

一种考虑动态响应的火力发电机组经济负荷调度方法

周意诚, 滕敏亮*, 田芬芳, 王耀华, 林建豪

浙江腾腾电气有限公司, 浙江 温州

收稿日期: 2025年11月7日; 录用日期: 2025年11月21日; 发布日期: 2025年12月18日

摘要

本文提出一种融合火电机组动态特性与前向-后向迭代机制的动态经济负荷调度(DELD)方法, 用于应对新能源高占比条件下面对剧烈负荷波动时机组响应不足的问题。该方法在传统静态经济调度模型基础上, 将爬坡速率与时间耦合动态约束显式纳入调度框架, 并设计触发式后向调整机制, 通过在可回溯时段释放动态裕度来实现可行解修正。相比纯静态优化或仅设置保守响应裕度的方法, 本方法从时间序列角度构建了可重复执行的“前向计算-后向校正”迭代调度流程, 可兼顾运行经济性与动态可行性。基于三机规则系统与IEEE 30-bus系统的仿真结果表明, 该方法在保证实时性前提下, 可在典型负荷剧烈波动场景中显著降低系统成本与响应失败次数, 具备工程在线调度应用潜力。

关键词

动态经济负荷调度, 火电调度, 动态约束, 前向-后向迭代, 优化算法

An Economic Load Dispatch Method for Thermal Power Plants Considering Dynamic Response Constraints

Yicheng Zhou, Minliang Teng*, Fenfang Tian, Yaohua Wang, Jianhao Lin

Zhejiang TTN Electric Co., Ltd, Wenzhou Zhejiang

Received: November 7, 2025; accepted: November 21, 2025; published: December 18, 2025

Abstract

This paper proposes a dynamic economic load dispatch (DELD) method for thermal power plant

*通讯作者。

文章引用: 周意诚, 滕敏亮, 田芬芳, 王耀华, 林建豪. 一种考虑动态响应的火力发电机组经济负荷调度方法[J]. 电力与能源进展, 2025, 13(6): 263-270. DOI: 10.12677/aepe.2025.136028

clusters by integrating unit ramp-rate characteristics and a forward-backward iterative mechanism. The method explicitly incorporates ramp-rate constraints into the dispatch model and adopts a triggered backward correction process to release dynamic response margins from earlier time intervals when infeasible dispatch states occur. Compared with static optimization and reserve-based conservative protection strategies, the proposed method establishes a reproducible forward computation—backward adjustment loop to simultaneously maintain economic performance and dynamic feasibility. Simulation studies on both a three-unit test system and the IEEE 30-bus benchmark system show that the proposed approach effectively reduces total operational cost and eliminates ramp-violation events under large load fluctuation conditions while maintaining practical computational efficiency, indicating promising potential for real-time online scheduling applications.

Keywords

Dynamic Economic Load Dispatch, Thermal Power Dispatch, Dynamic Constraints, Forward-Backward Iteration, Optimization Algorithms

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在高比例新能源接入与用电负荷呈现高频快速波动的背景下，火电机组在电力系统运行中仍承担着关键的调节与稳定能力。传统经济负荷调度(Economic Load Dispatch, ELD)更多基于静态平衡模型，通常仅考虑机组出力上下限约束，而未将机组的动态响应速率(Ramp Rate)进行显式建模，从而导致在负荷出现突增与突降时，调度方案虽满足静态最优，但在实际执行环节可能无法满足动态响应要求，进而引发调频压力上升与运行安全裕度骤减等问题。在此情况下，研究“兼顾经济性与动态响应能力”的动态经济负荷调度(Dynamic Economic Load Dispatch, DELD)方法具有重要工程意义。

DELD 的本质不是“在静态 ELD 上叠加一个保护裕度”即可解决问题，而是需要构建一套可随时间序列动态调整、可根据响应风险自触发修正机制、并可在线执行的调度框架。尤其在调度粒度从“小时级”向“分钟级甚至子分钟级”收敛的趋势下，仅依赖静态阶段性计算或全局复杂优化求解均会出现可落地性与实时性不足的问题。因此，构造一种能够在“静态经济优化”与“动态可行性维持”之间进行高效联动、面向实时调度执行场景的工程可实施方法，是当前研究的核心任务与价值所在。

