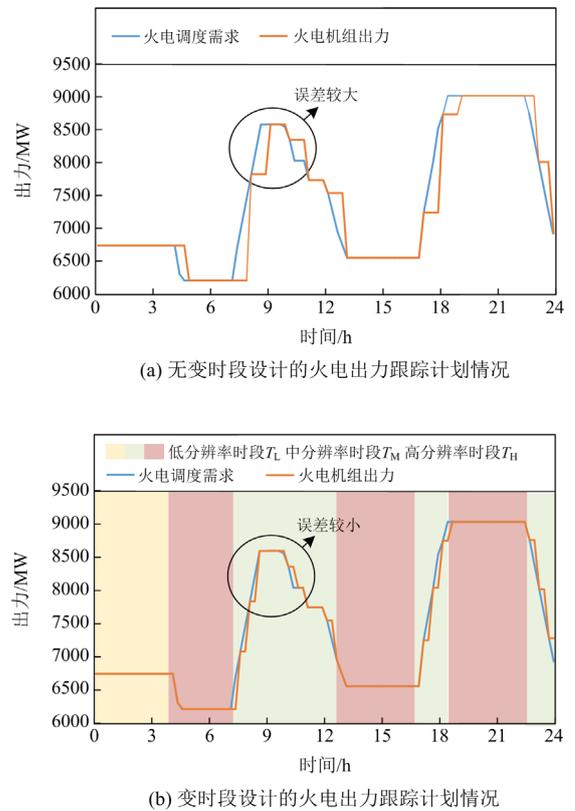


图8 火电机组出力跟踪计划情况

Fig. 8 Status of output tracking plan for thermal power units

计及经济成本及环境成本的多目标优化模型的 Pareto 解集前沿面,如图9所示。由此可计算出不同目标下,传统差分法与改进差分法所求得的最优解以及解集的跟踪度见表5与表6。

为清晰地量化所提方法求解的火电出力跟踪出力计划的程度,此处引入跟踪度误差计算指标  $P_{g,fc}$ 。

$$P_{g,fc} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T \left( P_{eq,t} - \sum_{i=1}^{N_g} P_{g(i,t)} \right)^2}{T}} \quad (20)$$

式中,  $P_{eq,t}$  为  $t$  时刻火电机组计划出力。

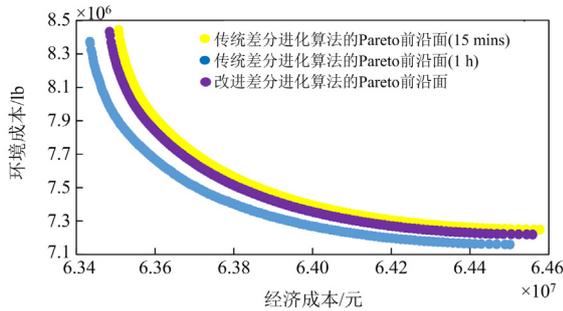


图 9 本文所提改进算法的 Pareto 解集前沿面

Fig. 9 Pareto solution set frontier of the improved algorithm proposed in this paper

表 5 经济成本最优下流程执行结果

Table 5 Process execution results under optimal economic cost

经济最优	跟踪度 误差/MW	经济 成本/元	环境 成本/lb	求解 时间/s
传统方法 (间隔 1 h)	199.01	63 435 429	8 428 350	327
传统方法 (间隔 15 min)	0	63 472 597	8 476 135	1275
本文方法	67.31	63 461 287	8 476 893	906

表 6 环境成本最优下流程执行结果

Table 6 Process execution results under optimal environmental cost

环境最优	跟踪度 误差/MW	经济 成本/元	环境 成本/lb	求解 时间/s
传统方法 (间隔 1 h)	199.01	64 434 509	7 187 813	327
传统方法 (间隔 15 min)	0	64 478 755	7 227 743	1275
本文方法	67.31	64 461 890	7 227 722	906

