

一种新型电源型虚拟电厂有功可行域聚合方法

丁丽晴, 黄崇鑫

南京邮电大学自动化学院 江苏南京

【摘要】虚拟电厂在分布式电源与电力系统的整合中扮演关键角色。但是由于不同的分布式电源其约束条件存在异构性,因此在准确描述这些资源的有功可行域聚合时面临着计算复杂度高及有功可行域聚合精确度不足的问题。本文提出一种新型电源型虚拟电厂有功可行域聚合方法,针对不同分布式电源的出力特性,建立各类分布式电源的数学单体模型,采取线性规划的方法来确定电源型虚拟电厂的有功可行域聚合边界,在保证有功可行域完整性的同时,极大提高了聚合计算效率。仿真结果表明,所提出的方法在应用于多时段资源聚合下,计算效率远胜于闵可夫斯基和方法;在有功可行域聚合精确度上,聚合平均误差为零,显著优于内近似法。

【关键词】虚拟电厂;有功可行域;分布式电源;聚合

【收稿日期】2025 年 11 月 5 日

【出刊日期】2025 年 12 月 6 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20250229

A novel method for aggregating active power region of generation-type VPPs

Liqing Ding, Chongxin Huang

College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】 Virtual power plants (VPPs) play a crucial role in integrating distributed generation into power systems. However, accurately characterizing the aggregated feasible active power region (FAPR) remains challenging due to the heterogeneous constraints of various DERs, leading to issues such as high computational complexity and insufficient precision in the aggregated region. This paper proposes a novel aggregation method to efficiently determine the FAPR of a generation-type VPP. The proposed method establishes mathematical models for individual DERs based on their output characteristics and employs linear programming to delineate the boundaries of the aggregated FAPR. Simulation results demonstrate that the proposed method substantially reduces computational complexity while completely preserving the accurate FAPR, outperforming the Minkowski sum approach in multi-period aggregation scenarios and achieving zero average aggregation error, thereby surpassing the precision of inner approximation methods in terms of FAPR aggregation accuracy.

【Keywords】 Virtual power plant; Feasible active power region; Distributed generation; Aggregation

引言

近年来,随着能源科技革命的快速发展和电力需求的多样化,分布式电源在电力系统中的渗透率不断提高。然而,海量分布式电源通常具有容量小、数量多、调节特性多样化等特点,这使得它们难以直接参与电力市场或电网调度^[1-2]。虚拟电厂通过聚合海量分布式电源,为这一问题提供了有效的解决方案^[3]。有功可行域是描述电源型虚拟电厂输出能力的关键参数,其范围大小直接影响后续参与电网调节的能力。因此,如何高效且准确的计算有功可行域,成为提高虚拟电厂参与电网调节性能的核心挑战。

准确且完整的描述电源型虚拟电厂的有功可行域,

本质上就是需要求解出电源型虚拟电厂在每一时刻下的有功功率约束边界,和爬坡速率约束边界。在求解电源型虚拟电厂有功可行域的过程中,必须综合考虑求解过程的计算效率、聚合模型的准确性以及模型在电力系统调节的适用性等。针对电源型虚拟电厂的有功可行域计算,目前已有一些相关研究。从数学的角度而言,涉及大量不等式约束的模型聚合问题,通常可视为一个“闵可夫斯基和”运算^[4]。虽然闵可夫斯基和方法理论能够精确的描述聚合模型的有功可行域,但随着不等式的数量和约束条件的增加,计算复杂度会呈现指数级增长^[5]。基于此,不少学者提出采取近似方法来减轻聚合计算所带来的负担。从几何角度来看,电源型虚

拟电厂的有功可行域就是由一系列线性不等式所构成的一个高维多面体模型^[6]。近似的闵可夫斯基方法本质上就是从原始多面体中提取子集。现有的近似方法通常分为外近似法和内近似法两类。外近似法[7]-[9]求出的有功可行域容易包含不可行区域, 而内近似法[5]、[10]-[11]求出的有功可行域存在过于保守的问题。