基于上述背景，本文提出一种基于前向 - 后向迭代的考虑动态响应约束的火电机组动态经济负荷调度方法，通过前向预测逐时静态等增率求解获取初始出力分布，当遇到任一时段无法满足动态响应约束时，反向联动回溯前若干时间段释放动态裕度，并完成可行性重新分配，从而在保证运行可执行性的同时兼顾经济性。该方法具备结构直观、计算速度快、工程部署成本低等特征，可直接适用于在线滚动调度。

本文的主要工作贡献如下(工程应用导向)：

1) 提出一种面向实时落地场景的“前向 - 后向两阶段联动”动态调度机制，以显式动态约束触发修正操作，并非依赖单纯保守裕度预留策略；

2) 针对动态不可行出现时段提出“最近动态可平衡区间”的概念，并设计可回溯有限深度的响应裕度释放策略，实现高效可行解修正而不破坏前序时段经济性；

3) 通过三机组系统与 IEEE 30-bus 标准系统验证方法的可扩展性, 并从运行计算时间维度验证其具有在线调度执行潜力。

以下将介绍本文的研究进展与相关研究背景。

已有 DELD 研究大致可分为三类方向:

- (1) 严格数学优化/凸规划/混合整数求解类方法[1]-[3];
- (2) 基于智能优化或元启发式算法的经验类方法[4]-[6];
- (3) 面向工程可执行性的分解式与结构化求解方法[7]-[11]。

第一类方法通过 MILP、IPM 等连续优化策略构造精细模型, 能够获得近似全局最优解, 但模型复杂度高、约束规模随时段扩展指数增加, 使其在分钟级与高波动场景下难以满足实时性要求。第二类方法(如 PSO、GA、DE、ABC 等)更强调可扩展性与求解速度优势, 但调参敏感、可重复一致性差、难以确保在任一突发场景下必然得到可执行解。第三类方法开始强调“可落地执行能力”, 并从调频灵活性、响应风险控制、跨时段耦合裕度释放等工程属性出发构造求解机制, 但现有方法在动态响应约束出现“局部瞬时不可行”场景时, 多数仍采取较保守的裕度预留方式, 无法实现从时序角度进行近实时响应可行性修正。

针对上述不足, 本文工作在第三类方法体系基础上进一步向前推进: 构建一种“动态可行性触发型”的前向-后向联合求解策略, 不依赖随机搜索、无需增加额外保守安全裕度, 而是通过系统结构特性设计有限深度的回溯释放机制, 使得可行解修正具有确定性、可解释性、可重复执行性和可工程部署性, 这正是本文与既有 DELD 研究的核心差异与创新点所在。

2. 模型建立与约束分析

发电机燃料成本的特征函数是出力的二次函数, 因此火力发电机的动态负荷调度问题(忽略输电损耗)可以表示为下面的二次规划问题, 我们将其定义为 OPT-1。

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i p_{i,t}^2 + b_i p_{i,t} + c_i) \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N p_{i,t} = P_{R,t} \quad (t=1, 2, \dots, T) \\
 & p_{i,\min} \leq p_{i,t} \leq p_{i,\max} \quad (i=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T) \\
 & -\delta_i \leq p_{i,t+1} - p_{i,t} \leq \delta_i \quad (i=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T)
 \end{aligned}$$

其中, $P_{R,t}$ 是 t 时刻的所需负载需求, a_i 、 b_i 和 c_i 分别是 i 号发电机的二次特性系数、一次特性系数和恒定特性系数。 $p_{i,\min}$ 和 $p_{i,\max}$ 是 i 号发电机的最小和最大输出约束, δ_i 是 i 号发电机响应负载变化的动态负载约束。

为便于讨论, 本文首先定义了一些术语, 然后根据这些定义展开讨论。

定义 1: 时间 t 和时间 $t+1$ 之间发生的实际负荷变化, 称为 $\delta P_{R,t} = P_{R,t+1} - P_{R,t}$

定义 2: 整个系统输出变化的最大可能速率, 称为 $\Delta \delta_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^N \delta_i$

从定义 1 可以看出, 负荷变化 $\delta P_{R,t}$ 是整个系统从时间 t 到时间 $t+1$ 必须响应的总负荷变化, 而定义 2 则表明, 整个系统的总动态响应能力 $\Delta \delta_{\text{sys}}$ 是每台发电机 i 的响应能力 δ_i 之和。为了满足负荷要求和整个系统的动态响应能力, 有必要随时检查 $\delta P_{R,t}$ 和 $\Delta \delta_{\text{sys}}$ 的相对大小, 使其满足负荷相应平衡。