根据 Pareto 解集的前沿面可以看出, 当考虑不同目标最优时, 传统的差分进化算法相较于改进后的差分进化算法得到的解集数值偏大, 这是由于变时段的设计导致的必然差异。进一步分析两种算法的跟踪度, 变时段改进后的算法误差值小, 与采样间隔为 1 h 的传统方法相比, 本文所提方法在求解火电机组出力跟踪计划时具有更高的精确度。

本文所提方法与采用同维度数据集的传统方法相比, 变时段设计可降低模型求解复杂度以及减少计算时间。因此, 本文所提的改进差分进化法能够更合理、更充分地跟踪调度机组的出力, 兼顾准确度与计算效率的提高。

为了验证本文方法相较于其他算法的优势, 采

用多目标粒子群优化(MOPSO)算法、改进多目标骨干粒子群(IBBMOPSO)算法、多目标遗传(NSGA-II)算法与采用竞争机制的多目标差分进化(CMODE)算法与本文算法做对比性测试, 并分析各算法在求解过程中解集的边界分布与收敛情况。为保证对比实验的公平性, 对比算法的迭代次数与种群规模均与本文采用的多目标差分进化算法(MODEA)一致。

各算法求得 Pareto 解集如图 10 所示, 可以看出, 在迭代相同次数的情况下, 本文采用的 MODEA 在收敛性上均优于其他方法, 所得到的 Pareto 解集更加平滑紧凑。当某一 Pareto 解集在不同目标均优于另一解集时, 称该解集是另一解集的支配解, 反之称为被支配解, 可以看出, 相比于其他算法本文所用的 MODEA 求得的 Pareto 解集均为支配解。CMODE 算法求得的 Pareto 解集与本文提出的 MODEA 算法求得的解集在经济成本最优这一求解点上最为接近, 但 CMODE 算法并未能求得比 MODEA 更优的解, 即其解在 Pareto 前沿上仍然被 MODEA 的解所支配。NSGA-II 与 IBBMOPSO 算法求得的 Pareto 解集存在交点, 其中 NSGA-II 算法在经济成本最优时求得的解优于 IBBMOPSO 算法, 而在环境成本最优时求得的解大于 IBBMOPSO 算法, 二者互不支配。但与 MODEA 和 CMODE 算法相比, 两者的 Pareto 解集均被支配, 且在环境成本本求解时均存在另一目标值较大的问题, 收敛性较差。MOPSO 算法所得 Pareto 解集与 MODEA 所得解集存在显著差异, 在寻求多目标解时收敛性较差, 未得到较优解, 与其他算法得到的 Pareto 解集相比, 为被支配解。

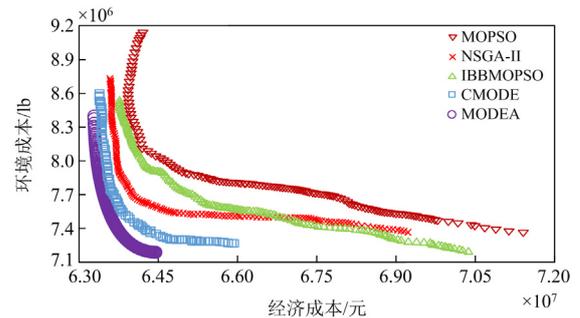


图 10 各算法求得的 Pareto 解集

Fig. 10 Pareto solution sets obtained by each algorithm

表 7 与表 8 分别为采用不同算法时经济成本最优与环境成本最优情况下的经济成本与环境成本。与上述 Pareto 解集的分析一致, 本文采用 MODEA 在探寻单目标最优解时所得目标值均为最优, 经济

成本最优时的经济成本为 63 254 567.39 元, 环境成本最优时的排放成本为 7 177 529.42 元, 均小于其他算法求得的目标最优值。

表 7 不同算法的运算结果(经济成本最优)  
Table 7 Calculation results of different algorithms (optimal economic cost)

算法	经济成本/元	环境成本/lb
MODEA	63 254 567.39	8 396 298.13
MOPSO	63 910 571.33	8 592 542.12
NSGA-II	63 560 050.4	8 733 795.61
IBBMOPSO	63 746 079.61	8 534 531.19
CMODE	63 361 881.79	8 594 528.41