基于上述问题, 本文提出了一种新型的聚合方法, 用于确定电源型虚拟电厂的有功可行域。该方法将求解有功可行域的聚合问题转化为两个线性规划模型进行求解。仿真结果表明, 将该方法应用于求解多时段场景下电源型虚拟电厂的有功可行域时, 不仅能显著缩短计算时间, 还实现了零聚合误差。

1 电源型虚拟电厂的聚合求解过程及聚合方法可行性的探讨

本文重点探讨电源型虚拟电厂, 不包含储能类相

关的可调节资源。电源型虚拟电厂由可再生能源发电机组如光伏机组、风力发电机组和传统发电机组如柴油发电机组等所构成。由于可再生能源发电机组具有快速的功率响应特性, 其有功可行域可通过每一时刻的输出功率上下限值来进行定义。相比之下, 传统发电机组受制于机械结构或是热力的约束, 其有功可行域不仅包含功率输出限值, 还需要满足相应的爬坡速率约束。

无论是参与电网调度还是电力市场交易, 虚拟电厂都必须提供精确的有功可行域包括功率输出的上下限值和相应的爬坡速率约束。电源型虚拟电厂的有功可行域聚合示意图见图1所示。为更安全和高效的利用虚拟电厂的聚合模型, 聚合后的有功可行域需保证是原始可行域的子集, 同时尽可能的逼近原始可行域。