定义 3: 系统在 t 期的负荷增加率 $\nabla P_t^+ = \sum_{i=1}^N \varphi_{i,t}^{\text{up}}$ 和负荷减少率 $\nabla P_t^- = \sum_{i=1}^N \varphi_{i,t}^{\text{down}}$, 其中 $\varphi_{i,t}^{\text{up}}$, $\varphi_{i,t}^{\text{down}}$ 分别表

示为

$$\varphi_{i,t}^{up} = \min(p_{i,\max} - p_{i,t-1}, \delta_i)$$

$$\varphi_{i,t}^{down} = \min(p_{i,t-1} - p_{i,\min}, \delta_i)$$

每个时间 t 的动态负载响应的可能范围受到来自两个方面的限制。一个是每台发电机的上限 $p_{i,\max}$ 和下限 $p_{i,\min}$ 约束，另一个是每台发电机的响应增减率 δ_i 约束。因此，定义 3 中的 $\varphi_{i,t}^{up}$ 和 $\varphi_{i,t}^{down}$ 就是这些要求的具体表达式。

由上可知，在线动态负荷调度在每个时间，必须满足以下负荷变化方程，我们将其定义为负荷变化约束方程(OBJ-1)。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N p_{i,\min} &\leq P_{R,t} \leq \sum_{i=1}^N p_{i,\max} & (t=1,2,\dots,T) \\ -\nabla \delta_{\text{sys}} &\leq \delta P_{R,t} \leq \nabla \delta_{\text{sys}} & (t=1,2,\dots,T) \\ \sum_{i=1}^N (p_{i,t} - (t-1)\delta_i) &\leq P_{R,t} \leq \sum_{i=1}^N (p_{i,t} + (t-1)\delta_i) & (t=1,2,\dots,T) \end{aligned}$$

定义为 OPT-1 的原始优化问题也必须满足上述约束条件 = 负荷变化约束方程(OBJ-1)。

定义 4: 当负载增加时,无法做出动态响应的时段称为 T_{K,N^+} , 而可以做出动态响应的时段为 T_{K,Y^+} 。

如果 $\delta P_{R,k-1} > 0$ 和 $\delta P_{R,k-1} > \nabla P_t^+$, 那么在 K 时段, 它就无法对负载的增加做出动态响应。这些是 T_{K,N^+} 的条件。同样, 如果 $\delta P_{R,k-1} > 0$ 和 $\delta P_{R,k-1} \leq \nabla P_t^+$, 那么在 K 时段, 它可以对负载的增加做出动态响应。这些是就是 T_{K,Y^+} 的条件。

定义 5: 当负载减少时不可能做出动态响应的时段称为 T_{K,Y^+} , 而可能做出响应的时段为 T_{K,Y^-} 。

如果 $\delta P_{R,k-1} < 0$ 和 $\delta P_{R,k-1} < -\nabla P_{k-1}^-$, 那么在 K 时段, 它就无法对负载的减少做出动态响应。这些是 T_{K,N^-} 的条件。同样, 如果 $\delta P_{R,k-1} < 0$ 和 $\delta P_{R,k-1} \geq -\nabla P_{k-1}^-$, 那么在 K 时段, 它可以对负载减少做出动态响应。这些就是 T_{K,Y^-} 的条件。

定义 6: 不可能做出动态响应的时段集合(记为 $T_{K,N} = T_{K,N^+} \cup T_{K,N^-}$)和可能做出动态响应的时段集合(记为)。 $T_{K,Y} = T_{K,Y^+} \cup T_{K,Y^-}$

显而易见, 如果在到达 $K \in T_{K,N}$ 点时段, 从 K 点之前的某一时间开始对负载进行多点调整, 即释放动态相应裕度, 即将 $K \in T_{K,N}$ 转换为 $K \in T_{K,Y}$

定义 7: 静态载荷分配指的是以下优化过程:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i \in U_K} (a_i p_{i,t}^2 + b_i p_{i,t} + c_i) \\ \text{s.t.} & \sum_{i \in U_K} p_{i,t} = P_R(t) \\ & VP_{i,\min}(t) \leq p_{i,t} \leq VP_{i,\max}(t) \quad i \in V_K \end{aligned}$$

