

连续时间调度方法在电力系统 灵活运行中的应用综述

刘晶冠¹, 艾小猛¹, 周博², 薛熙臻³, 王盛世¹, 崔世常¹, 方家琨¹, 文劲宇¹
(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉市 430074; 2. 密西根大学安娜堡分校工业与运筹工程系,
美国密西根州 48109; 3. 南洋理工大学电气与电子工程学院, 新加坡 639798)

摘 要:【目的】面向调度时段内功率波动刻画与灵活性资源配置, 系统梳理连续时间调度方法在电力系统灵活运行中的应用现状与存在问题。【方法】首先对比离散时间与连续时间调度的数学描述与求解思路; 然后按发电、输电、储能、用电四类典型物理对象分类综述代表性应用与问题; 最后从数学角度提炼共性挑战并整理潜在理论发展方向。【结果】连续时间模型以连续曲线为决策变量, 约束涵盖导数、积分及微分方程; 求解思路主要包括类最优控制方法与伽辽金投影法。共性难点集中于连续时间随机性建模、启停/互斥等非凸约束求解, 以及微分方程约束处理。【结论】文章据此归纳连续时间调度方法在多时间尺度调度协同、规划评估与市场机制中的未来应用趋势与后续研究课题。

关键词: 电力系统调度; 可再生能源; 连续时间调度; 离散时间调度

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)01-0112-13

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.01.009

A Review of the Application of Continuous-Time Scheduling Methods in the Flexible Operation of Power Systems

LIU Jingguan¹, AI Xiaomeng¹, ZHOU Bo², XUE Xizhen³, WANG Shengshi¹, CUI Shichang¹,
FANG Jiakun¹, WEN Jinyu¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074,
China; 2. Department of Industrial and Operations Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA;
3. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University,
Singapore 639798, Singapore)

ABSTRACT: [Objective] To enhance the representation of intra-interval power fluctuation and the allocation of flexibility resources, this paper provides a systematic review of the applications and existing challenges of continuous-time scheduling methods for flexible power system operation. [Methods] First, the mathematical formulations and solution paradigms of discrete-time and continuous-time scheduling are compared. Then, representative applications and problems are reviewed, organized according to four key domains: generation, transmission, storage, and demand. Finally, common challenges are synthesized from a mathematical point, and potential theoretical development directions are summarized. [Results] In continuous-time scheduling, decision variables are modeled as continuous trajectories, and constraints involve derivatives, integrals, and differential equations. The main solution paradigms include optimal-control-inspired methods and Galerkin-projection-based approaches. Shared difficulties mainly arise from modeling uncertainty in continuous time, solving nonconvex constraints such as unit commitment and charge-discharge exclusivity, and handling differential-equation constraints. [Conclusions] Based on these findings, this paper outlines future application trends and follow-up research topics of continuous-time scheduling in multi-timescale scheduling coordination, planning assessment, and market mechanism design.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177088).

KEYWORDS: power system scheduling; renewable energy; continuous-time scheduling; discrete-time scheduling

0 引言

大力推动新能源替代化石能源是实现能源绿色低碳转型、达成碳中和目标的关键途径。截至2025年10月,我国新能源发电装机容量已达1730 GW,占总装机容量的46.1%,且预计未来将持续快速增长,高比例新能源并网将成为电网的基本形态^[1]。然而,测算显示,在极端天气条件下,新能源出力的预测误差甚至可达40%^[2];此外,新能源在2 h内的出力最大波动可达装机容量的20%~35%^[3]。可见,新能源具有强随机性和高波动性,这对高比例新能源电力系统的灵活运行提出了更高要求^[4]。

电力系统运行的灵活性是指在合理配置和高效调用各类灵活性资源的基础上,以相对可控的成本有效应对发电、电网及负荷动态特性的能力^[5]。为确保电力系统的安全经济运行,现有调度机制通常采用固定时间间隔(如1 h、30 min、15 min等)对连续时间负荷曲线进行离散化,以便通过代数优化模型求解^[6]。在新能源接入比例较低时,基于离散时间的调度模型在调度精度与计算复杂度之间实现了较为合理的平衡^[7]。然而,随着强波动性新能源的持续接入,电力系统净负荷在调度时段内的快速变化愈发显著,传统的离散时间建模方法难以考虑调度时段内的波动,面临严峻挑战^[8]。

为应对上述挑战,最直接的思路是通过缩短时间间隔来提高模型精度。文献[8]在比较60 min、30 min、20 min和10 min的调度时段长度后发现,采用次小时级调度不仅能够降低期望运行成本,还能提高结果精度。文献[9]提出了双时间尺度的储能容量配置方法,将小时级的能量需求与小时内的功率调整约束相结合,实现了更精确的功率匹配。文献[10]通过时段聚类提出了自适应时间分辨率的调度模型,在一定程度上兼顾了计算效率与模型精度。然而,这些研究本质上仍处于离散时间调度框架内,通过提高时间分辨率进行改进,显著增加了计算复杂度,未能从根本上解决对连续时间曲线进行离散近似的内在难题。

在高比例新能源带来的快速动态变化背景下,学者们开始探索连续时间调度方法的理论与实践路径。与传统离散时间调度方法不同,连续时间调度方法将功率变化建模为光滑的连续曲线,优化变量为连续时间函数,从而将原问题映射为函数空间优化或最优控制问题^[11]。考虑到负荷及新能源出力本质上是连续时间随机过程,连续时间调度方法有助于更精确地刻画系统运行过程,实现对新能源波动

的细致描述和灵活性资源的有效挖掘^[12]。尽管直接求解连续时间优化问题在数学与计算上存在挑战,但已有学者提出了高效的求解策略。例如,基于Bernstein多项式插值的方法能够将无穷维函数空间优化问题映射为多项式系数所张成的有限维代数空间优化问题,从而在保持时间连续刻画优势的同时,显著降低计算复杂度^[13]。因此,连续时间调度方法已成功应用于电力系统的发电侧机组组合、输电侧输配协同、储能侧电池套利和负荷侧资源聚合等调度问题,初步显示了其潜在应用价值。

然而,连续时间调度与传统离散时间调度在数学描述和求解思路上存在显著差异,目前的研究尚缺乏对连续时间调度方法的系统梳理与总结。为此,本文将从发电侧、输电侧、储能侧和用电侧四类典型物理对象出发,介绍连续时间调度方法的应用现状,并从数学层面总结该方法面临的共同技术挑战;进而,探讨该方法在随机性因素建模、非凸约束求解和偏微分方程约束求解方面的潜在理论发展方向;最后,展望该方法在多时间尺度调度机制、电力系统规划和市场机制等领域的未来应用趋势。

1 连续时间调度方法简介

为了阐明连续时间调度方法与传统离散时间调度方法的区别与联系,本节首先介绍这两种方法的数学描述,随后阐述连续时间调度方法的求解思路。

1.1 数学描述

1.1.1 离散时间调度方法

调度时段示意图如图1所示,传统离散时间调度方法将调度周期 H 划分为 N 个长度为 Δt 的时段,每个时段以区间 $[t_n, t_{n+1}]$ ($n=1, 2, \dots, N$)表示。例如,24 h的日前调度周期可划分为24个等长时段,每个时段为1 h。在调度期间,任一时刻 τ 的净负荷需求 $L(\tau)$ 通常用一组离散阶梯状曲线 L_i ($i=1, 2, \dots, N$)描述,如图2所示;每个时段内,净负荷需求被视为定值,通常由日前预测确定。类似地,调度模型中的决策变量 $P(\tau)$ (例如火电机组出力)也用一组待优化的阶梯状曲线 P_i ($i=1, 2, \dots, N$)来描述机组在各时段的出力变化。