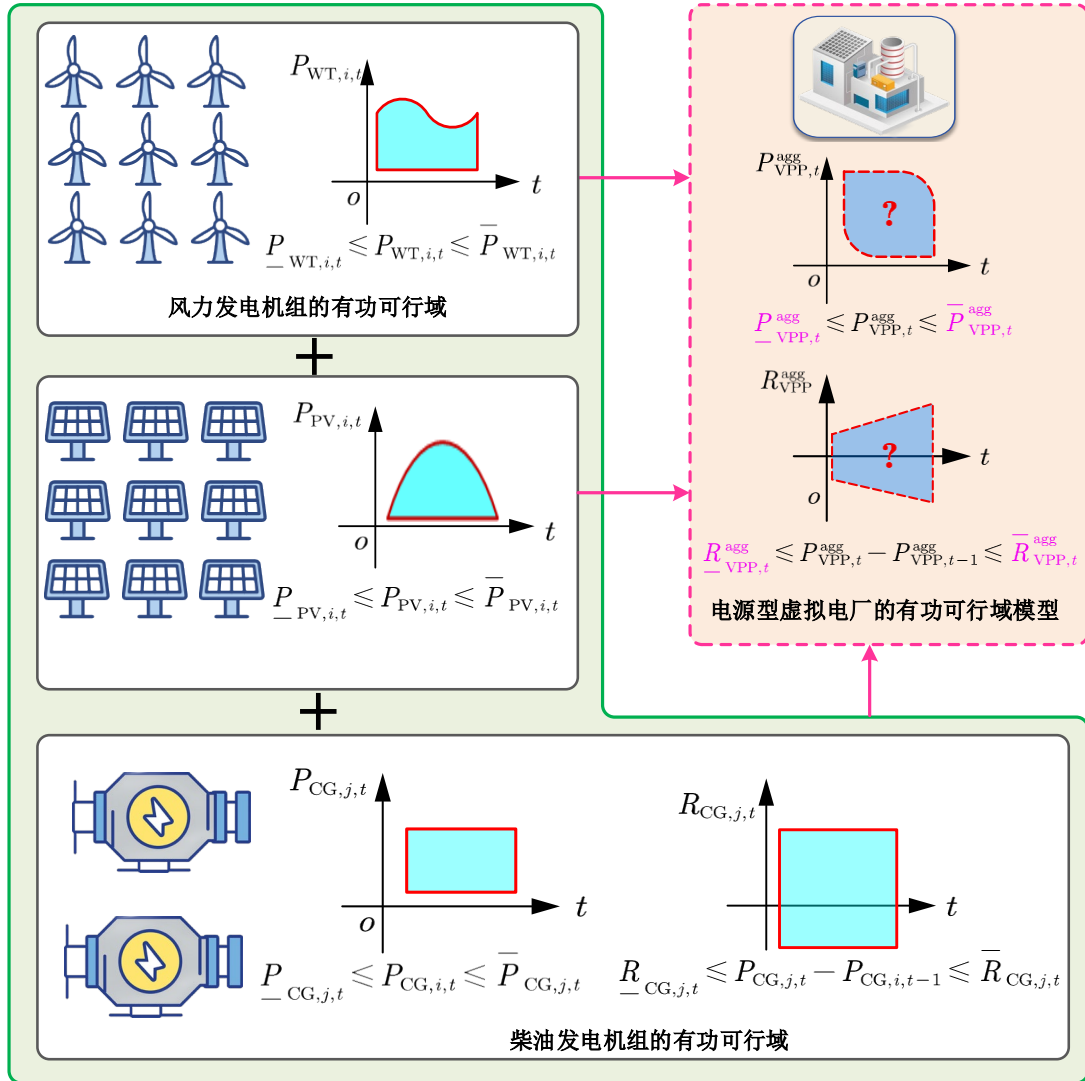


图1 电源型虚拟电厂的有功可行域聚合示意图

1.1 建立可再生能源发电机组和传统发电机组数学单体模型

可再生能源发电机组的有功可行域 $\mathcal{Z}_{reg,i}$, 通常由每一时刻的有功功率输出边界不等式表示, 定义如下:

$$\mathcal{Z}_{reg,i} \doteq \left\{ P_{reg,i,t} \in \mathcal{R} \mid \begin{array}{l} P_{reg,i,t} \leq P_{reg,i,t} \leq \bar{P}_{reg,i,t} \\ t = 1, 2, \dots, T \end{array} \right\} \quad (1)$$

其中, $\underline{P}_{reg,i,t}$ 和 $\bar{P}_{reg,i,t}$ 分别表示第 i 个可再生能源发电机组在 t 时刻的有功功率下限和上限; $P_{reg,i,t}$ 表示第 i 个可再生能源发电机组在 t 时刻的实际有功功率; T 表示时段数。

与可再生能源发电机组不同, 传统发电机组受到的运行约束包括有功功率输出的上下限约束和爬坡速率约束。因此, 传统发电机组的有功可行域 $\mathcal{Z}_{cg,j}$, 定义如下:

$$\mathcal{Z}_{cg,j} \doteq \left\{ P_{cg,j,t} \in \mathcal{R} \mid \begin{array}{l} P_{cg,j,t} \leq P_{cg,j,t} \leq \bar{P}_{cg,j,t} \\ \underline{R}_{cg,j,t} \leq R_{cg,j,t} \leq \bar{R}_{cg,j,t} \\ R_{cg,j,t} = P_{cg,j,t+1} - P_{cg,j,t} \\ t = 1, 2, \dots, T \end{array} \right\} \quad (2)$$

其中 $\underline{P}_{cg,j,t}$ 和 $\bar{P}_{cg,j,t}$ 分别表示第 j 个传统发电机组在 t 时刻的有功功率下限和上限; $P_{cg,j,t}$ 表示第 j 个传统发电机组在 t 时刻的实际有功功率; $\underline{R}_{cg,j,t}$ 和 $\bar{R}_{cg,j,t}$ 分别表示第 j 个传统发电机组在 t 时刻爬坡速率的下限和上限; $R_{cg,j,t}$ 表示第 j 个传统发电机组在 t 时刻的实际的爬坡速率约束。

1.2 同类分布式电源有功可行域的聚合

对于由公式(1)表示的 m 个可再生能源发电机组的有功可行域, 本文可以通过区间或不等式运算进行表示。

即:

$$\mathcal{Z}_{reg}^{\text{agg}} \doteq \left\{ P_{reg,t}^{\text{agg}} \in \mathcal{R} \mid \begin{array}{l} P_{reg,t}^{\text{agg}} \leq P_{reg,t}^{\text{agg}} \leq \bar{P}_{reg,t}^{\text{agg}} \\ t = 1, 2, \dots, T \end{array} \right\} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} P_{reg,t}^{\text{agg}} &= \sum_{i=1}^m P_{reg,i,t} \\ \underline{P}_{reg,t}^{\text{agg}} &= \sum_{i=1}^m \underline{P}_{reg,i,t}, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ \bar{P}_{reg,t}^{\text{agg}} &= \sum_{i=1}^m \bar{P}_{reg,i,t} \end{aligned} \quad (4)$$