表 8 不同算法的运算结果(环境成本最优)  
Table 8 Calculation results of different algorithms (optimal environmental cost)

算法	经济成本/元	环境成本/lb
MODEA	64 375 564.31	7 177 529.42
MOPSO	71 406 167.22	7 364 607.06
NSGA-II	69 229 303.25	7 368 821.18
IBBMOPSO	70 370 062.56	7 185 858.55
CMODE	65 953 665.50	7 266 356.26

同时, 在满足某一目标最优时, 另一目标的求解值也均小于其他算法所得, 即均为支配解。COMDE 算法求解值与其他算法相比更加接近 MODEA 所求值, 相比于其他算法收敛性较好, 但与 MODEA 相比, 成本计算依旧偏大, 未寻得更优解。MOPSO 与 IBBMOPSO 算法在求某一目标最优时, 存在另一目标值过大的问题, 即在迭代过程中对全局的搜索性较差, 未能进一步更新较优解, 收敛性较差。本文采用的 MODEA 在处理多目标求解时均有更优的收敛效果。

### 5 结论

高比例新能源馈入的新型电力系统中, 为降低系统经济成本与环境成本, 提高火电机组跟踪调度计划能力, 本文提出一种基于变时段设计的多目标差分进化算法。

1) 与采用同维度数据集的传统差分进化算法相比, 本文所提的变时段设计可降低模型求解复杂度, 并减少计算时间。在相同的测试环境下, 本文方法的计算速度提高了 28.94%。

2) 与算例分析中列举的其他算法相比, 无论在经济成本或环境成本单一最优或联合成本最优时, 本文方法所求解集均能支配其他算法所得, 在处理多目标求解问题时具有更优的收敛效果。

3) 本文方法通过变时段的流程设计, 相较于传统方法, 其跟踪度指标提高了 66.18%, 能较好地满足风/光/火/储系统中由新能源出力不确定性带来的火电调度计划精度需求, 仿真结果充分验证了所提方法的有效性。

### 参考文献

[1] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.  
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.

[2] 臧延雪, 边晓燕, 梁思琪, 等. 计及线路传输能力的新能源电力系统灵活性评估及优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 15-26.  
ZANG Yanxue, BIAN Xiaoyan, LIANG Siqi, et al. Flexibility evaluation and optimal dispatching method of a renewable energy power system considering line transmission capacity[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 15-26.

[3] LI G, LI G, ZHOU M. Model and application of renewable energy accommodation capacity calculation considering utilization level of inter-provincial tie-line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-12.

[4] 鲁业安, 马玲, 张磊, 等. 计及火电机组热储能的含风电系统柔性调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 75-84.  
LU Yean, MA Ling, ZHANG Lei, et al. Flexible dispatch of a power system with wind power considering thermal energy storage retrofit of thermal power units[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 75-84.

[5] YANG Longjie, ZHOU Niancheng, ZHOU Guiping, et al. An accurate ladder-type ramp rate constraint derived from field test data for thermal power unit with deep peak regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1408-1420.

[6] 李雄威, 王昕, 顾佳伟, 等. 考虑火电深度调峰的风光火储系统日前优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 1-7, 48.  
LI Xiongwei, WANG Xin, GU Jiawei, et al. Day-ahead optimal dispatching of wind-solar-thermal power storage system considering deep peak shaving of thermal power[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 1-7, 48.

[7] 韩锐, 吴军, 廖清芬, 等. 基于 NSGA-III 算法的光-水-火电机组 AGC 协调优化策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 45-52.  
HAN Rui, WU Jun, LIAO Qingfen, et al. AGC coordination and optimization strategy of photovoltaic-hydropower-thermal power units based on NSGA-III algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 45-52.