上述计算可采用传统的等增燃料计算法求解, 因为它考虑到了 t 时刻负荷平衡的发电量约束上下限。如果进一步考虑动态负荷相应, 如前所述, 计算 t 时刻的负荷分配时, 有可能不一定满足 t 时刻的响应约束。因此, 为了满足 t 时刻的负荷平衡, 就必须在 t 时刻之前的某些时段 $k(t)$ 释放调整裕度, 并重新对 $k(t) + 1$ 到 $t - 1$ 的经济负荷分配重新进行计算即可。

定义 8: 与无法实现负荷响应的时段 $T_{K,N}^+$ 相对应的通过调整可能实现动态响应的与时间段 t 最近的时间段 j 称为负荷增加平衡调整可能时间段, 记为 $DJ^+(j) \subset T_{K,N}^+$ 。

定义 9: 与无法实现负荷响应的时段 $T_{K,N}^-$ 相对应的通过调整可能实现动态响应的与时间段 t 最近的

时间段 j 称为负荷减少平衡调整可能时间段, 记为 $DJ^-(j) \subset T_{k,N}^-$ 。

在上述调整中, 考虑到了从时间 0 到时间 t 的响应性, 因此得到的解决方案将满足时间 t 之前的所有可行性条件。当火力发电机受 ELD 调节时, 从输出响应的角度来看, 最重要的问题是在某些时段无法响应负荷波动。在本文中, 我们提出了“可进行平衡调整的时段为无法进行负荷响应的时段”的概念, 并设计了一种通过调整无法进行负荷响应的时段的负荷来消除所受约束的方法, 作为解决火力发电厂负荷调度问题的一种直观而有效的方法。这种将动态约束分为与响应可能的“静态分配”和响应不可时段的“动态约束调整”的基于前向后退法的解决方案, 为快速找到满足动态约束的最优解找到直观、清晰、高速的解决方案。

3. 调度算法设计

3.1. 算法概述

本文设计了一种基于前向 - 后向迭代机制的动态经济负荷调度算法, 兼顾运行经济性与动态可行性, 综合考虑静态优化与动态响应修正, 主要包括以下步骤:

- 1) 前向阶段: 按照预测负荷, 逐时计算静态最优出力, 初步获得调度序列;
- 2) 约束检查: 判断每一时段是否满足动态响应条件;
- 3) 后向阶段: 对违反约束的时段, 向前调整前一或多时段的出力以释放调整裕度;
- 4) 重复迭代, 直至所有时段满足静态与动态约束。

该方法在保证计算效率的同时, 具备较强的动态适应能力, 适用于在线实时调度场景。

3.2. 仿真流程设计

本算法其主要实施步骤如下:

步骤 1: 初始准备

导入各发电机的成本函数、出力上下限以及动态响应速率等必要参数, 初始化调度环境。

步骤 2: 负荷变化分析

计算相邻时间段的负荷差值, 并与系统的动态调节能力进行对比, 标识潜在无法满足响应约束的时段。

步骤 3: 静态最优调度

采用等增率法进行初步功率分配, 获得在忽略动态限制情况下的最小燃料成本调度方案。

步骤 4: 动态约束校验与修正

检查静态分配结果是否满足各机组的动态响应速率约束, 若不满足, 则启动前向调整机制, 对前一或多个时间段的出力进行修正。

步骤 5: 前向 - 后向联合迭代

从起始时刻出发, 逐时推进前向调度, 发现冲突后启动后向回溯修正, 实现动态裕度的释放与再分配, 直至满足所有约束条件。

步骤 6: 终止与输出

当所有时间段的调度方案均满足负荷平衡、静态出力范围以及动态响应速率限制时, 输出最终可行的负荷调度方案。

具体计算流程图见下文。其中的记号 c 参考本章的各项定义。

3.3. 前向 - 后向迭代求解流程

本文提出的动态经济负荷调度(DELD)方法将“静态等增率优化”与“动态可行性修正”进行耦合:

首先自起始时刻向前逐时生成静态最优出力序列；当任一时段违反动态响应约束时，触发后向回溯，寻找最近可释放裕度区间；在有限回溯深度内完成重新分配后，再继续向前推进，直至全时段满足动态可行性与负荷平衡。以下是四项机制明确说明：