同理, 本文可以用公式(2)表示的有功可行域来推导出 n 个传统发电机组的聚合有功可行域, 具体表达如下所示。

即:

$$\mathcal{Z}_{cg}^{\text{agg}} \doteq \left\{ P_{cg,t}^{\text{agg}} \in \mathcal{R} \mid \begin{array}{l} P_{cg,t}^{\text{agg}} \leq P_{cg,t}^{\text{agg}} \leq \bar{P}_{cg,t}^{\text{agg}} \\ \underline{R}_{cg,t}^{\text{agg}} \leq R_{cg,t}^{\text{agg}} \leq \bar{R}_{cg,t}^{\text{agg}} \\ R_{cg,t}^{\text{agg}} = P_{cg,t+1}^{\text{agg}} - P_{cg,t}^{\text{agg}} \\ t = 1, 2, \dots, T \end{array} \right\} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} P_{cg,t}^{\text{agg}} &= \sum_{j=1}^n P_{cg,j,t} \\ \underline{P}_{cg,t}^{\text{agg}} &= \sum_{j=1}^n \underline{P}_{cg,j,t} \\ \bar{P}_{cg,t}^{\text{agg}} &= \sum_{j=1}^n \bar{P}_{cg,j,t}, \quad t = 1, 2, \dots, T \\ \underline{R}_{cg,t}^{\text{agg}} &= \sum_{j=1}^n \underline{R}_{cg,j,t} \\ \bar{R}_{cg,t}^{\text{agg}} &= \sum_{j=1}^n \bar{R}_{cg,j,t} \end{aligned} \quad (6)$$

在公式(4)的基础上建立所有可再生能源发电机组的有功可行域模型(3), 在公式(6)的基础上建立所有传统发电机组的有功可行域聚合模型(5)之后, 采用该方法已无法继续对模型(3)和(5)进一步聚合。这是因为这两个模型的不等式约束存在显著差异, 尤其是模型(5)中的爬坡速率约束, 该约束会导致在多时段场景的有功功率变量间引入时间耦合效应。

1.3 电源型虚拟电厂有功可行域聚合

电源型虚拟电厂的有功可行域聚合模型由上下功率边界和爬坡速率约束共同描述。

即:

$$\mathcal{Z}_{vpp}^{\text{agg}} \doteq \left\{ P_{vpp,t}^{\text{agg}} \in \mathcal{R} \mid \begin{array}{l} P_{vpp,t}^{\text{agg}} \leq P_{vpp,t}^{\text{agg}} \leq \bar{P}_{vpp,t}^{\text{agg}} \\ \underline{R}_{vpp,t}^{\text{agg}} \leq R_{vpp,t}^{\text{agg}} \leq \bar{R}_{vpp,t}^{\text{agg}} \\ R_{vpp,t}^{\text{agg}} = P_{vpp,t+1}^{\text{agg}} - P_{vpp,t}^{\text{agg}} \\ t = 1, 2, \dots, T \end{array} \right\} \quad (7)$$

其中:

$$P_{vpp,t}^{\text{agg}} = P_{reg,t}^{\text{agg}} + P_{cg,t}^{\text{agg}} \quad (8)$$

显然, 虚拟电厂的有功可行域模型由边界变量 $\underline{P}_{vpp,t}^{\text{agg}}$ 、 $\bar{P}_{vpp,t}^{\text{agg}}$ 、 $\underline{R}_{vpp,t}^{\text{agg}}$ 、 $\bar{R}_{vpp,t}^{\text{agg}}$ 来共同描述。因此, 确定虚拟电厂的有功可行域等同于求解这些边界变量。

1.3.1 传统的闵可夫斯基和方法

有功可行域模型(3)和(5)可视为A和B两个子集。从数学角度来说, 可以通过闵可夫斯基和方法得到最终精确的有功可行域。该运算表达式如下所示。

即:

$$A \oplus B \doteq \{a + b \mid a \in A, b \in B\} \quad (9)$$

其中 \oplus 表示闵可夫斯基和运算。闵可夫斯基和方法的详细计算过程可参考文献^[9]。

虽然闵可夫斯基和方法在理论上能精确求解有功可行域聚合问题, 但面临高维不等式尤其是多时段下有功可行域聚合的场景时, 该方法会面临维数灾的问题。这会导致计算时间呈指数增加, 最终无法在规定时间内完成任务。