[8] LUIS R, MOHAMMAD M, THOMAS M, et al. Resilience

- analytics for interdependent power and water distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(6): 4244-4257.
- [9] MOHANNAD A L, PAYMAN D, MOSTAFA N, et al. Optimal operation of integrated water-power systems under contingencies[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(4): 4350-4358.
- [10] 李飞, 李咸善, 李振兴, 等. 基于梯级水电调节的多能联合发电系统短期优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(15): 11-20.  
LI Fei, LI Xianshan, LI Zhenxing, et al. Short-term optimal scheduling of multi-energy combined generation systems based on the regulation of cascade hydropower stations[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(15): 11-20.
- [11] 李军徽, 张嘉辉, 李翠萍, 等. 参与调峰的储能系统配置方案及经济性分析[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(19): 4148-4160.  
LI Junhui, ZHANG Jiahui, LI Cuiping, et al. Configuration scheme and economic analysis of energy storage system participating in grid peak shaving[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(19): 4148-4160.
- [12] 施焯, 金浩, 郝飞, 等. 一种多能互补系统优化调度通用化建模方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(12): 4924-4943.  
SHI Ye, JIN Hao, HAO Fei, et al. A general linear modeling method for optimal dispatch of integrated energy system[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(12): 4924-4943.
- [13] GUEZGOUZ M, JURASZ J, BEKKOUCHE B, et al. Optimal hybrid pumped hydro-battery storage scheme for off-grid renewable energy systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 199(21): 953-968.
- [14] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(1): 158-169.  
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1): 158-169.
- [15] TANG Z, LIU J, LIU Y, et al. Stochastic reserve scheduling of energy storage system in energy and reserve markets[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 123(10): 647-654.
- [16] KARAGIANNPOULOS S, GALLMANN J, VAYÁM G, et al. Active distribution grids offering ancillary services in islanded and grid-connected mode[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 623-633.
- [17] DEANE J, DRAYTON G, GALLACHÓIR B. The impact of sub-hourly modelling in power systems with significant levels of renewable generation[J]. *Applied Energy*, 2014, 113(1): 152-158.
- [18] 唐杰, 吕林, 叶勇, 等. 多时间尺度下主动配电网源-储-荷协调经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(20): 53-64.  
TANG Jie, LÜ Lin, YE Yong, et al. Source-storage-load coordinated economic dispatch of an active distribution network under multiple time scales[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(20): 53-64.
- [19] MASON K, DUGGAN J, HOWLEY E. A multi-objective neural network trained with differential evolution for dynamic economic emission dispatch[J]. *International Journal Electrical Power and Energy Systems*, 2018, 100(7): 201-221.
- [20] DONG Y, ZHANG H, WANG C, et al. An adaptive state transition algorithm with local enhancement for global optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 121(8): 68-87.
- [21] 魏乐, 李希金. 基于多目标的含风电场动态环境经济调度[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(9): 1825-1830.  
WEI Le, LI Xijin. Dynamic environmental and economic dispatching of wind farm based on multi-objective[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(9): 1825-1830.
- [22] LÜ D, XIONG G, FU X. Economic emission dispatch of power systems considering solar uncertainty with extended multi-objective differential evolution[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 227(17): 777-792.
- [23] BAKIRTZIS E, BISKAS P. Multiple time resolution stochastic scheduling for systems with high renewable penetration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 1030-1040.
- [24] KËRÇI T, GIRALDO J, MILANO F. Analysis of the impact of sub-hourly unit commitment on power system dynamics[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 119(6): 36-45.
- [25] PINEDA S, FERNÁNDEZ-BLANCO R, MORALES J. Time-adaptive unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 3869-3878.
- [26] 李军徽, 周家旭, 朱星旭, 等. 含高渗透新能源电力系统中考虑变时段控制的火/储/荷日前优化调度[J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 51-63.  
LI Junhui, ZHOU Jiaxu, ZHU Xingxu, et al. Day ahead optimal dispatch of thermal/storage/load systems considering variable time period control in power system with high penetration of new energy[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 51-63.

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-04-03

作者简介:

齐 郑(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: qizheng319@126.com

徐希茜(2000—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化控制; E-mail: xuxixi\_shandong@163.com

熊 巍(1977—), 男, 学士, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: 315806867@qq.com

(编辑 姜新丽)