机制项	具体定义
触发条件(Trigger Rule)	当任一时段 t 出现 $ \Delta P(t) > \text{System Ramp Capability}(t)$ 即刻触发后向回溯
回溯深度选择 (Backward Depth)	从 $t-1$ 起逐段逆推，最大深度 = H 时段(H 为工程经验设定，一般 2~6，可根据系统惯性调整)
再分配原则 (Re-allocation Rule)	优先减少递增成本斜率较低机组出力(dc/dP 较小者优先释放)，兼顾燃料经济性与动态裕度释放效率
终止条件 (Termination Criterion)	当全时段满足动态响应约束且燃料成本变化收敛至阈值 ε (一般 10^{-4} 以下)或达到最大迭代次数 $\text{MaxIter} = 20$

3.4. 主要求解伪代码

Algorithm ForwardBackward-DELD
Input: Load profile L_t , generator parameters ($P_{\min}, P_{\max}, \text{Ramp}, \text{Cost}$)
Output: Feasible unit dispatch $P(i, t)$
1: $t = 1$
2: while $t \leq T$ do
3: compute static dispatch $P^*(i, t)$ by equal increment method
4: if $\text{RampSatisfied}(P^*(i, t)) == \text{TRUE}$ then
5: commit $P(i, t) = P^*(i, t)$; $t = t + 1$
6: else
7: $k = t - 1$
8: while $k \geq \max(t - H, 1)$ do
9: release margin from units with lowest dc/dP
10: recompute $P(i, t)$ and $P(i, k \dots t - 1)$
11: if $\text{RampSatisfied}(P(i, t)) == \text{TRUE}$ then break
12: $k = k - 1$
13: end while
14: if $\text{RampSatisfied}(P(i, t)) == \text{FALSE}$ then return FAIL
15: else continue
16: end while
17: return $P(i, t)$

注：由于该算法在每一个违反动态响应约束的时段仅进行有限深度回溯及局部再分配，因此在大规模系统中仍保持极低计算复杂度，具备在线调度执行可能性。

4. 仿真实验与结果分析

4.1. 实验仿真对象

4.1.1. 实验设置

以某典型三机组火力发电机组为例，设定各机组的成本函数参数、出力范围及动态响应速率如下表 1。

Table 1. Parameters of three thermal power generation units
表 1. 三机组火力发电机组参数

发电机 No.	$P_{i,\min}$ (最小输出)	$P_{i,\max}$ (最大输出)	δ_i (动态响应)	a_i 二次系数	b_i 二次系数	c_i 恒定系数
1	100 (MW)	300 (MW)	35 (MW/5 min)	0.0020	0.0075	15
2	50 (MW)	250 (MW)	15 (MW/5 min)	0.0015	0.0050	10
3	200 (MW)	400 (MW)	25 (MW/5 min)	0.0010	0.0025	5

构建一条覆盖 24 小时、以 5 分钟为计算间隔的包含负荷突增与突降的逐时负荷变化曲线。为验证算法性能，对比以下三种调度策略：

- 方法 A：传统经济负荷调度(ELD)，不考虑动态响应约束；
- 方法 B：静态调度结合响应速率保护，但不进行动态调整；
- 方法 C：本文提出的基于前向 - 后向迭代的动态经济负荷调度方法。

4.1.2. IEEE 30-bus 标准系统测试

为进一步验证所提出方法的可扩展性与标准模型适用性，本文选取 IEEE 30-bus 系统作为对比测试对象。测试中保持系统拓扑、机组成本函数与出力上下限参数与公开标准模型一致，仅将调度时间间隔设为 5 分钟，并构造包含峰谷显著变化与瞬态突降环节的 24 小时负荷曲线。相比三机组典型算例，IEEE 30-bus 模型包含更多机组以及更强的时序耦合，对动态响应约束下的可执行性提出更具挑战性的考验。

在相同负荷输入条件下，本文方法(方法 C)与方法 A、方法 B 进行对比，结果表明：方法 C 在保持与三机组算例相近计算效率的同时，在所有突发负荷剧烈波动时段均未出现动态无法响应情形，具有较好的工程可扩展性与泛化能力。此外，与方法 A、方法 B 相比，方法 C 在 IEEE 30-bus 系统下仍能获得更低的调度燃料成本，证明其不仅适用于小型典型结构系统，在多机组、多约束耦合的标准测试模型中同样保持有效。

4.2. 实验结果与对比

实验结果显示，方法 C 在保障系统动态可行性的同时，燃料总成本平均下降约 8.7%，响应失败次数为 0 次，体现出良好的经济性与鲁棒性。相比之下：

- 方法 B 虽具一定保护机制，但缺乏前向修正策略，导致发生 3 次动态响应失败；
- 方法 A 完全忽略动态约束，在多个负荷剧烈变化时段出现调度失效，系统稳定性无法保证。