1.3.2 本文所提的方法

在同类分布式电源有功可行域聚合模型(3)和(5)的基础上, 通过不等式运算, 可推导出电源型虚拟电厂的有功功率聚合上下边界, 具体计算过程如下所示。

即:

$$P_{vpp,t}^{agg} \leq P_{vpp,t}^{agg} \leq \bar{P}_{vpp,t}^{agg}, \quad t=1,2,\dots,T \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} P_{vpp,t}^{agg} &= P_{reg,t}^{agg} + P_{cg,t}^{agg} \\ \underline{P}_{vpp,t}^{agg} &= \underline{P}_{reg,t}^{agg} + \underline{P}_{cg,t}^{agg}, \quad t=1,2,\dots,T \quad (11) \\ \bar{P}_{vpp,t}^{agg} &= \bar{P}_{reg,t}^{agg} + \bar{P}_{cg,t}^{agg} \end{aligned}$$

虚拟电厂的有功功率上下边界是通过公式(4)、(6)和(11)计算得出, 但是虚拟电厂的爬坡速率考虑到不同分布式电源约束条件的差异性和多时段场景下的时间耦合效应, 因此, 其上下边界并不能通过不等式约束来直接获得。基于此, 本文通过引入两个线性规划模型来确定爬坡速率的边界变量, 具体表达式如下所示。

即:

$$\min \sum_{t=1}^T R_{vpp,t}^{agg}$$

s.t.

$$\begin{aligned} R_{vpp,t}^{agg} &= P_{vpp,t+1}^{agg} - P_{vpp,t}^{agg} \\ P_{vpp,t}^{agg} &= P_{reg,t}^{agg} + P_{cg,t}^{agg} \\ \underline{P}_{reg,t}^{agg} &\leq P_{reg,t}^{agg} \leq \bar{P}_{reg,t}^{agg}, \quad t=1,2,\dots,T \quad (12) \\ \underline{P}_{cg,t}^{agg} &\leq P_{cg,t}^{agg} \leq \bar{P}_{cg,t}^{agg} \\ \underline{R}_{cg,t}^{agg} &\leq R_{cg,t}^{agg} \leq \bar{R}_{cg,t}^{agg} \\ R_{cg,t}^{agg} &= P_{cg,t+1}^{agg} - P_{cg,t}^{agg} \end{aligned}$$

$$\max \sum_{t=1}^T \bar{R}_{vpp,t}^{agg}$$

s.t.

$$\begin{aligned} \bar{R}_{vpp,t}^{agg} &= P_{vpp,t+1}^{agg} - P_{vpp,t}^{agg} \\ P_{vpp,t}^{agg} &= P_{reg,t}^{agg} + P_{cg,t}^{agg} \quad (13) \\ \underline{P}_{reg,t}^{agg} &\leq P_{reg,t}^{agg} \leq \bar{P}_{reg,t}^{agg}, \quad t=1,2,\dots,T \\ \underline{P}_{cg,t}^{agg} &\leq P_{cg,t}^{agg} \leq \bar{P}_{cg,t}^{agg} \\ \underline{R}_{cg,t}^{agg} &\leq R_{cg,t}^{agg} \leq \bar{R}_{cg,t}^{agg} \\ R_{cg,t}^{agg} &= P_{cg,t+1}^{agg} - P_{cg,t}^{agg} \end{aligned}$$

公式(12)和(13)中的约束条件确保了虚拟电厂有功可行域聚合的可行性, 从而保证其有功输出能与内部分布式电源实现精准匹配。这两个目标函数(12)和(13)分别对应求解虚拟电厂有功可行域聚合模型的最小爬坡速率和最大爬坡速率。显然, 这两个优化模型本质上属于线性规划问题, 其最优解可通过现有优化算法或成熟求解器高效计算得出。