图1 调度时段示意图

Fig. 1 Illustration of scheduling periods

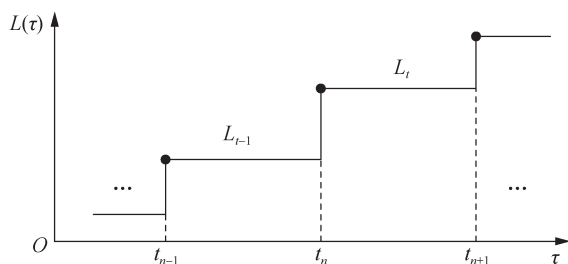


图2 离散时间负荷曲线示意图

Fig. 2 Illustration of discrete-time load profiles

1.1.2 连续时间调度方法

在离散时间优化调度模型中,通常忽略时段内功率的变化过程,其调节能力主要体现在时段间功率的变动(如图3中黑色实线所示)。当风电、光伏等新能源比例较低时,系统调节能力较为充裕,此时该简化模型适用;但随着新能源比例不断提升,系统调节需求也相应增加。新能源出力的波动可能发生在时段内任意时刻(如图3中绿线所示),导致时段内变化幅度远大于时段间。若继续使用离散时间模型,则必须进一步细分时段(如图4中黑线所示),使决策变量和约束数量大幅增加,难以应对大规模调度问题。背后更深层次的缺陷在于,离散时间方法通过差分近似求导,本质上无法准确刻画时段内功率的连续变化。

与之不同,连续时间调度方法能准确描述功率对时间的导数。具体而言,当调度周期无限细分($\Delta t \rightarrow 0, N \rightarrow \infty$)时,模型中的参数(如净负荷)和决

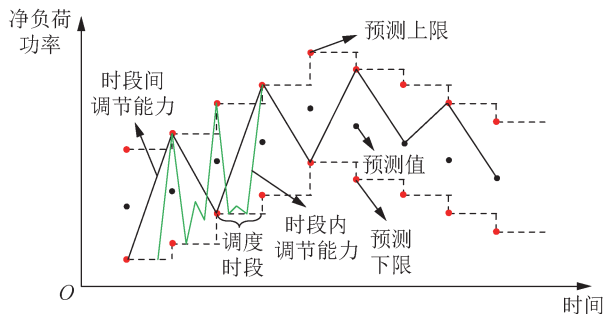


图3 时段间和时段内调节能力需求示意图

Fig. 3 Illustration of inter-interval and intra-interval flexibility requirements

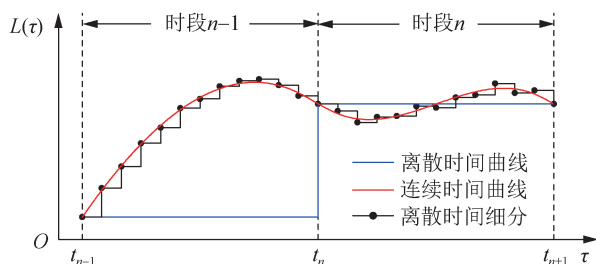


图4 离散时间尺度细分建模与连续时间建模

Fig. 4 Discrete-time subdivision and continuous-time modeling

策变量(如机组出力)可视为一条显含时间变量 τ 的连续曲线。实际上,对于连续可导曲线,可利用泰勒展开等方法近似为多项式形式。因而,传统离散时间调度方法可视为连续时间方法的一种“特例”(即用零次多项式表示每个时段的功率曲线),而连续时间方法则采用高阶多项式对功率曲线进行更精细描述。

1.1.3 两种调度方法对比

记 $F(\cdot)$ 、 $G(\cdot)=0$ 与 $H(\cdot)\leq 0$ 分别代表目标函数(如最小化发电成本)、等式约束(如功率平衡)和不等式约束(如线路潮流限制)。一般形式的离散时间优化问题如式(1)所示。

$$\begin{cases} \min \sum_t F(P_t) \\ \text{s.t. } G(P_t) = 0 \\ H(P_t) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

相应地,一般形式的连续时间优化问题如式(2)所示。

$$\begin{cases} \min \int_{\mathcal{H}} F(P(\tau), dP(\tau)/d\tau, \int P(\tau)d\tau) d\tau \\ \text{s.t. } G(P(\tau), dP(\tau)/d\tau, \int P(\tau)d\tau) = 0 \\ H(P(\tau), dP(\tau)/d\tau, \int P(\tau)d\tau) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

表1比较了离散与连续时间调度方法的数学描述。由表1可知,连续时间优化方法能够准确捕捉时段内功率变化的全过程,更细致地刻画时段内功率爬坡(导数)和能量变化(积分),从而更好反映实际运行中的灵活性供需平衡,确保电力系统的运行安全;但由于其属于无穷维函数空间优化问题,求解难度高于离散时间模型。

从调度结果角度看,图5对比了不同方法在日前调度与实时运行中的表现。在新能源占比较高的系统中,灵活性需求在时段内波动明显,实际需求呈现为图5中黑色阶梯状曲线。由于离散时间调度未充分计及时段内波动,其实时可用灵活性(图5(a)红色虚线)难以满足日内实时需求,存在供需不平衡风险;而连续时间调度能捕捉时段内需求的快速变化,其实时可用灵活性(图5(b)红色虚线)明显更高,从而有效避免灵活性不足问题。

在实际应用中,文献[11, 13]指出,离散时间机组组合模型往往低估净负荷爬坡需求,导致日前调度资源配置不足,进而引发日内功率不平衡和切负荷风险;而连续时间模型则能准确捕捉时段内功率实时变化,显著降低运行成本和爬坡不足风险。文献[12]亦表明,离散时间经济调度模型无法刻画机组时段内的实际爬坡过程,可能高估机组的能量交付能力,从而使得发电计划违背实际爬坡约束,导致该计划在实际运行中不可执行。相比之下,连续时间模型则能提供更为实际可行的出力方案。

表 1 离散/连续时间调度模型对比
Table 1 Comparison of discrete-time and continuous-time dispatch models

对比项	离散时间调度	连续时间调度	对比分析
变量表达	代数空间离散点 P_i	函数空间连续曲线 $P(\tau)$	离散时间调度结果受调度时段步长限制,无法描述调度时段内功率变化过程
约束表达	功率差分 $(P_i - P_{i-1})/\Delta t$	功率求导 $dP(\tau)/d\tau$	离散时间建模无法准确刻画调度时段内的实时爬坡需求
	功率求和 $\sum P_i$	功率积分 $\int P(\tau)d\tau$	离散时间建模无法准确评估调度时段内的能量变化关系
模型结构	如式(1)	如式(2)	离散时间调度模型属于有限维代数空间优化问题,相较于无穷维函数空间优化的连续时间调度模型更易于求解

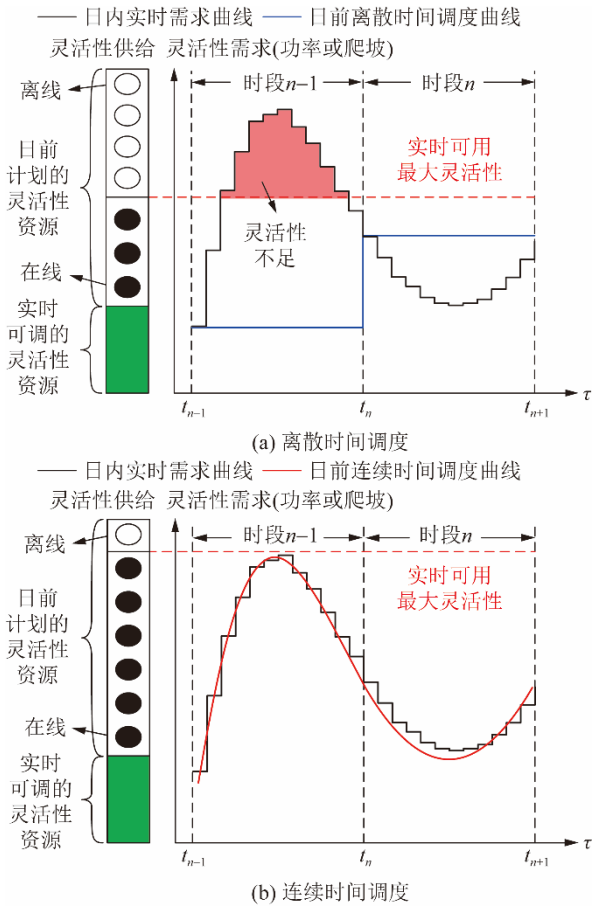


图 5 不同调度方法的日前调度方案与实时运行结果对比示意图

Fig. 5 Comparison of day-ahead scheduling plans and real-time operation results under different scheduling methods

1.2 求解思路

与传统离散时间调度模型的有限维代数空间优化不同,连续时间调度模型属于无穷维函数空间优化问题,故传统求解方法不再适用。如表 2 所示,现有求解思路主要分为两类:类最优控制方法^[14]和伽辽金投影法^[15]。

类最优控制方法的核心在于将连续时间调度问题转化为最优控制问题。常用技术包括变分法^[16-17]、动态规划^[18]及模型预测控制^[19-20],这些方法在一定条件下适用于连续时间优化,但在电力系统调度的实际应用中往往受限于大规模复杂约束的处理,具体

特点见表 2。

表 2 连续时间调度模型求解方法对比
Table 2 Comparison of solution methods for continuous-time dispatch models

求解思路	求解技术	方法特点
类最优控制方法	变分法	难以处理电力系统调度中大规模不等式约束
	动态规划	面对电力系统大规模状态和决策空间会出现“维数灾”
	模型预测控制	本质上倒退回离散时间调度方法
伽辽金投影法	普拉斯变换	对大规模不等式约束问题处理能力不足
	配点法	模型变换过程中引入大量非线性约束,计算负担沉重
	Bernstein 多项式	不引入额外非线性项,兼顾高变换精度和低计算复杂度

伽辽金投影法通过基函数的线性组合逼近连续时间函数,将原问题从无穷维函数空间投影到有限维系数空间,从而实现高效数值求解。常用方法包括拉普拉斯变换^[21]、配点法^[22-23]以及 Bernstein 多项式方法^[11]等。其中,基于 Bernstein 多项式的方法因不引入额外非线性项,兼具高精度与低计算复杂度,近年来备受关注^[24-25];关于其数学性质及具体变换方法,详见文献[13]。

2 应用现状与存在问题

连续时间调度方法已在发电侧、输电侧、储能侧和用电侧等典型物理对象中得到广泛应用。由于各对象物理特性存在差异,其应用侧重点各不相同。本节综述该方法在各应用领域的现状与存在问题,并从数学角度总结当前面临的共同技术挑战。

2.1 发电侧应用现状

发电侧灵活性调度主要包括两大类:可控调节电源和不可控随机性电源。

1) 可控调节电源。

可控调节电源(如火电机组、大型水电机组)是目前应对新能源随机性与波动性的主要手段。此类

应用的关键在于如何准确刻画机组的连续时间运行过程。

文献[11]首次提出基于 Bernstein 多项式插值的方法,用连续时间曲线描述火电机组的出力,并将出力约束转化为含功率微分项(机组爬坡)的线性不等式约束。进一步,文献[26]指出 Bernstein 多项式具备线性升降阶特性,可有效耦合不同时间尺度下的爬坡曲线;因而,采用不同阶次的 Bernstein 多项式能更精确刻画火电机组在日前与实时两个阶段的出力约束。在此基础上,文献[27-28]提出了含库容约束的大型水电机组连续时间调度模型,其约束同时包含功率积分(水电库容)和功率微分项。除了 Bernstein 多项式的描述方法外,文献[12, 29]将机组运行建模为基于功率微分的连续时间随机过程,并运用变分法处理模型中的微分与积分项。然而,这类方法求解复杂度较高,且难以处理包含整数变量的机组启停过程约束,因此在实际电力系统中应用受到限制。

尽管现有的连续时间调度方法在可控调节电源的爬坡、功率和能量约束建模上已有较为成熟的方案,但对于机组启停过程的连续时间描述仍较为粗糙。现有方法一般将可控机组的启停状态变化限定在调度时段交替时刻,用离散 0-1 变量 I_t 表示,如图 6 所示。虽然这种做法简化了机组调度模型,具有较高的计算可行性,但也限制了机组运行的灵活性。实际上,在电力系统调度中,机组的启停可能发生在运行过程中的任意时刻,而现有方法难以对此进行准确建模。

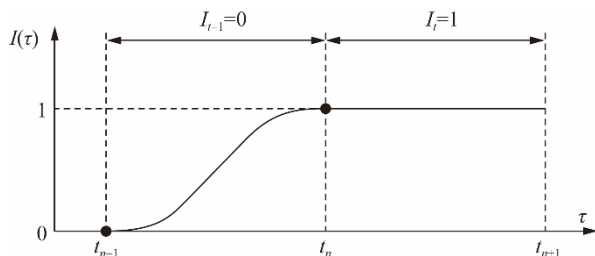


图 6 离散 0-1 变量描述机组启停过程

Fig. 6 Discrete 0-1 variables representing unit start-up and shut-down processes

2) 不可控随机性电源。

风电、光伏等不可控随机性电源,其出力不确定性主要源自风速、辐照度等气象因素,表现为预测误差。当预测误差在短期内难以有效降低时,系统需预留灵活性资源以应对实时波动。与可控调节电源的确定性建模不同,随机性电源的应用关键在于如何将随机性建模方法与连续时间调度方法结合。

一种思路是采用随机优化策略^[30]。该策略通过

生成多个典型随机场景,根据随机因素概率分布优化目标函数的期望值,从而得到最优调度决策。将随机优化策略与连续时间调度方法结合的关键在于如何描述连续时间下随机性因素的概率分布。文献[31-33]采用连续时间高斯过程描述负荷与风电的随机出力,并提出二阶矩匹配降维方法,用有限典型场景近似高维概率空间;但该方法预设概率分布,可能导致实际分布与模型结果偏差较大。为此,文献[13, 34-35]采用数据驱动方法,利用 5 min 分辨率的历史数据拟合连续时间概率分布,再通过场景削减和曲线拟合构造典型场景;但当历史数据不足时,拟合分布易与实际偏离较大^[36]。文献[37-38]则基于 5 min 历史数据,采用机会约束方法构建模糊集,确保在概率分布不确定性下约束违反概率不超过预设阈值。

尽管数据驱动的随机优化策略能够较好地近似随机因素的概率分布,但相比于离散时间,连续时间的概率分布属于更高维的问题,这对历史数据量的要求远高于传统离散时间,实际获取难度较大;此外,极高的维度使得连续时间所需的典型场景数量远高于离散时间,从而大幅增加了调度模型求解的计算负担。

另一种思路是采用鲁棒优化策略^[39]。与随机优化策略不同,鲁棒优化策略无须设定不确定性因素的概率分布,而是通过不确定性集合来表示其变化范围,寻求在最恶劣不确定性场景下的最优解。文献[40-41]采用高维盒式集合来刻画连续时间中的随机因素,并利用伯恩斯坦多项式插值将无穷维的连续时间不确定性集合投影到有限维的伯恩斯坦多项式插值系数空间,从而便于求解。然而,盒式集合忽视了新能源出力的连续时间相关性,考虑的爬坡场景通常过于严苛,可能影响调度结果的经济性。为此,文献[42]提出了一种基于预算的改进盒式集合方法,以降低集合的保守性。

然而,现有将鲁棒优化策略与连续时间调度方法结合的研究通常依赖人为预设的不确定性集合形状,缺乏基于实际数据的驱动,这可能导致预设集合与实际随机性因素集合之间存在较大偏差,从而影响系统鲁棒性的有效保证。

2.2 输电侧应用现状

与发电侧不同,连续时间调度方法在输电侧的应用关键在于如何对输电侧的复杂约束进行连续时间建模,尤其涉及稳态潮流非线性约束和暂态稳定高维微分方程约束。

在稳态潮流约束建模方面,文献[35, 41]采用线性直流潮流模型对连续时间稳态潮流进行建模,并

利用 Bernstein 多项式线性变换性质将潮流约束转化为线性代数约束,从而保证求解可行性。为应对线路数量增多带来的计算复杂度,文献[43]提出将连续时间调度与 Benders 分解相结合的加速策略,用于处理大规模 $N-1$ 线路约束;文献[44]则结合分布式交替方向乘法(alternating direction method of multipliers, ADMM)算法提出加速求解方案。然而,上述线性直流潮流模型本质上是对非凸潮流方程进行了线性近似,忽略了网损、无功功率和节点电压等物理约束,导致在配电网调度中误差较大,限制了其实际应用^[45]。为提高潮流建模精度,文献[22]采用配点法将连续时间非凸潮流方程转化为有限维非凸优化问题,但这显著增加了求解复杂度,限制了大规模应用。因此,目前尚未有连续时间潮流约束模型能够较好地平衡精度与计算复杂度。

在暂态稳定约束建模方面,文献[46-47]基于线性微分方程组描述扰动后电网频率的连续变化,并利用分段 Bernstein 多项式将频率稳定约束从函数空间约束转为代数空间约束,从而实现计算可行性。但系统暂态频率变化本质上为高维非线性微分方程组,线性化虽能求得解析解,却难以保证精度。为提高精度,文献[48]采用非线性时域微分方程组描述暂态过程,并设计基于 Bernstein 多项式变换的非线性约束近似方法,但该方法不仅大幅增加计算复杂度,其近似精度亦缺乏充分理论保障。因此,暂态稳定约束的连续时间建模同样面临精度与计算复杂度之间的两难问题。

2.3 储能侧应用现状

储能系统具备能量存储和功率时移功能,能够有效缓解功率平衡紧张^[49]。与发电和输电侧不同,储能调度中的功率、爬坡及能量变化可通过(偏)微分方程精确描述,连续时间调度方法有助于揭示储能在调度时段内的调节潜力^[50]。不同储能技术响应特性不同,因此储能侧应用关键在于建立适应不同储能特性的连续时间调度模型。

以锂离子电池为代表的电化学储能系统响应速度快,适合应对新能源短时波动^[51]。文献[52-55]通过时域线性微分方程组描述锂电池的爬坡、功率和能量约束,表明连续时间方法能揭示其在时段内的潜在能量平移能力;文献[56]提出基于区间归一化的储能连续时间调度方法,以满足多时间尺度下的灵活性需求。此外,储热与储气技术通过调节热/气负荷曲线,可作为虚拟储能参与电力系统调度^[57]。文献[58-59]将区域供电-供热系统中的储热罐、中央空调负荷建模为连续时间虚拟储能;文献[60-61]则

将气电联合系统中的储气罐建模为虚拟储能。然而,这些模型存在与发电侧可控调节电源类似的问题。由于储能模型无法同时充放电,因此需要用整数变量描述其充放电状态。类似于机组启停过程,这些连续时间模型将状态转换限定在调度时段交替时刻以确保模型的高效求解,致使储能在任一时段内仅能充电或放电,从而低估了其实际可调节能力。

随着电制氢技术的发展,管道储气通过将多余新能源转化为氢气或天然气并储存在管道中,为长期储能提供了新方案^[62]。文献[63-64]提出面向管道储气动态过程的线性偏微分方程约束模型,并设计了基于 Bernstein 多项式变换的连续时空调度模型,揭示天然气管道的时空调节潜力。然而,类似于暂态稳定约束建模,管道储气动态过程本质上是一组非线性偏微分方程组,现有线性近似模型可能不足以反映真实动态工况,而引入非线性则大幅增加求解复杂度,因此同样面临精度与效率的平衡问题。

此外,现有的连续时间调度方法通常仅针对单一储能资源进行建模,而实际调度往往需要同时考虑多种储能设备的异构响应。由于不同偏微分方程组的响应形式存在显著差异,连续时间模型的求解方法难以统一,因此专门针对单一储能类型设计的求解方法在实际应用中可能不再适用。

2.4 用电侧应用现状

与储能侧类似,电动汽车、分布式储能和温控负荷等用电侧分布式资源可通过连续时间(虚拟)储能模型进行建模,缓解电网灵活性压力^[65]。但与储能侧不同,用电侧设备单体容量较小且数量众多,为避免计算维度激增,通常需要引入负荷聚合商,将大量单体设备聚合为整体参与系统优化调度。此时,问题分为两个层次:上层(如图7绿色虚方框所示)由有限数量的负荷聚合商和可调机组共同参与系统集中调度;下层(如图7红色虚椭圆框所示)由负荷聚合商调度可控负荷设备,以分散响应上层的控制要求。若连续时间聚合模型过于保守,则无法充分发挥用电侧的调节潜力,导致整体供给能力下降;反之,若模型反映的调节能力超过实际,则可能引发调度方案不可行的运行风险。因此,用电侧应用的关键在于准确刻画海量负荷的连续时间聚合灵活性。

现有研究通常先为单一设备建立连续时间模型,再采用特定聚合方法描述聚合灵活性。文献[66-67]首先为电动汽车建立单体连续时间模型,进而利用排队论构建连续时间聚合队列。然而,该模型未考虑灵活性负荷的异质性,聚合精度难以保证。文献[35, 68]基于 Bernstein 多项式对单体空调负荷热

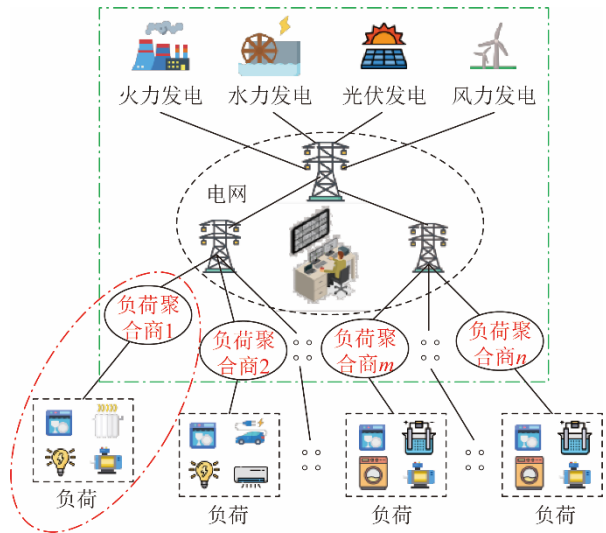


图7 双层聚合调度框架

Fig. 7 Bi-level aggregated scheduling framework

动态微分方程进行建模,并通过统一调度信号量化异构空调的聚合灵活性,但忽略了室外温度不确定性对聚合精度的影响。为此,文献[37]则提出基于机会约束的空调负荷聚合灵活性评估方法,以提高聚合可靠性。然而,目前的连续时间聚合技术通常

仅针对单一类型负荷设计。类似于储能侧的应用问题,在实际调度中,负荷聚合商可能需要同时处理多种连续时间异构负荷的聚合问题。由于不同负荷类型的响应存在显著差异,目前尚未出现适用于异构负荷的通用连续时间聚合技术。

现有负荷侧应用研究大多集中于上层集中调度或下层分散响应,鲜有探讨双层协同耦合的连续时间优化问题。与单层连续时间优化模型相比,双层模型的计算复杂性更高。尽管离散时间双层调度问题可以通过 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件降阶为单层优化,并利用大 M 法引入整数变量实现模型线性化^[69],但连续时间双层模型无法采用类似方法进行处理。因为与机组启停过程中的整数变量类似,现有连续时间调度方法无法求解连续时间函数域的整数变量,导致双层耦合优化问题在连续时间调度方法中难以高效求解。

2.5 应用现状小结

尽管连续时间调度方法在发电、输电、储能和用电侧的应用各有侧重,但在数学层面存在以下共同技术挑战,如表3所示。

表3 应用现状小结

Table 3 Summary of application status

数学层面技术挑战	发电侧举例	输电侧举例	储能侧举例	用电侧举例
随机性因素建模	新能源连续时间随机出力过程难以精确建模			室外温度随机性对温控负荷连续时间聚合模型的影响难以准确描述
非凸约束求解	机组启停过程中连续时间整数变量求解困难	交流潮流方程的连续时间非线性约束求解困难	电池充放电状态切换过程中的连续整数变量求解困难	包含负荷聚合商的双层连续时间优化问题求解困难
偏微分方程求解		频率暂态高维微分方程组难以解析求解	多时间尺度响应过程的偏微分方程组难以统一求解	异构负荷对应的偏微分方程约束难以统一聚合

3 潜在理论发展方向

基于连续时间调度方法在数学层面所面临的共同挑战,本节探讨该方法在随机性因素建模、非凸约束求解和偏微分方程约束求解三个方面的潜在理论发展方向。

3.1 随机性因素建模

数据驱动的随机性建模已在离散时间调度中被证明能有效刻画随机性对调度的影响^[39]。但在连续时间调度中,随机性因素的维度远高于离散时间,对数据量和计算复杂度提出更高要求。然而高维数据往往难以全面获取,因此连续时间随机性概率分布无法精确定量。为此,连续时间调度方法所面临的关键问题在于如何在概率分布不确定条件下对随机性因素进行连续时间建模,而离散时间调度对此已有成熟方案。

一种思路是构建数据驱动的不确定性集合,并采用非概率鲁棒优化方法来确保调度安全,从而自然处理概率分布的不确定性^[70]。在离散时间调度中,已有研究对数据驱动的随机因素集合建模进行了多种改进,如数据驱动的高维椭圆集合^[71]、高维菱形集合^[72]、高维多面体集合^[73]等。如能将其扩展到连续时间调度,有望降低连续时间鲁棒优化的保守性。

另一种思路是构建数据驱动的概率分布模糊集合^[74]。尽管基于数据的不确定性集合能够较准确地反映不确定性因素的变化范围,但其依赖最差场景进行决策,忽视了随机变量的概率分布信息,可能过于保守^[75]。近年来,分布鲁棒优化方法被提出,以克服这一不足^[76]。该方法无须预设概率分布,而通过数据构建模糊集合,并针对最劣概率分布进行决策^[30],既利用统计信息又保证优化鲁棒性^[77]。然而,

目前该方法在连续时间调度中的应用尚缺乏深入研究。

因此,随机性因素建模的潜在理论发展方向包括:

1)借鉴现有离散时间中数据驱动不确定性集合的构建方法^[30],利用函数空间基函数来构建连续时间随机性不确定性集合;

2)扩展现有代数空间中随机变量概率分布模糊集构建方法^[74, 78],研究连续时间函数空间中随机变量概率分布模糊集的建模方法及高效求解策略。

3.2 非凸约束求解

现有连续时间调度模型通常将整数变量取值变化限定在时段交替时刻,这与离散时间方法类似,通过牺牲部分可行域提高模型可求解性。然而,实际机组启停及储能充放电状态切换可能在任意时刻发生,将整数变量扩展到连续时间函数域有助于挖掘灵活性资源的更大调节潜力^[11, 79]。

另外,现有连续时间模型的求解算法难以直接处理非线性约束(如频率稳定约束和交流潮流约束)。虽然线性近似能降低计算复杂度,但近似精度不足以满足实际调度需求。离散时间调度中对此已有成熟处理方案,如用分段线性化方法逼近频率稳定约束^[80],以及用二阶锥松弛方法逼近交流潮流非线性约束^[81, 82]。但分段线性化须引入额外整数变量,连续时间方法难以直接借用;而二阶锥松弛虽转为凸约束,但仍为非线性约束,现有连续时间求解算法也难以有效处理。如果能将成熟的离散时间处理方法扩展至连续时间,将有助于平衡非线性约束重构精度与计算复杂度。

因此,非凸约束求解的潜在理论发展方向包括:

1)拓展现有离散时间代数域中整数变量的建模方法^[11],探索在连续时间函数域中的整数变量建模方法与高效求解技术;

2)借鉴现有离散时间中成熟的非线性约束变换手段^[83],研究平衡精度与计算复杂度的连续时间非线性约束重构方法。

3.3 偏微分方程约束求解

由于连续时间调度方法不依赖固定时间步长,因此可以较好平衡偏微分方程约束逼近精度与计算复杂度。然而,现有方法大多仅针对单一响应过程(如一次调频或管道储气过程)进行建模,而实际电力系统运行通常涉及多个动态响应过程的耦合,须同时建模多个不同响应形态的偏微分方程组^[64]。在这种情况下,各响应形态通常需要采用不同的基函数以确保逼近精度,导致统一求解变得困难。此外,

用电侧负荷聚合商在聚合异构灵活性负荷时也面临类似挑战^[84]。异构灵活性负荷可通过不同响应形态的偏微分方程表征,虽然聚合异构负荷有助于挖掘其协调潜力,但同样面临异构偏微分方程难以统一聚合的问题^[37]。

因此,偏微分方程约束求解的潜在理论发展方向包括:

1)拓展现有面向单一响应过程的连续时间调度方法^[63],设计适用于多类型响应过程偏微分方程约束的统一建模与高效求解技术;

2)改进现有面向同构用电侧灵活性资源的连续时间聚合方法^[37],探索在异构偏微分方程约束下的连续时间聚合技术及双层调控策略。

4 新的未来应用趋势

连续时间调度方法不仅将深刻改变电力系统中源、网、荷、储的建模方式,还可能引发调度运行机制、系统规划和市场机制的重大变革。本节将重点关注这些在第3节理论发展方向之外的未来应用趋势。

4.1 多时间尺度调度运行机制研究

当前电力系统调度通常在不同时间尺度上解耦进行。例如,日前调度通常以小时为单位进行机组启停决策;日内调度则以15 min为一个调度周期,通过滚动优化应对短期负荷和新能源波动;分钟级调度则关注频率变化和一次调频资源配置^[85]。

然而,随着高比例新能源的接入,传统离散时间方法在应对多时间尺度的随机性和波动性时明显受限^[86]。具体而言,固定时间步长的建模难以同时准确捕捉小时、分钟甚至秒级动态,导致不同尺度间动态耦合考虑不足^[87]。尤其是在新能源出力随机性和波动性交织作用的情况下,不同时间尺度之间的耦合作用显得尤为重要^[88]。例如,日内调度的误差可能通过分钟级的调频放大,从而影响系统运行的安全性和经济性^[89]。因此,未来的调度机制需要在多时间尺度之间建立更加紧密的耦合关系。连续时间调度方法因无步长限制,能自然描述从小时到秒级的动态变化,为多时间尺度统一建模提供可能。例如,利用高次多项式或分段光滑函数,可以在同一连续时间框架下同时刻画日前、日内和实时调度中的动态特性。然而,目前大多数连续时间调度研究集中于理论建模,未来的应用需要进一步将其与实际电力系统调度的序贯决策过程相结合。

基于此,未来应用趋势主要包括:

1)连续时间调度方法与多时间尺度预测技术结

合:未来研究可以探索将多时间尺度的预测模型(如小时级、分钟级和秒级预测)与连续时间调度方法相结合,从而更精准地捕捉新能源波动的动态特性^[90]。这需要将现有的离散点预测、离散概率预测和不确定性集合预测技术扩展到连续曲线函数域,以处理不同时间尺度的动态随机因素,并将其整合到调度模型中^[31]。

2)连续时间马尔可夫决策过程建模方法:实际电力系统的调度过程具有明显的马尔可夫决策特性,即每一阶段的调度决策仅依赖于上一阶段的运行结果^[91]。将现有的离散时间马尔可夫决策过程扩展到连续时间域,可以显式描述系统的多时间尺度动态耦合约束,充分发挥可调资源的多时间尺度潜在灵活性^[92]。

4.2 电力系统规划及电力市场机制研究

连续时间调度方法对电力系统规划和电力市场机制等领域的研究具有重要影响。

首先,在电力系统规划中,调度模型通常作为评估候选方案运行成本的基础^[93]。因此,调度模型的结构变化直接影响规划模型的设计。传统的离散时间方法在处理新能源渗透率提升、负荷增长等长期变化,以及新能源出力和负荷需求波动等短期动态时,由于单一时间步长的限制,常常存在协调不足的问题^[94]。相比之下,连续时间方法凭借无步长优势,可更准确地捕捉新能源渗透、负荷增长及动态波动,为规划提供新的思路。目前,时序生产模拟方法是电力系统规划中常用的主要方法,但该方法目前仍基于离散时间建模^[95]。因此,将连续时间调度与时序模拟方法相结合,构建高分辨率规划模型,将成为未来的重要应用趋势^[96]。

其次,调度问题在电力市场中占据核心地位,涉及各种交易撮合和出清结算^[97]。现有的离散时间调度策略所得到的节点电价,通常只能表征调度时刻的能量平衡特性^[98]。然而,电力系统的能量平衡具有实时性,随着调度时段内负荷和新能源出力水平的变化,系统约束集也会随之变化,从而导致节点电价(即约束对偶乘子)出现时段内波动^[99]。因此,现有的离散时间调度方法无法反映调度时段内负荷和新能源出力波动对节点电价的影响,也未能体现电能生产和消费的连续性^[100]。如果能将连续时间调度方法引入电力市场机制研究,将为电力市场提供更为准确的连续时间价格信号^[101]。虽然已有初步研究展示了连续时间定价优势^[99-101],但如何设计兼容现有市场框架的结算机制,特别是在处理不确定性和协调日前与日内定价方面,仍是亟待解决的关键问

题。综上所述,将连续时间调度方法融入电力市场机制研究,以提升市场效率并支持新能源大比例接入的运行需求,将成为未来的重要应用趋势。

5 结束语

连续时间调度方法通过采用光滑曲线描述功率变化,精准捕捉时段内供需波动,从而在新能源占比逐步提高的电力系统中实现灵活性资源的可靠配置。本文系统阐述了该方法的数学模型与求解思路,并对发电、输电、储能和用电等环节的应用现状进行了分类讨论。在总结现有技术挑战的基础上,本文展望了随机性建模、非凸约束求解及偏微分方程约束求解等理论发展方向,并探讨了其在多时间尺度调度、电力系统规划和市场机制中的未来应用前景。期望本研究能为大规模新能源接入背景下电力系统的灵活运行提供有益参考。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

刘晶冠、周博、薛熙臻、王盛世进行了论文撰写和图表制作,艾小猛、方家琨、崔世常、文劲宇参与了论文指导与修改。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2025 年 1—10 月份全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2025-11-25) [2025-12-01]. <https://www.nea.gov.cn/20251125/c08a5f9b4a54481696a432ecd6c70dd3/c.html>.
- [2] 黄豫. 高比例消纳新能源关键在于提升电力系统灵活性(数字电网)[N]. 中国能源报, 2021-07-12(04).
- [3] 姚金楠. 新能源急需精准“天气预报”[N]. 中国能源报, 2022-02-21(9).
- [4] 李乔楚, 罗平亚, 张鹏, 等. 面向碳达峰的中国能源系统转型路径及其异质性分析[J]. 全球能源互联网, 2025, 8(5): 530-541. LI Qiaochu, LUO Pingya, ZHANG Peng, et al. Analysis of transition path and heterogeneity of China's energy system under the goal of carbon peaking [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2025, 8(5): 530-541.
- [5] 王伟健, 刘敏. 基于改进蝗虫算法的多能源电力系统调度[J]. 分布式能源, 2025, 10(4): 92-102. WANG Weijian, LIU Min. Multi-energy power system scheduling based on improved grasshopper algorithm [J]. Distributed Energy, 2025, 10(4): 92-102.
- [6] 杨鹏, 唐人, 吴君. 碳排放追踪下的电力系统源荷多时间尺度节能调度方法[J]. 分布式能源, 2024, 9(2): 81-88. YANG Peng, TANG Ren, WU Jun. A source-load multi-timescale energy-saving scheduling approach for power systems under carbon

- flow emission tracking[J]. *Distributed Energy*, 2024, 9(2): 81-88.
- [7] ZHANG M H, ZHOU Y, XIANG M X, et al. A methodology for building generation trajectories to balance continuous-time load profiles[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2025, 40(2): 1609-1622.
- [8] BAKIRTZIS E A, BISKAS P N. Multiple time resolution stochastic scheduling for systems with high renewable penetration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 1030-1040.
- [9] 青辰, 魏震波, 刘洋, 等. 基于双时间尺度模型预测控制的灵活性资源动态调度[J]. *高压电器*, 2025, 61(5): 31-40, 52.
QING Chen, WEI Zhenbo, LIU Yang, et al. Dynamic scheduling of flexible resources based on dual-time scale model predictive control[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(5): 31-40, 52.
- [10] PINEDA S, FERNÁNDEZ-BLANCO R, MORALES J M. Time-adaptive unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 3869-3878.
- [11] PARVANIA M, SCAGLIONE A. Unit commitment with continuous-time generation and ramping trajectory models[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(4): 3169-3178.
- [12] YUAN W, ZHAI Q Z. Power-based transmission constrained unit commitment formulation with energy-based reserve[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(2): 409-418.
- [13] ZHOU B, FANG J K, AI X M, et al. Flexibility-enhanced continuous-time scheduling of power system under wind uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(4): 2306-2320.
- [14] 邵梦真, 余长君. 最优控制问题的直接法综述[J]. *运筹学学报*, 2023, 27(4): 81-105.
SHAO Mengzhen, YU Changjun. A survey of direct methods for optimal control problems[J]. *Operations Research Transactions*, 2023, 27(4): 81-105.
- [15] CHEN J J, ZHU J Q, LIU H X, et al. Improved ADP-based limited-iterative decentralized algorithm for optimal power flow of networked microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2025, 40(3): 2192-2204.
- [16] ABRAHAM E, KERRIGAN E C. Optimal active control and optimization of a wave energy converter[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 324-332.
- [17] SONG Y, LIU T, LI G. Adaptive robust optimal control of constrained continuous-time linear systems: a functional constraint generation approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2025, 70(2): 1312-1319.
- [18] LEITHON J, SUN S M, LIM T J. Demand response and renewable energy management using continuous-time optimization[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(2): 991-1000.
- [19] SOKOLER L E, DINESEN P J, JØRGENSEN J B. A hierarchical algorithm for integrated scheduling and control with applications to power systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(2): 590-599.
- [20] MAHARJAN S, KHAMBADKONE A M, PENG J C. Robust constrained model predictive voltage control in active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1): 400-411.
- [21] ZHOU Y Z, GU C H, WU H, et al. An equivalent model of gas networks for dynamic analysis of gas-electricity systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4255-4264.
- [22] DENG Z M, LIU M B, CHEN H L, et al. Optimal scheduling of active distribution networks with limited switching operations using mixed-integer dynamic optimization[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 4221-4234.
- [23] ZLOTNIK A, ROALD L, BACKHAUS S, et al. Coordinated scheduling for interdependent electric power and natural gas infrastructures[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(1): 600-610.
- [24] YOUSEFI S A, BEHROOZIFAR M. Operational matrices of Bernstein polynomials and their applications[J]. *International Journal of Systems Science*, 2010, 41(6): 709-716.
- [25] LI W H, BAI L, CHEN Y M, et al. Solution of linear fractional partial differential equations based on the operator matrix of fractional Bernstein polynomials and error correction[J]. *International Journal of Innovative Computing and Applications*, 2018, 14: 211-226.
- [26] BAGHERINEZHAD A, KHATAMI R, PARVANIA M. Continuous-time look-ahead flexible ramp scheduling in real-time operation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 119: 105895.
- [27] NAVERSEN C Ø, HELSETH A, LI B S, et al. Hydrothermal scheduling in the continuous-time framework[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 189: 106787.
- [28] NAVERSEN C Ø, PARVANIA M, HELSETH A, et al. Continuous hydrothermal flexibility coordination under wind power uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(4): 1900-1912.
- [29] NYCANDER E, MORALES-ESPAÑA G, SÖDER L. Security constrained unit commitment with continuous time-varying reserves[J]. *Electric Power Systems Research*, 2021, 199: 107276.
- [30] 张郁, 苑波, 黄石成, 等. 考虑高比例可再生能源接入的有源配电网经济调度策略研究[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(1): 158-166.
ZHANG Yu, YUAN Bo, HUANG Shicheng, et al. Research on economic dispatching strategy for active distribution network considering high penetration of renewable energy source[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(1): 158-166.
- [31] KHATAMI R, PARVANIA M, NARAYAN A. Flexibility reserve in power systems: definition and stochastic multi-fidelity optimization[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 644-654.
- [32] KHATAMI R, PARVANIA M. Stochastic multi-fidelity scheduling of flexibility reserve for energy storage[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1438-1450.
- [33] NIKOOBAKHT A, AGHAEI J, SHAFIE-KHAH M, et al. Minimizing wind power curtailment using a continuous-time risk-based model of generating units and bulk energy storage[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 4833-4846.
- [34] NYCANDER E, MORALES-ESPAÑA G, SÖDER L. Capacity and intra-hour ramp reserves for wind integration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(3): 1430-1443.
- [35] LE L L, FANG J K, AI X M, et al. Aggregation and scheduling of multi-chiller HVAC systems in continuous-time stochastic unit commitment for flexibility enhancement[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(4): 2774-2785.
- [36] ZHANG M L, LE L L, FANG J K, et al. Stochastic unit commitment with air conditioning loads participating in reserve service[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(16): 2977-2985.

- [37] LIU J G, AI X M, FANG J K, et al. Continuous-time aggregation of massive flexible HVAC loads considering uncertainty for reserve provision in power system dispatch [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(5): 4835-4849.
- [38] MAJIDI M, PARVANIA M, BYRNE R. Risk-based stochastic scheduling of centralised and distributed energy storage systems [J]. IET Smart Grid, 2023, 6(6): 596-608.
- [39] 黄定威, 王锋, 李波. 面向新型电力系统的含风光储配电网多目标调度方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 38-45.
HUANG Dingwei, WANG Feng, LI Bo. A multi-objective scheduling method for wind and solar energy storage and distribution network facing novel power system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 38-45.
- [40] ZHOU B, AI X M, FANG J K, et al. Continuous-trajectory robust unit commitment considering beyond-the-resolution uncertainty [C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2020: 1-5.
- [41] 周博, 艾小猛, 方家琨, 等. 计及超分辨率风电出力不确定性的连续时间鲁棒机组组合[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1456-1467.
ZHOU Bo, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Continuous-time modeling based robust unit commitment considering beyond-the-resolution wind power uncertainty [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1456-1467.
- [42] NIKOOLAKHT A, AGHAEI J. Integrated transmission and storage systems investment planning hosting wind power generation: continuous-time hybrid stochastic/robust optimisation [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(21): 4870-4879.
- [43] 田野, 李正烁, 高晗. 计及 $N-1$ 线路故障的连续时间随机安全约束机组组合问题的双层分解算法[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3269-3282.
TIAN Ye, LI Zhengshuo, GAO Han. Two-layer decomposition algorithm for continuous-time stochastic security-constrained unit commitment considering $N-1$ line contingency [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3269-3282.
- [44] LAMICHHANE B, CHEN Y C, KHATAMI R. Distributed continuous-time optimal power flow [C]//2023 North American Power Symposium (NAPS). IEEE, 2023: 1-6.
- [45] WU Y F, LIU D, LIAO W, et al. A continuous-time voltage control method based on hierarchical coordination for high PV-penetrated distribution networks[J]. Applied Energy, 2023, 347: 121274.
- [46] ZHOU B, JIANG R W, SHEN S Q. Differential-algebraic equation-constrained frequency-secured stochastic unit commitment [C]//2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2023: 1-5.
- [47] ZHOU B, JIANG R W, SHEN S Q. Frequency stability-constrained unit commitment: tight approximation using Bernstein polynomials[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(4): 5907-5919.
- [48] RAJABDORRI M, LOBATO E, SIGRIST L, et al. Data-driven continuous-time framework for frequency-constrained unit commitment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 162: 110327.
- [49] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [50] AI X M, ZHOU H, ZHOU J, et al. Multi-week continuous-time scheduling of integrated electricity and natural gas system against long-lasting stressful weather [J]. Applied Energy, 2025, 383: 125305.
- [51] XUE X Z, AI X M, FANG J K, et al. Real-time schedule of microgrid for maximizing battery energy storage utilization [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(3): 1356-1369.
- [52] KHATAMI R, PARVANIA M, KHARGONEKAR P P. Scheduling and pricing of energy generation and storage in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(4): 4308-4322.
- [53] HREINSSON K, SCAGLIONE A, ANALUI B. Continuous time multi-stage stochastic unit commitment with storage [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4476-4489.
- [54] NIKOOLAKHT A, AGHAEI J, SHAFIE-KHAH M, et al. Allocation of fast-acting energy storage systems in transmission grids with high renewable generation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1728-1738.
- [55] LI B S, BAGHERINEZHAD A, KHATAMI R, et al. Continuous-time look-ahead optimization of energy storage in real-time balancing and regulation markets [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(3): 3230-3237.
- [56] 刘峰伟, 陈佳佳, 魏延康, 等. 基于连续时间尺度的储能运行提升光储型园区需量防守能力[J]. 高电压技术, 2024, 50(12): 5621-5629.
LIU Fengwei, CHEN Jiajia, WEI Yankang, et al. Energy storage operation based on continuous time scale to improve the demand defense capacity of photovoltaic and energy storage integrated park [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5621-5629.
- [57] XUE X Z, AI X M, FANG J K, et al. Real-time schedule of integrated heat and power system: a multi-dimensional stochastic approximate dynamic programming approach [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107427.
- [58] NOUROLLAHI R, ZARE K, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Continuous-time optimization of integrated networks of electricity and district heating under wind power uncertainty [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 119926.
- [59] MAJIDI M, DAVOODI E, LI B S, et al. Continuous-time day-ahead operation of multienergy systems[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(4): 5595-5605.
- [60] NIKOOLAKHT A, AGHAEI J, SHAFIE-KHAH M, et al. Co-operation of electricity and natural gas systems including electric vehicles and variable renewable energy sources based on a continuous-time model approach[J]. Energy, 2020, 200: 117484.
- [61] NIKOOLAKHT A, AGHAEI J, SHAFIE-KHAH M, et al. Continuous-time co-operation of integrated electricity and natural gas systems with responsive demands under wind power generation uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3156-3170.
- [62] FANG J K, ZENG Q, AI X M, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 188-198.
- [63] ZHENG C, FANG J K, WANG S R, et al. Energy flow optimization of integrated gas and power systems in continuous time and space[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 1-10.

- 2611-2624.
- [64] ZHOU B, AI X M, FANG J K, et al. Function-space optimization to coordinate multi-energy storage across the integrated electricity and natural gas system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 151: 109181.
- [65] YI Z K, XU Y L, GU W, et al. Aggregate operation model for numerous small-capacity distributed energy resources considering uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 4208-4224.
- [66] KHATAMI R, PARVANIA M, OIKONOMOU K. Continuous-time optimal charging control of plug-in Electric Vehicles [C]//2018 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). IEEE, 2018: 1-5.
- [67] KHATAMI R, HEIDARIFAR M, PARVANIA M, et al. Scheduling and pricing of load flexibility in power systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2018, 12(4): 645-656.
- [68] LE L L, FANG J K, AI X M, et al. Continuous-time optimization of inverter air conditioning demand response for ramping flexibility improvement [C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2020: 1-5.
- [69] LIU W X, FANG J K, AI X M, et al. Coordinated dispatch of hydrogen-penetrated integrated gas-electricity system based on dynamic subsidy: from a multi-stakeholder view [J]. *Applied Energy*, 2025, 382: 125208.
- [70] 项佳宇, 王晓冰, 李冰, 等. 考虑灵活性资源配置的配电网光伏承载力评估方法[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(2): 143-153.
- XU Jiayu, WANG Xiaobing, LI Bing, et al. Distributed PV hosting capacity assessment method for distribution network considering planning of flexible resource [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(2): 143-153.
- [71] LI P, GUAN X H, WU J, et al. Modeling dynamic spatial correlations of geographically distributed wind farms and constructing ellipsoidal uncertainty sets for optimization-based generation scheduling [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(4): 1594-1605.
- [72] ZHANG Y P, AI X M, WEN J Y, et al. Data-adaptive robust optimization method for the economic dispatch of active distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 3791-3800.
- [73] ZHOU B, FANG J K, AI X M, et al. Partial-dimensional correlation-aided convex-hull uncertainty set for robust unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(3): 2434-2446.
- [74] 于馨玮, 陈继明, 仇志华. 分布鲁棒优化在综合能源系统调度与规划中的应用综述[J]. *全球能源互联网*, 2023, 6(2): 207-215.
- YU Xinwei, CHEN Jiming, ZHANG Zhihua. A review of the application of distributionally robust optimization in integrated energy system dispatching and planning [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2023, 6(2): 207-215.
- [75] 严新荣, 胡志勇, 张鹏威, 等. 煤电机组运行灵活性提升技术研究与应用[J]. *发电技术*, 2024, 45(6): 1074-1086.
- YAN Xinrong, HU Zhiyong, ZHANG Pengwei, et al. Research and application of operation flexibility improvement technology for coal-fired power unit[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(6): 1074-1086.
- [76] 吴中孚, 邓丽君, 覃智君. 计及多能灵活性的含光热电站综合能源系统多目标分布鲁棒优化调度[J]. *电力建设*, 2024, 45(12): 39-53.
- WU Zhongfu, DENG Lijun, QIN Zhijun. Multi-objective distributionally robust optimal scheduling of integrated energy system with concentrated solar power plant considering multi-energy flexibility[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(12): 39-53.
- [77] 贺帅佳, 阮贺彬, 高红均, 等. 分布鲁棒优化方法在电力系统中的理论分析与应用综述[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(14): 179-191.
- HE Shuaijia, RUAN Hebin, GAO Hongjun, et al. Overview on theory analysis and application of distributionally robust optimization method in power system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(14): 179-191.
- [78] 杨洪明, 尹邦哲, 孟科, 等. 考虑源荷功率矩不确定性的新型互联电力系统省内-省间分布鲁棒协调优化调度[J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 98-110.
- YANG Hongming, YIN Bangzhe, MENG Ke, et al. Distributed robust optimal scheduling of the new interconnected power system with the inter-province and intra-province considering moment uncertainty of source load power[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 98-110.
- [79] 李慧斌, 刘翔宇, 顾雪平, 等. 考虑区域间灵活性资源互济的日前分散协调调度策略[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(5): 120-129.
- LI Huibin, LIU Xiangyu, GU Xueping, et al. Day-ahead distributed coordination scheduling strategy considering flexible resources mutual aid among regional grid [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(5): 120-129.
- [80] ZHANG Y F, WU S Y, LIN J, et al. Frequency reserve allocation of large-scale RES considering decision-dependent uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(1): 339-354.
- [81] WU Y Y, FANG J K, AI X M, et al. Robust co-planning of AC/DC transmission network and energy storage considering uncertainty of renewable energy[J]. *Applied Energy*, 2023, 339: 120933.
- [82] 刘科研, 盛万兴, 詹惠瑜, 等. 考虑多台区互联的中低压交直流混合配电网双层协同优化调度方法[J]. *电力建设*, 2024, 45(1): 33-44.
- LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAN Huiyu, et al. Bi-level optimization scheduling of mid-low-voltage AC/DC hybrid distribution network considering interconnection between networks [J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(1): 33-44.
- [83] 刘晶冠, 艾小猛, 李海峰, 等. 含嵌入式直流输电线路的电力系统连续时间日前调度方法[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(19): 62-74.
- LIU Jingguan, AI Xiaomeng, LI Haifeng, et al. Continuous-time day-ahead scheduling method of power system with embedded DC transmission lines [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(19): 62-74.
- [84] 任洪波, 王楠, 吴琰, 等. 考虑阶梯型碳交易的多负荷聚合商协同优化调度与成本分配[J]. *电力建设*, 2024, 45(2): 171-182.
- REN Hongbo, WANG Nan, WU Qiong, et al. Collaborative optimal scheduling and cost allocation of multiload aggregator considering ladder-type carbon trading [J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(2): 171-182.
- [85] Monitoring Analytics. PJM State of the Market — 2024[EB/OL]. (2024) [2025-03-31]. https://www.monitoringanalytics.com/reports/PJM_State_of_the_Market/2024.shtml.

- [86] ZHANG H Y, LIAO K, YANG J W, et al. Long-term and short-term coordinated scheduling for wind-PV-hydro-storage hybrid energy system based on deep reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(3): 1697-1710.
- [87] TANG L F, XIE H P, WANG Y G. Frequency provision through two-timescale commercial building HVAC system control using hierarchical reinforcement learning [C]//2024 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2024: 1-5.
- [88] 兰国芹, 陆烨, 阚严生, 等. 综合能源服务发展趋势与对策研究 [J]. 发电技术, 2025, 46(01): 19-30.
LAN Guoqin, LU Ye, KAN Yansheng, et al. Development trends and countermeasures for integrated energy services [J]. Power Generation Technology, 2025, 46(1): 19-30.
- [89] LI K, AI X M, FANG J K, et al. Frequency security constrained robust unit commitment for sufficient deployment of diversified frequency support resources [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 1725-1737.
- [90] ROBERTS C, LARA J D, HENRIQUEZ-AUBA R, et al. Continuous-time echo state networks for predicting power system dynamics [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 212: 108562.
- [91] 赵雪楠, 段凯悦, 李萌, 等. 考虑调度决策非预期性的多阶段随机规划调度策略 [J]. 电力建设, 2022, 43(10): 87-97.
ZHAO Xue nan, DUAN Kaiyue, LI Meng, et al. Scheduling strategy of multi-stage stochastic programming considering non-anticipativity of scheduling decision [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 87-97.
- [92] MA C L, ZHAO H Z. Optimal control of probability on a target set for continuous-time Markov chains [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2024, 69(2): 1202-1209.
- [93] 孙靓雨, 林泽源, 李伟. 考虑氢储能的多目标综合能源优化配置方案研究 [J]. 高压电器, 2024, 60(7): 88-96.
SUN Jingyu, LIN Zeyuan, LI Wei. Research on multi-objective comprehensive energy optimization configuration scheme considering hydrogen storage [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 88-96.
- [94] 袁杨, 张衡, 程浩忠, 等. 发输电系统鲁棒优化规划研究综述与展望 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 10-19, 85.
YUAN Yang, ZHANG Heng, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect of robust optimization and planning research on generation and transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 10-19, 85.
- [95] WEI L S, AI X M, FANG J K, et al. Chronological operation simulation for power system with peak regulation ancillary service market in China: Formulation, solving, and validation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 152: 109156.
- [96] 魏利岫, 艾小猛, 方家琨, 等. 面向新型电力系统的时序生产模拟应用与求解技术综述 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 170-184.
WEI Lishen, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Review on applications and solving techniques of time-series production simulation for new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 170-184.
- [97] 庞松岭, 赵雨楠, 张瑞恩, 等. 市场环境计及用户响应的电动汽车充电站优化运行策略 [J]. 电力建设, 2024, 45(10): 59-68.
PANG Songling, ZHAO Yunan, ZHANG Ruiren, et al. The optimal operation strategy of electric vehicle charging stations considering user response in market environment [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 59-68.
- [98] GUO Y, CHEN C, TONG L. Pricing multi-interval dispatch under uncertainty part I: dispatch-following incentives [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 3865-3877.
- [99] PARVANIA M, KHATAMI R. Continuous-time marginal pricing of electricity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1960-1969.
- [100] 李晨晨, 余娟, 杨知方, 等. 基于多参数规划理论的时间连续节点电价 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 105-113.
LI Chenchen, YU Juan, YANG Zhifang, et al. Time-continuous locational marginal price based on multi-parametric programming theory [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 105-113.
- [101] KHATAMI R, PARVANIA M. Continuous-time locational marginal price of electricity [J]. IEEE Access, 2019, 7: 129480-129493.

收稿日期: 2025-01-16 修回日期: 2025-06-03

作者简介:

刘晶冠(1999),男,博士研究生,主要研究方向为含可再生能源的电力系统灵活运行等;

艾小猛(1986),男,博士,教授,通信作者,主要研究方向为储能优化配置、电力系统灵活性运行等, E-mail: xiaomengai@hust.edu.cn;

周博(1995),男,博士后,主要研究方向为电力系统灵活运行等;

薛熙臻(1997),男,博士后,主要研究方向为综合能源网优化与运行、近似动态规划及人工智能算法等;

王盛世(1997),男,博士,主要研究方向为油气电综合能源传输系统运行与优化、海上油气平台含氢改造与利用等;

崔世常(1994),男,博士,助理研究员,主要研究方向为分布式智能电网优化与需求响应、电力系统规划等;

方家琨(1985),男,博士,教授,主要研究方向为氢能、储能技术的系统应用、综合能源系统优化建模等;

文劲宇(1970),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统储能、直流输电、新能源并网与规划、电力市场与碳市场等。

(编辑 曾文静)