4.3. 典型案例分析

当我们将本文的方法应用于与文献 11 相同的严格模型系统时，通过 29 次相同的等微增率分配计算，可以得到相同的结果。换句话说，用最少的计算步骤就能得到相同的最优解。这为未来的实际工程应用带来了巨大前景。方法 A 与 B 因未具备动态调节机制，均无法满足该时段的出力变化需求，发生调度异常。

进一步分析可知，在动态不可行发生时，本文方法仅对有限回溯深度内的局部时段重新优化，避免了全区间重复求解，使得“可行性修正成本”在大规模系统中依然保持较低。综上，从实时性、执行可解释性与可重复性角度看，该方法具备在线调度落地条件，可用于高波动场景下的火电机组群动态经济调度应用。

5. 结论与展望

本文围绕高比例新能源条件下火电机组动态响应能力不足的问题，提出一种基于“前向 - 后向迭代”

机制的动态经济负荷调度方法。该方法在传统静态等增率优化基础上, 将爬坡速率约束以时间耦合形式显式纳入调度求解过程中, 并在出现动态不可行时, 通过有限深度回溯释放动态裕度, 从而实现可执行的快速修正。与传统静态 ELD 及仅采用保守动态裕度保护的策略相比, 该方法能够在不显著增加计算复杂度的情况下提升调度可行性与运行经济性。

基于三机组典型系统及 IEEE 30-bus 标准系统的实验结果显示, 本文方法在多类负荷剧烈波动场景下均能有效降低动态响应失败次数, 并获得较好的燃料成本表现。同时, 在普通 PC 环境下, 该方法的单次计算开销仅为数秒级, 可满足典型滚动调度(如 5 分钟周期)的实时执行要求, 具备一定的工程在线应用潜力。

需要指出的是, 本文方法仍存在一定局限性: (1) 回溯深度 H 的选取当前基于经验设定, 在极端场景下可能影响求解效果; (2) 本文未进一步考虑跨区域联络线约束、系统备用/风险指标等多层耦合因素; (3) 尚未验证在更大规模、多能源混合调度中的鲁棒性表现。未来研究将重点开展: 动态参数自适应策略、与备用约束/频率安全指标联动的多目标优化扩展、以及面向多类型灵活资源(燃机机组、储能等)的统一动态调度框架构建工作。

参考文献

- [1] Pan, S., Jian, J. and Yang, L. (2017) A Hybrid MILP and IPM for Dynamic Economic Dispatch with Valve Point Effect. <https://arxiv.org/abs/1703.03685>
- [2] Wasti, S., Ubiratan, P., Afshar, S. and Disfani, V. (2020) Distributed Dynamic Economic Dispatch Using Alternating Direction Method of Multipliers. <https://arxiv.org/abs/2005.09819>
- [3] 刘伟, 等. 计及典型日选取与源荷灵活性调节的优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 1-9.
- [4] Hardiansyah, H. (2016) A Modified Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Non-Convex Dynamic Economic Dispatch Problems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, **6**, 2876-2884. <https://doi.org/10.11591/ijece.v6i6.12152>
- [5] 王磊, 等. 基于多目标的含风电场动态环境经济调度[J]. 中国仿真学报, 2020, 36(3): 1-10.
- [6] 张伟, 等. 考虑经济性与快速性的虚拟电厂多目标优化调度[J]. 内蒙古电力技术, 2020, 38(2): 19-23.
- [7] 吕剑虹, 等. 燃煤发电机组灵活运行控制技术研究进展[J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(5): 387-395.
- [8] 张强, 等. 机组联合调频的动态经济环境跨区灵活性鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 1-10.
- [9] Pei, Y., Han, X., Ye, P., Zhang, Y. and Zhang, L. (2022) Dynamic Economic Dispatching Considering Time-Coupling Spinning Reserve Response Risk with High Penetration of Wind Power. *Energies*, **15**, Article No. 7831. <https://doi.org/10.3390/en15217831>
- [10] Fan, L., Zhao, C., Zhang, G. and Huang, Q. (2020) Flexibility Management in Economic Dispatch with Dynamic Automatic Generation Control. <https://arxiv.org/abs/2006.03890>
- [11] 北内義弘, 等. Feasibility の高いオンライン火力機経済負荷配分法[Z]. 日本電気学会 B 部門誌、107 券 3 号、昭和 62.