2 聚合方法在多时段场景下的应用及不同聚合方法的对比

在案例研究中, 本文构建了由若干可再生能源发电机组和若干传统发电机组所构成的电源型虚拟电厂模型。对可再生能源发电机组的数据, 本文根据光伏输出特性曲线, 从[0, 10]区间随机选取了30组光伏发电曲线, 同理, 根据风机的出力特性, 从[0, 15]区间选取20组风力发电曲线。对于传统发电机组, 本文从[8, 10]区间内均匀采样出5组传统发电机组的输出曲线, 并从[20, 25]区间对应采样5组数据作为爬坡速率。所有的数据均以15分钟作为时间间隔进行采样, 功率的单位为兆瓦, 爬坡速率的单位为兆瓦每15分钟。

2.1 双时段下有功可行域的对比分析

为了直观地表示电源型虚拟电厂的有功可行域, 本文对所有分布式电源有功可行域的前两个时段进行聚合, 对比结果见图2所示。可以看出通过本方法聚合获得的有功可行域与闵可夫斯基法和法所得到的结果完全吻合, 这表明本文方法不会引入聚合误差。相比之下, 内近似法所得的结果过于保守, 而外近似法则会引入不可行区域。

2.2 聚合效率与精度对比

由于外近似法会引入不可行区域, 因此在后续实

验中不再与该方法进行对比。见表1处, 比较了三种方法在时段聚合场景下的计算时间, 可以看出闵可夫斯基和方法随着时段数的增加, 计算时间呈指数上升, 说明该方法在时段下的计算复杂度极高, 并不适用于多时段场景聚合。相比较下, 本文方法采取的是线性规划方法, 其约束条件和计算等式并不会因为时段数的增加而呈指数性增长。虽然在计算时间上略高于内近似法, 但整体计算时间较短, 且随着时段数的增加, 计算时间呈现出近似线性增长的趋势, 耗时增量基本稳定在0.38秒到0.42秒的范围内, 具有良好的可扩展性, 适用于多时段场景聚合。

本文方法与内近似法随着聚合时段的增加所呈现出的聚合误差见图3所示。本文以闵可夫斯基求和的聚合结果作为精确值, 采取平均绝对误差的计算方法, 分别求取本文方法与内近似法的功率平均绝对误差和爬坡速率平均绝对误差。可以看出, 本文方法计算下的平均绝对误差始终为零, 而内近似法随着聚合时段数的增加, 会产生较大的平均绝对误差。

2.3 多时段有功可行域聚合

在包含96个时段场景下, 电源型虚拟电厂的聚合有功功率输出边界与爬坡速率边界见图4所示, 计算耗时19.75秒。两种方法得出的有功可行域均符合公式(7)所定义, 但本文方法所求得的可有功可行域显著高于内近似法所求得的可有功可行域范围。

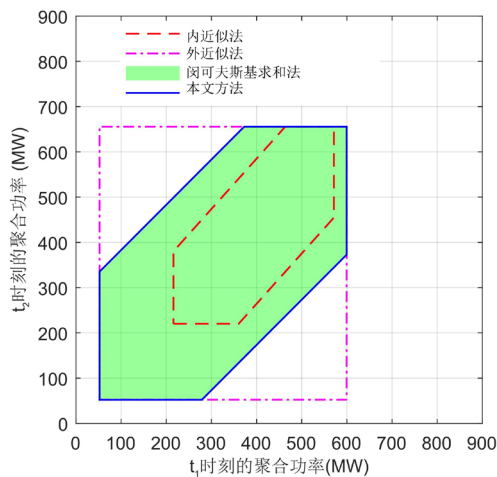


图2 双时段下不同方法有功可行域聚合对比

表1 计算时间的对比(秒)

时段数	2	4	6	8
闵可夫斯基和方法	0.05	8.91	174.08	2666.90
内近似法	0.38	0.43	0.47	0.56
本文方法	0.32	0.71	1.13	1.51

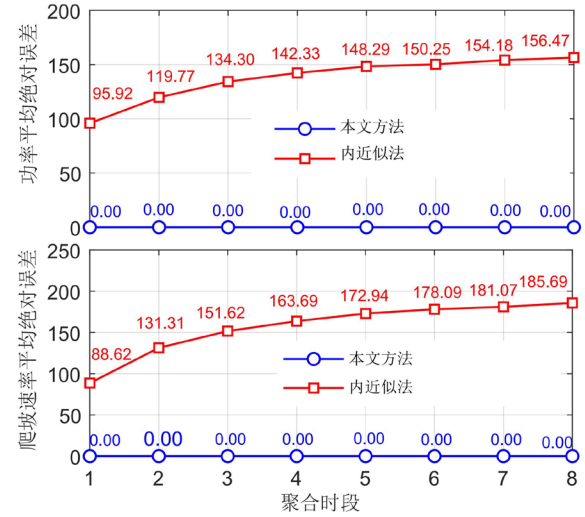


图3 多时段下不同方法聚合平均绝对误差对比

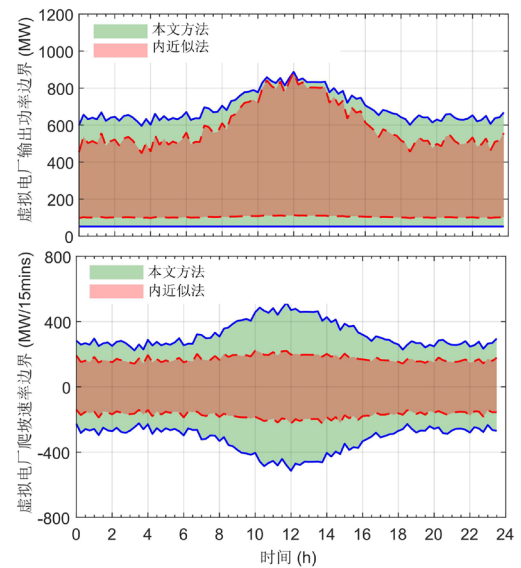


图4 多时段下电源型虚拟电厂的聚合有功可行域

3 结论

本文提出了一种新型电源型虚拟电厂有功可行域聚合方法。相较于现有方法如闵可夫斯基和方法、外近似法和内近似法而言, 本文方法不仅能保留精确的可有功可行域范围, 还能显著降低聚合过程的计算复杂度, 展现出强大的应用潜力。未来的研究考虑把这种方法应用于储能类资源聚合领域。

参考文献

- [1] S. Wang and W. Wu, Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints[J].IEEE Transactions on Smart Grid, 2021,12(6): 5043-5051,2021.
- [2] W. Liu, J. Yang, X. Zhang, et al. SVG configuration scheme

- to enhance renewable energy accommodation considering voltage stability constraints in renewable power grids[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2025.
- [3] 陈会来,张海波,王兆霖.不同类型虚拟电厂市场及调度特性参数聚合算法研究综述[J].中国电机工程学报, 2023, 43(01):15-28.
- [4] W. Xu, Y. Guo, S. Zhou, et al. Spatiotemporal secure feasible region construction for multiple vpps' joint offering[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 247: 111866.
- [5] 王静,刘牧阳,陈俊儒,等.基于凸多面体仿射变换的用户侧灵活性资源多元聚合方法[J/OL].电网技术,1-15 [2025-10-21].
- [6] 王思远,吴文传.灵活性资源聚合参考模型与量化指标体系[J].电力系统自动化,2024,48(03):1-9.
- [7] 童宇轩,胡俊杰,杜昊明,等.基于虚拟电池模型的外逼近闵可夫斯基热泵负荷调节可行域聚合方法[J].电网技术,2024,48(08):3340-3349.
- [8] L. Zhao, W. Zhang, H. Hao, et al. A geometric approach to aggregate flexibility modeling of thermostatically controlled loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(06): 4721-4731.
- [9] Y. Wen, Z. Hu, S. You, et al. Aggregate feasible region of DERs: exact formulation and approximate models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022,13(6): 4405-4423
- [10] 周海浪,刘一畔,陈雨果,等.考虑灵活性收益的需求侧资源可行域聚合方法[J].中国电力,2022,55(09):56-63+155.
- [11] M. Zhang, Y. Xu, X. Shi, et al. A fast polytope-based approach for aggregating large-scale electric vehicles in the joint market under uncertainty[J].IEEE Transactions on Smart Grid, 2024,15(1): 701-713.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS