

基于膝点驱动的低碳工业综合能源系统多目标运行策略

喻磊¹, 王扬², 林心昊¹, 宋子宏², 段舒尹¹, 刘胤良¹, 郑友卓², 谈竹奎², 刘通¹

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 贵州电网有限公司电力科学研究院, 贵阳 550002)

摘要: 综合能源系统的运行策略对实现系统内不同能源的优势互补至关重要, 为此提出了基于膝点驱动的低碳工业综合能源系统多目标优化运行的日前调度策略。首先, 建立了含自动流水线生产系统的“电-气-热”工业综合能源系统的数学模型; 其次, 以最小化工业综合能源系统的能耗成本与碳排放量为目标建立多目标运行优化模型; 最后, 设计膝点驱动的多目标优化求解方法。研究结果表明, 膝点驱动的工业综合能源系统多目标运行优化策略可充分利用分时电价与系统内的可调度负荷实现系统的经济、低碳运行。

关键词: 综合能源系统; 运行策略; 经济低碳; 多目标优化; 膝点驱动

Multi-Objective Operation Strategy for Low Carbon Industrial Integrated Energy System Based on Knee Point-Driven

YU Lei¹, WANG Yang², LIN Xinhao¹, SONG Zihong², DUAN Shuyin¹, LIU Yinliang¹,
ZHENG Youzhuo², TAN Zhukui², LIU Tong¹

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: The operation strategy of an integrated energy system is crucial to achieve complementary advantages among various energy sources. Therefore, a day-ahead multi-objective optimal operation strategy for low carbon industrial integrated energy system based on knee point-driven is proposed. Firstly, the mathematical model of an electric-gas-heat industrial integrated energy system with an automatic assembly line production system is developed. Then, the multi-objective optimal operation model with the goal of minimizing the energy consumption cost and carbon emissions for the industrial integrated energy system is formulated. Finally, a knee point-driven approach is developed to solve the multi-objective optimization problem. Experimental results show that the knee point-driven multi-objective optimal operation strategy can make full use of time-of-use electricity price and the dispatchable loads to reduce energy cost and carbon emission.

Key words: integrated energy system; operation strategy; economic and low-carbon; multi-objective optimization; knee point-driven

0 引言

综合能源系统耦合了传统的电力系统、热力系统、燃气系统、能量转换设备与可再生能源等, 可

实现众多能源优势互补, 提升能源利用率, 对实现“双碳”目标具有重要作用^[1-2]。但多种能源相互耦合的特点给综合能源系统运行优化带来了巨大挑战^[3-4], 其运行策略对提升系统运行经济性、降低碳排放至关重要^[5-6]。

文献[7]提出考虑碳排放权供求关系的碳交易成本联合计算方法用于多区域综合能源系统联合优化运行, 可显著降低经济成本同时避免碳排放超标。文献[8]提出了基于多智能体的电-气综合能源系统运行优化策略, 该策略可实现不同主体间利益的公

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFE0205300); 贵州电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20210484)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFE0205300); the Science and Technology Project of Guizhou Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20210484).

平分配。综合能源系统需求响应通过价格或激励机制调节用户的用能需求,可实现负荷的削峰填谷,同时降低用户的用能成本^[9-11]。文献[12]基于斯塔克尔伯格博弈理论建立了综合能源系统的需求响应模型。为促进风电消纳,文献[13]构建了含电转气的工业园区综合能源系统需求响应模型。文献[14]建立了计及热电联产需求响应的多能源协调运行优化模型并利用遗传算法求解模型,该模型可满足用户用能需求同时提高能源利用率。

低碳综合能源系统的多目标优化运行是综合能源系统能量管理研究的热点之一^[15-16]。文献[17]建立了电-热综合能源系统的多目标需求响应模型并提出了基于进化计算的多目标优化方法以优化系统效率与经济性。文献[18]提出了计及可再生能源不确定性的综合能源系统多目标运行优化模型,通过加权的方式将多目标优化问题转化为单目标优化问题并采用深度强化学习进行优化求解。文献[19]基于分时电价建立了多主体综合能源系统的多目标经济优化模型并改进例子群算法对多目标优化问题进行求解。文献[20]建立了考虑系统经济性与碳排放的电-气综合能源系统多目标规划模型并通过加权的方式研究不同目标权重下系统的最优规划方案。文献[21]提出了热电联产机组、风机、储能等组成的虚拟电厂的两阶段多目标优化调度,并基于进化算法求解帕累托最优解。

综上,综合能源系统的运行策略研究可概括为基于特定的优化目标,计及综合能源系统运行特性,建立运行优化模型,设计、应用优化方法求解优化模型获取最优运行策略。常见的优化目标包括综合能源系统的运行成本、碳排放、能源利用率等。多目标运行优化可同时考虑运行策略对多个目标的影响,但模型的求解较困难^[22-24]。多目标进化算法与加权和法是求解多目标优化问题的常用方法。多目标进化算法通过反复迭代可获得多目标优化问题的帕累托前沿,但该方法计算量大且仍需人工确定综合能源系统工作点(运行策略)^[25]。加权和法简单易操作,但目标权重的取值依赖于先验知识。如何平衡多目标是实现综合能源系统多目标运行的关键,相关研究值得深入探索。

我国工业生产耗电量巨大,计及工业负荷的低碳综合能源系统需求响应可充分挖掘工业负荷与供给侧的调度潜力。文献[26]研究了高比例新能源条

件下水泥、电解铝、钢铁与轻工业电力负荷参与需求响应的调控模型。文献[27]建立了自动流水生产线的需求响应模型。但工业生产过程复杂且需满足生产任务或经济效益,给工业负荷参与需求响应带来一定的挑战,相关研究较少,值得进一步探索。

基于以上分析,本文研究低碳工业综合能源系统的多目标优化运行日前调度策略。主要创新点包括:1)面向工业综合能源系统,以最小化系统能耗成本与碳排放为目标,建立了工业综合能源系统多目标日前运行策略优化模型,以充分利用综合能源系统内的可再生能源与可调度负荷。该工业综合能源多目标运行优化模型充分考虑了工业生产过程的复杂性及其生产任务(经济性)约束。2)设计了膝点驱动的工业综合能源系统多目标运行最优策略求解方法。与基于进化计算的多目标求解方法相比,该方法计算量低且可自动确定综合能源系统工作点;与加权和法相比,该方法无需先验知识确定目标权重,膝点为帕累托前沿的“凹点”,能够有效实现多目标的平衡。

1 综合能源系统结构及其运行目标

本文所研究的工业综合能源系统结构如图1所示的,该综合能源系统由可调度工业负荷、储能蓄电池、光伏组件、电热泵、燃气锅炉、储热罐组成,以满足系统内电负荷与热负荷需求。

1.1 可调度工业负荷

我国工业能源消费占全国能源消费总量 60 %

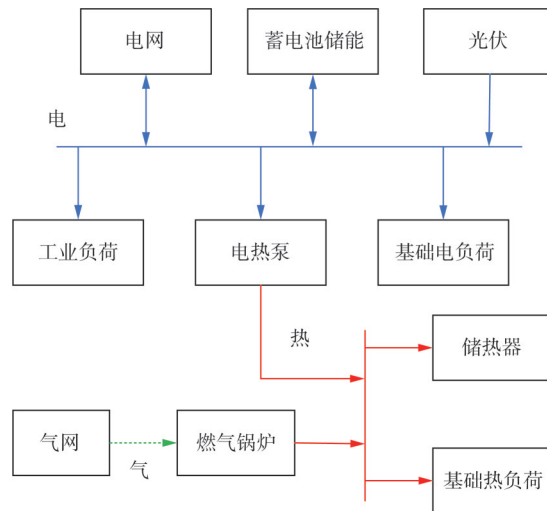


图 1 工业综合能源系统

Fig. 1 Industrial integrated energy system

以上,碳排放量可达全国总排放量31%。与电解铝、水泥行业等工业负荷参与电力需求响应不同^[26],如图2所示的工业自动流水生产系统^[27]包含多条流水线,生产工序繁多,生产调度需要考虑流水线上下游以及流水线间的约束,具有流水生产制造业的典型特性。我国制造业发达,为此,本文以工业流水生产系统作为研究对象建立的工业综合能源系统多目标运行策略优化模型可广泛应用于流水生产制造业。

图2所示生产系统包含 s 条部件加工线与1条组装线以完成部件的加工与产品的组装。

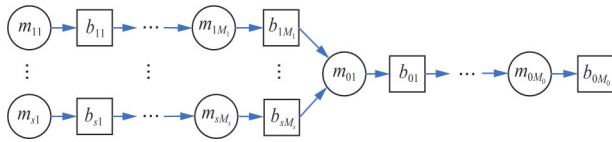


图2 工业自动流水生产系统

Fig. 2 Industrial automatic manufacturing system

每条生产线包括了机器 m_{ij} 与物料箱 b_{ij} ,其中 $i=0$ 表示组装线, $i=1, \dots, s$ 表示部件加工生产线, s 为生产线的总数量; $j=1, \dots, M_i$ 表示各生产线的工序号, M_i 为第 i 条生产线的总工序数量。在满足生产任务的条件下可调度机器的工作时间,以充分利用分时电价、光伏发电,从而降低系统的能耗成本与碳排放量。生产过程中应避免机器出现“饥饿”或“堵塞”状态即机器能从前序物料箱获得生产原料,同时生产的部件不能造成后序物料箱的堵塞。图2所示的工业生产系统运行功耗如式(1)所示。

$$P_{M,t} = \sum_{i=0}^s \sum_{j=1}^{M_i} (D_{M,t}^{ij} \cdot P_{ij,on} + (1 - D_{M,t}^{ij}) \cdot P_{ij,standby}) \quad (1)$$

式中: $P_{M,t}$ 为 t 时刻自动流水生产系统的总功耗; $D_{M,t}^{ij} \in \{0, 1\}$ 为机器 m_{ij} 在 t 时刻的工作状态, $D_{M,t}^{ij} = 1$ 表示机器处于运行状态, $D_{M,t}^{ij} = 0$ 表示机器处于待机状态; $P_{ij,on}$ 与 $P_{ij,standby}$ 分别为机器 m_{ij} 处于运行状态与待机状态的功耗。

物料箱存有部件的数量由式(2)—(4)确定:

1) 当 $i=0, \dots, s$ 且 $j=1, \dots, M_i - 1$ 时有:

$$B_{ij,t} = B_{ij,t-1} + n_{ij} \cdot D_{M,t}^{ij} - \alpha_{ij} \cdot n_{i(j+1)} \cdot D_{M,t}^{i(j+1)} \quad (2)$$

2) 当 $i=1, \dots, s$ 且 $j=M_i$ 时有:

$$B_{ij,t} = B_{ij,t-1} + n_{ij} \cdot D_{M,t}^{ij} - \alpha_{ij} \cdot n_{01} \cdot D_{M,t}^{01} \quad (3)$$

3) 当 $i=0$ 且 $j=M_i$ 时有:

$$B_{ij,t} = B_{ij,t-1} + n_{ij} \cdot D_{M,t}^{ij} \quad (4)$$

式中: $B_{ij,t}$ 为物料箱 b_{ij} 在 t 时刻部件存储量; n_{ij} 为机器 m_{ij} 的生产率; α_{ij} 为机器 $m_{i(j+1)}$ 生产单位部件消耗的原料数量。

自动流水生产系统运行约束条件如式(5)—(9)所示。

$$0 \leq B_{ij,t} \leq C_{ij}, i = 0, \dots, s; j = 1, \dots, M_i \quad (5)$$

$$D_{M,t}^{ij} \leq C_{ij} - B_{ij,t-1}, i = 0, \dots, s; j = 1, \dots, M_i \quad (6)$$

$$D_{M,t}^{i(j+1)} \leq B_{ij,t-1}, i = 0, \dots, s; j = 1, \dots, M_i - 1 \quad (7)$$

$$D_{M,t}^{01} \leq B_{ij,t-1}, i = 1, \dots, s; j = M_i \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^T n_{0M_0,t} \cdot D_{M,t}^{0M_0} \geq C_{M,\min} \quad (9)$$

式中:式(5)—(6)为生产系统“饥饿”约束条件;式(7)—(8)为“堵塞”约束条件;式(9)为生产任务约束条件; C_{ij} 为物料箱 b_{ij} 的容量; $C_{M,\min}$ 为可调度时段 T 内的生产任务。

1.2 电力系统

电力系统平衡约束条件如式(10)所示。

$$P_{\text{grid},t}^{\text{buy}} + P_{\text{PV},t} + P_{\text{B},t}^{\text{dis}} = P_{\text{grid},t}^{\text{sell}} + P_{\text{b},t} + P_{\text{B},t}^{\text{ch}} + P_{\text{EHP},t} + P_{\text{M},t} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{grid},t}^{\text{buy}}$ 、 $P_{\text{grid},t}^{\text{sell}}$ 分别为 t 时刻从电网购电功率与向电网售电功率且 $P_{\text{grid},t}^{\text{buy}} \cdot P_{\text{grid},t}^{\text{sell}} = 0$; $P_{\text{B},t}^{\text{dis}}$ 、 $P_{\text{B},t}^{\text{ch}}$ 分别为 t 时刻蓄电池放电功率与充电功率且 $P_{\text{B},t}^{\text{dis}} \cdot P_{\text{B},t}^{\text{ch}} = 0$; $\eta_{\text{B}}^{\text{dis}}$ 与 $\eta_{\text{B}}^{\text{ch}}$ 分别为蓄电池放电与充电效率; $P_{\text{PV},t}$ 、 $P_{\text{b},t}$ 与 $P_{\text{EHP},t}$ 分别为 t 时刻光伏发电功率、基础电负荷与电热泵功率。蓄电池运行满足式(11)—(12)所示的约束条件。

$$E_{\text{B},t+1} = E_{\text{B},t} + (P_{\text{B},t}^{\text{ch}} \cdot \eta_{\text{B}}^{\text{ch}} - P_{\text{B},t}^{\text{dis}} / \eta_{\text{B}}^{\text{dis}}) \cdot \Delta t \quad (11)$$

$$E_{\text{B},\min} \leq E_{\text{B},t} \leq E_{\text{B},\max} \quad (12)$$

式中: $E_{\text{B},t}$ 为 t 时刻蓄电池储电量,其大小应满足蓄电池最大电量 $E_{\text{B},\max}$ 和最小电量 $E_{\text{B},\min}$ 的限值要求; Δt 为 $t+1$ 时刻与 t 时刻间的时间长度。

1.3 热力系统

热力系统平衡约束条件如式(13)所示。

$$H_{\text{GB},t} + H_{\text{TS},t}^{\text{dis}} + P_{\text{EHP},t} \cdot C_{\text{OP}} = H_{\text{b},t} + H_{\text{TS},t}^{\text{ch}} \quad (13)$$

式中: $H_{\text{GB},t}$ 为 t 时刻燃气锅炉热功率; C_{OP} 为电热泵的效率系数; $H_{\text{b},t}$ 为 t 时刻基础热负荷; $H_{\text{TS},t}^{\text{dis}}$ 、 $H_{\text{TS},t}^{\text{ch}}$ 分别为 t 时刻储热器的放热功率与储热功率且 $H_{\text{TS},t}^{\text{dis}} \cdot H_{\text{TS},t}^{\text{ch}} = 0$; $\eta_{\text{TS}}^{\text{dis}}$ 与 $\eta_{\text{TS}}^{\text{ch}}$ 分别为放热与储热效率。燃气锅炉热特性方程如式(14)所示。

$$H_{\text{GB},t} = F_{\text{GB},t} \cdot \eta_{\text{GB}} \cdot \beta_{\text{gas}} \quad (14)$$

式中 $F_{\text{GB},t}$ 、 η_{GB} 与 β_{gas} 分别为单位时间燃气消耗量、

燃气锅炉效率与燃气单位体积热系数。储热器的运行满足式(15)——(16)所示约束条件。

$$E_{TS,t+1} = E_{TS,t} + \left(H_{TS,t}^{\text{ch}} \cdot \eta_{TS}^{\text{ch}} - H_{TS,t}^{\text{dis}} / \eta_{TS}^{\text{dis}} \right) \cdot \Delta t \quad (15)$$

$$E_{TS,\min} \leq E_{TS,t} \leq E_{TS,\max} \quad (16)$$

式中: $E_{TS,t}$ 为 t 时刻储热器的储热量; $E_{TS,\min}$ 和 $E_{TS,\max}$ 分别为储热器储热量的最小和最大限值。

1.4 工业综合能源系统运行目标

本文以最小化工业综合能源系统的能耗成本与碳排放量为目标优化综合能源系统运行策略。能耗成本与碳排放量计算方法如式(17)——(18)所示。

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \left(u_{\text{grid},t}^{\text{buy}} \cdot P_{\text{grid},t}^{\text{buy}} - u_{\text{grid},t}^{\text{sell}} \cdot P_{\text{grid},t}^{\text{sell}} + u_{\text{gas}} \cdot F_{\text{GB},t} \right) \cdot \Delta t \quad (17)$$

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \left(\mu_{\text{grid}}^{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{grid},t}^{\text{buy}} + \mu_{\text{gas}}^{\text{CO}_2} \cdot F_{\text{GB},t} \right) \cdot \Delta t \quad (18)$$

式中: f_1 与 f_2 分别为调度周期总时刻 T 内系统的能耗成本与碳排放量; $u_{\text{grid},t}^{\text{buy}}$ 与 $u_{\text{grid},t}^{\text{sell}}$ 分别为 t 时刻从电网购电电价与向电网售电电价; $u_{\text{gas},t}$ 为 t 时刻燃气价格; $\mu_{\text{grid}}^{\text{CO}_2}$ 与 $\mu_{\text{gas}}^{\text{CO}_2}$ 分别为电网与燃气碳排放系数。

2 多目标运行策略优化方法

结合第 1 节分析, 工业综合能源系统运行策略优化问题如式(19)所示。

$$\begin{aligned} \min & (f_1(x), f_2(x)) \\ \text{s.t.} & \text{式(1)——(18)} \end{aligned} \quad (19)$$

式中 $x = [D_{M,t}^{i,j}, P_{\text{grid},t}^{\text{buy}}, P_{\text{grid},t}^{\text{sell}}, P_{B,t}^{\text{dis}}, P_{B,t}^{\text{ch}}, P_{\text{EHP},t}, H_{\text{GB},t}, H_{\text{TS},t}^{\text{dis}}, H_{\text{TS},t}^{\text{ch}}]$ 为工业综合能源系统运行决策优化变量。由式(17)——(18)可知 f_1 、 f_2 为 x 的线性函数, 表示为 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 。为解决上述多目标混合整型线性规划问题, 本文提出膝点驱动的多目标优化方法, 以获得最优运行策略。

设 x 为多目标优化问题帕累托最优解集, $f(x)$ 为帕累托最优前沿, 即 $f(x) = \min(f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x))$ 。膝点(knee point)指帕累托最优前沿上最“凹”的点。膝点区域内, 对任一优化目标的微小改进都会导致其他优化目标的大幅恶化。为此, 膝点常用于无偏好的多目标优化决策。本文基于最小曼哈顿距离(minimum Manhattan distance, MMD)^[28]确定膝点。

对 N -维帕累托最优前沿, 令 $f_i^{\text{best}}(x)$ 与 $f_i^{\text{worst}}(x)$ 分别表示帕累托最优前沿上第 i 维的最优值(最小

值)与最差值(最大值), 其中 $i=1, \dots, N$ 。 $\hat{f}_i(x)$ 为对目标值 $f_i(x)$ 进行归一化运算得到的结果。

$$\hat{f}_i(x) = \frac{f_i(x) - f_i^{\text{best}}(x)}{f_i^{\text{worst}}(x) - f_i^{\text{best}}(x)} \quad (20)$$

对每一个 x 计算 $\sum_{i=1}^N \hat{f}_i(x)$, 对应的最优解 x^* 为:

$$x^* = \arg \min_x \sum_{i=1}^N \hat{f}_i(x) \quad (21)$$

膝点驱动的工业综合能源系统多目标运行优化策略求解过程如下。

1) 以最小化 f_1 为目标求解系统最经济的运行策略, 计算目标值 $f_1(x)$ 与 $f_2(x)$ 即为 $f_1^{\text{best}}(x)$ 与 $f_2^{\text{worst}}(x)$ 。

2) 以最小化 f_2 为目标求解系统最低碳的运行策略, 计算目标值 $f_1(x)$ 与 $f_2(x)$ 即为 $f_1^{\text{best}}(x)$ 与 $f_2^{\text{worst}}(x)$ 。

3) 基于步骤 1) 与 2) 的结果, 以式(21)为目标求解膝点对应的多目标运行策略。

本文目标函数 $f_i(x)$ 为 x 的线性函数, 可使用商用混合整型线性规划优化器 Gurobi^[29] 快速求解上述优化问题。

3 算例分析

本文研究工业综合能源系统日前逐时运行调度优化策略即 $T=24$ h 且 $\Delta t=1$ h。

3.1 工业综合能源系统参数

本文考虑由 2 条生产线与 1 条组装线组成的工业自动流水生产系统且 $M_1=3$, $M_2=2$, $M_0=2$, 机器生产率 n_{ij} 、机器功耗 $P_{ij,\text{on}}$ 以及储料箱容量 C_{ij} 如表 1 所示, $\alpha_{ij}=1$, 工业自动流水生产系统日产量 $C_{M,\min}$ 不低于 3 600。

电力系统与热力系统参数^[30]如表 2 所示, 电网分时电价 $u_{\text{grid},t}^{\text{buy}}$ 采用我国南方某市分时电价如表 3 所示, 余电上网电价采用燃煤标杆电价 $u_{\text{grid},t}^{\text{sell}}=0.453$ 元/kWh, 非居民燃气价格 $u_{\text{gas}}=4.25$ 元/m³。

为验证提出的膝点驱动的工业综合能源系统多目标最优运行策略的有效性与高效性, 本文基于图 3 所示的光伏出力、基础电负荷与基础热负荷完成相关计算分析。图 3 所示两日的光伏出力存在较大差异, 分别代表阴天与晴天, 以充分说明不同天气条件下工业综合能源系统多目标运行的可调度潜力。

表 1 工业自动流水生产线系统参数: 机器生产率 n_{ij} 、机器功耗 $P_{ij,on}$ 与储料箱容量 C_{ij}

Tab. 1 Industrial automatic manufacturing line system parameters including machine production rate n_{ij} , machine power $P_{ij,on}$ and buffer storage capacity C_{ij}

生产线 工序号	系统参数	生产线类型		
		$i=1$	$i=2$	$i=0$
$j=1$	$n_{ij}/(\text{件}\cdot\text{h}^{-1})$	300	400	300
	$P_{ij,on}/\text{kW}$	18	15	56
	$C_{ij}/\text{个}$	600	1 200	900
$j=2$	$n_{ij}/(\text{件}\cdot\text{h}^{-1})$	300	300	200
	$P_{ij,on}/\text{kW}$	18	30	34
	$C_{ij}/\text{个}$	600	1 200	4 000
$j=3$	$n_{ij}/(\text{件}\cdot\text{h}^{-1})$	200		
	$P_{ij,on}/\text{kW}$	35		
	$C_{ij}/\text{个}$	1 000		

表 2 电力系统与热力系统参数
Tab. 2 Parameters of electrical and thermal energy systems

系统部件	参数	数值
电网	$P_{\text{grid,max}}^{\text{buy}}, P_{\text{grid,max}}^{\text{sell}}/\text{kW}$	380
	$\mu_{\text{grid}}^{\text{CO}_2}/(\text{kg}\cdot\text{kWh}^{-1})$	0.968
蓄电池	容量 C_B/kWh	120
	$[E_{B,\text{min}}, E_{B,\text{max}}]$	$[0.1, 0.9] \times C_B$
	$P_{B,\text{max}}^{\text{dis}}, P_{B,\text{max}}^{\text{ch}}/\text{kW}$	40
	$\eta_B^{\text{dis}}, \eta_B^{\text{ch}}$	0.98
电热泵	$P_{\text{EHP,max}}/\text{kW}$	40
	C_{OP}	2.5
燃气锅炉	$H_{\text{GB,max}}/\text{kW}$	60
	η_{GB}	0.8
	$\beta_{\text{gas}}/(\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3})$	10.8
	$\mu_{\text{gas}}^{\text{CO}_2}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2.376
储热器	容量 C_{TS}/kWh	90
	$[E_{\text{TS,min}}, E_{\text{TS,max}}]$	$[0.1, 0.9] \times C_{\text{TS}}$
	$H_{\text{TS,max}}^{\text{dis}}, H_{\text{TS,max}}^{\text{ch}}/\text{kW}$	30
	$\eta_{\text{TS}}^{\text{dis}}, \eta_{\text{TS}}^{\text{ch}}$	0.95

表 3 分时电价
Tab. 3 Time-of-use electricity prices 元/kWh

时间	价格
00:00—07:00	0.319
08:00—10:00	0.794
10:00—12:00	1.331
12:00—14:00	0.794
14:00—19:00	1.331
19:00—00:00	0.794

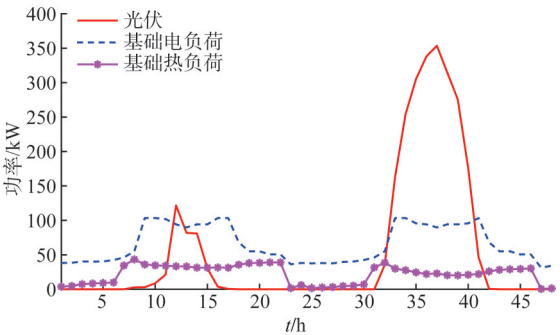


图 3 光伏功率、基础电负荷与热负荷
Fig. 3 Profiles of PV power generations, base electric loads, and base thermal loads

3.2 膝点驱动的多目标运行策略结果分析

基于以上参数设置,应用本文设计的膝点驱动的多目标运行策略优化方法,不同天气条件下各运行策略的能耗成本与碳排放量如表 4(阴天)与表 5(晴天)所示。由表 4 可知,阴天条件下,光伏出力较低,各运行策略的碳排放量差异较小;与最低碳的运行策略相比,膝点驱动的多目标运行策略可降低 10.7 % 的能耗成本;膝点驱动的多目标运行策略的累加归一化成本为单一目标运行策略的 33.2 %。

表 4 阴天条件下不同运行策略的能耗成本与碳排放量

Tab. 4 Energy costs and carbon emissions for different operation strategies on cloudy days

策略目标值	$\min f_1(x)$ (经济)	$\min f_2(x)$ (低碳)	$\min (f_1(x), f_2(x))$ (多目标)
$f_1(x)/\text{元}$	3 189.2	3 708.1	3 309.9
$f_2(x)/\text{kg}$	4 278.2	4 209.9	4 216.7
$\hat{f}_1(x)$	0	1	0.232 6
$\hat{f}_2(x)$	1	0	0.099 6
$\hat{f}_1(x) + \hat{f}_2(x)$	1	1	0.332 2

由表 5 可知,晴天条件下,与最低碳的运行策略相比,膝点驱动的多目标运行策略可降低 18.0 % 的能耗成本,同时带来 1.8 % 碳排放量的提升;与最经济的运行策略相比,膝点驱动的多目标运行策略可降低 8.0 % 的碳排放量,同时带来 6.5 % 的能耗成本的提升;膝点驱动的多目标运行策略的累加归一化成本为单一目标运行策略的 38.8 %。综合以上可知,膝点驱动的多目标运行策略可取得较优的综合性能。

不同策略下工业综合能源系统的各部件的运行

表 5 晴天条件下不同运行策略的能耗成本与碳排放量

Tab. 5 Energy costs and carbon emissions for different operation strategies on sunny days

策略目标值	$\min f_1(x)$ (经济)	$\min f_2(x)$ (低碳)	$\min (f_1(x), f_2(x))$ (多目标)
$f_1(x)/\text{元}$	1 362.7	1 770.5	1 451.2
$f_2(x)/\text{kg}$	2 546.5	2 299.8	2 341.9
$\hat{f}_1(x)$	0	1	0.217 0
$\hat{f}_2(x)$	1	0	0.170 7
$\hat{f}_1(x) + \hat{f}_2(x)$	1	1	0.387 7

状态如图 4 所示, 其中图 4(a)为综合能源系统与电网的交易功率(正值表示从电网购电, 负值表示向电网售电)。对比不同的策略可知, 在最经济的运行策略下, 综合能源系统在光伏功率大且电价高时向电网售电以提高系统的经济效益。图 4(b)为电热泵的电功率, 图 4(c)为蓄电池的功率(正值表示放电, 负值表示充电), 图 4(d)为燃气锅炉的产热功率; 图 4(e)为储热器的热功率(正值表示放热, 负值表示储热)。由图 4 可知, 综合能源系统内可调度部件协同工作以充分利用光伏发电、分时电价从而实现降低能耗成本与碳排放的目标。

表 6 展示了晴天条件下自动流水生产系统不同策略下的运行方式。表 6 中的元素 m_{ij} 在不同时刻下的取值表示在该时刻机器 m_{ij} 在最经济的运行策略、最低碳排放量的运行策略与多目标运行策略下对应的运行状态, 如时刻 $t=2$ 机器 $m_{22}=101$ 表示 t 时刻该机器在最经济的运行策略下状态为 1, 在最低碳排放量的策略下状态为 0, 多目标运行策略下状态为 1。由表 6 可知, 针对不同的优化目标可调节自动流水生产系统的工作模式以达到降低能耗成本、碳排放量的目标。

3.3 多目标优化方法对比

为进一步说明本文提出的膝点驱动的多目标运行策略的有效性与高效性, 图 5 展示了基于加权和法的多目标运行策略帕累托前沿。加权和法的优化目标为 $\min \omega f_1(x) + (1 - \omega) f_2(x)$, 权重 ω 从 0 变化至 1, 步长为 0.01。基于进化计算的多目标优化方法计算量大、计算时间长且面向较大规模的优化问题其性能可严重退化。本文建立的优化模型为带约束的混合整型规划, 利用功率平衡约束条件消元后的优化变量高达 240 个、约束条件为 841 个。基于 MATLAB 语言在 Windows 11(Core i5-1235U)环境

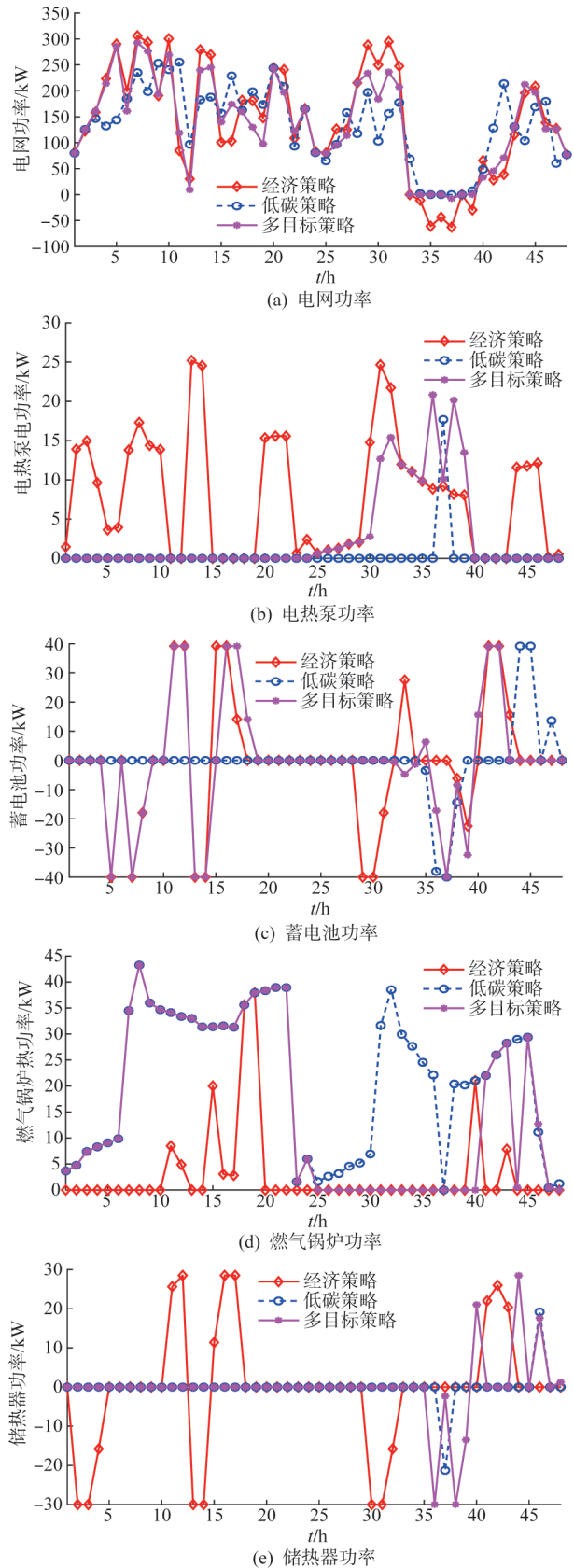


图 4 综合能源系统运行状态

Fig. 4 Integrated energy system operation strategy status

表6 不同策略下流水生产系统运行方式

Tab. 6 Operation mode of automatic manufacturing system for different strategies

时刻 t	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{21}	m_{22}	m_{01}	m_{02}
1	111	000	000	101	000	000	000
2	110	111	000	110	101	000	000
3	011	010	111	111	110	000	000
4	111	111	111	101	101	101	000
5	101	111	111	110	111	111	101
6	111	101	111	100	101	000	101
7	111	111	111	101	100	101	111
8	100	100	111	101	111	111	111
9	000	000	111	000	000	010	110
10	011	011	111	010	011	100	111
11	111	111	111	011	111	011	111
12	111	111	111	011	111	111	111
13	111	111	111	011	111	111	111
14	111	111	111	110	111	111	111
15	111	000	111	011	111	010	111
16	000	100	111	000	000	111	111
17	000	001	000	000	010	000	010
18	000	010	010	000	000	010	011
19	000	000	111	000	000	000	111
20	000	010	101	000	011	101	111
21	000	101	111	000	010	111	111
22	000	000	111	000	000	010	111
23	000	000	000	000	000	101	111
24	000	000	000	000	000	000	111

下本文提出的优化方法平均运行时间为0.4 s。基于进化计算的多目标优化方法难以在同等时间内获得较优的可行解。

通过对比可知,本文提出的膝点驱动的多目标运行策略位于帕累托前沿的“凹点”。与加权和法相比,本文提出的膝点驱动的多目标运行策略优化方法可保证工业综合能源系统运行于帕累托前沿的“凹点”,有效平衡各目标,取得较好的综合效应;与基于进化计算的多目标优化方法相比,本文提出的膝点驱动的多目标运行策略优化方法计算量小,且可获得最优解。

4 结语

本文建立了工业综合能源系统多目标优化运行日前调度策略模型并设计了膝点驱动的多目标优化求解方法。研究表明膝点驱动的工业综合能源

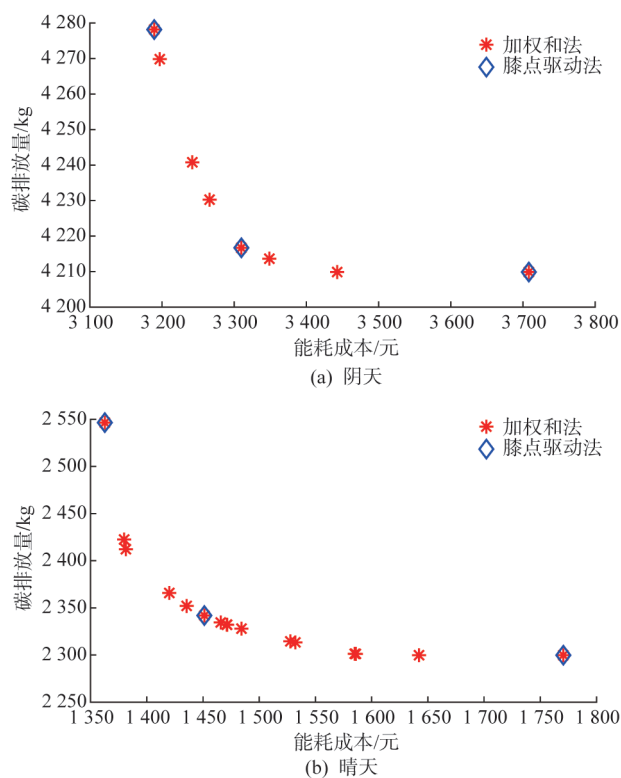


图5 帕累托前沿比较

Fig. 5 Comparison of Pareto frontiers

系统多目标运行日前调度策略可充分利用光伏发电、系统内的可调度资源以及分时电价,从而取得较优的综合效应即降低系统能耗成本的同时降低系统的碳排放量。

参考文献

- [1] 高瑞阳,王新宝,高娴,等.考虑灵活性资源和多能共享的低碳区域综合能源系统联盟-配电网博弈优化调度[J].南方电网技术,2024,18(2):77-88.
GAO Ruiyang, WANG Xinbao, GAO Xian, et al. Optimal dispatching of low-carbon regional integrated energy system alliance and distribution network game considering flexible resources and multi energy sharing[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 77-88.
- [2] 时珊珊,张智泉,方陈,等.基于合作博弈和高斯混合聚类多主体综合能源微网联盟能量管理策略[J].南方电网技术,2025,19(4):63-77.
SHI Shanshan, ZHANG Zhiquan, FANG Chen, et al. Coalition energy management strategy for multi-agent integrated energy microgrid cluster based on cooperative game and Gaussian mixture clustering[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(4): 63-77.
- [3] 孙铁恺,漆淘懿,张利军,等.市场环境下含冰蓄冷空调的综合能源系统优化运行[J].南方电网技术,2022,16(4):95-104.
SUN Yikai, QI Taoyi, ZHANG Lijun, et al. Optimal operation of integrated energy system including ice-storage air-

- conditioning in power market [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 95 – 104.
- [4] GHILARDI L M P, CASTELLI A F, MORETTI L, et al. Co-optimization of multi-energy system operation, district heating/cooling network and thermal comfort management for buildings [J]. Applied Energy, 2021(302): 117480.1 – 117480.11.
- [5] 李鹏, 王加浩, 黎灿兵, 等. 计及源荷不确定性与设备变工况特性的园区综合能源系统协同优化运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 7802 – 7812.
- LI Peng, WANG Jiahao, LI Canbing, et al. Collaborative optimal scheduling of the community integrated energy system considering source-load uncertainty and equipment off-design performance [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (20) : 7802 – 7812.
- [6] ZHANG G, WANG W, CHEN Z, et al. Modeling and optimal dispatch of a carbon-cycle integrated energy system for low-carbon and economic operation [J]. Energy, 2022 (240) : 122795.1 – 122795.10.
- [7] 刘英培, 黄寅峰. 考虑碳排放权供求关系的多区域综合能源系统联合优化运行[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3459 – 3472.
- LIU Yingpei, HUANG Yinfeng. Joint optimal operation of multi-regional integrated energy system considering the supply and demand of carbon emission rights [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3459 – 3472.
- [8] YANG N, QIN T, WU L, et al. A multi-agent game based joint planning approach for electricity-gas integrated energy systems considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Systems Research, 2022(204): 107673.1 – 107673.9.
- [9] 韩钰, 徐婷婷, 吴迪凡. 考虑综合需求响应和电转气的园区综合能源系统优化调度方法[J]. 电力大数据, 2023, 26(8): 23 – 31.
- HAN Yu, XU Tingting, WU Difan. Optimal scheduling method for integrated energy system in industrial estate considering comprehensive demand response and power to gas technology[J]. Power System and Big Data, 2023, 26(8): 23 – 31.
- [10] 邱涛, 巩志皓, 张昊, 等. 计及可再生能源消纳的电热综合能源系统多目标优化模型[J]. 电力大数据, 2023, 26(5): 18 – 24.
- QIU Tao, GONG Zhihao, ZHANG Hao, et al. The multi-objective optimization model of integrated electric-heat energy systems considering the renewable energy consumption [J]. Power Systems and Big Data, 2023, 26(5): 18 – 24.
- [11] 丁雨昊, 吕干云, 刘永卫, 等. 考虑碳排放目标约束和需求侧响应的综合能源系统日前优化调度[J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 1 – 11.
- DING Yuhao, LÜ Ganyun, LIU Yongwei, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission target constraints and demand side response [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16 (8) : 1 – 11.
- [12] LI Y, WANG C, LI G, et al. Optimal scheduling of integrated demand response-enabled integrated energy systems with uncertain renewable generations: a Stackelberg game approach [J]. Energy Conversion and Management, 2021(235): 113996.1 – 113996.10.
- [13] 高玉, 王琦, 陈严, 等. 考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 51 – 59.
- GAO Yu, WANG Qi, CHEN Yan, et al. Optimal dispatch of integrated energy system with hydrogen considering demand response and cascade energy utilization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 51 – 59.
- [14] 罗鸿轩, 肖勇, 王宗义, 等. 考虑联合热电需求响应的多能源协调优化技术[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 72 – 79.
- LUO Hongxuan, XIAO Yong, WANG Zongyi, et al. Multi-energy coordination and optimization technology considering joint thermoelectric demand response [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 72 – 79.
- [15] 武妹凝, 李华强, 刘洋, 等. 考虑供热系统精细化建模的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1979 – 1992.
- WU Shuning, LI Huaqiang, LIU Yang, et al. Multi-objective optimal scheduling of regional integrated energy system considering refined modeling of heating system [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1979 – 1992.
- [16] LIU Z, CUI Y, WANG J, et al. Multi-objective optimization of multi-energy complementary integrated energy systems considering load prediction and renewable energy production uncertainties[J]. Energy, 2022(54): 124399.1 – 124399.9.
- [17] WANG Y, MA Y, SONG F, et al. Economic and efficient multi-objective operation optimization of integrated energy system considering electro-thermal demand response [J]. Energy, 2020(205): 118022.1 – 118022.10.
- [18] ZHANG B, HU W, CAO D, et al. Soft actor-critic-based multi-objective optimized energy conversion and management strategy for integrated energy systems with renewable energy [J]. Energy Conversion and Management, 2021 (243) : 114381.1 – 114381.10.
- [19] 李斌, 李岩, 刘佳鑫. 基于改进粒子群算法的综合能源系统经济优化运行[J]. 电工技术, 2023(2): 153 – 157.
- LI Bin, LI Yan, LIU Jiaxin. Economic optimization operation of integrated energy system based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Engineering, 2023 (2) : 153 – 157.
- [20] 朱海南, 王娟娟, 陈兵兵, 等. 考虑经济性与碳排放的电-气综合能源系统多目标规划[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(4): 422 – 431.
- ZHU Hainan, WANG Juanjuan, CHEN Bingbing, et al. Multi-objective planning of power-gas integrated energy system considering economy and carbon emission [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(4): 422 – 431.
- [21] 魏震波, 孙舟倍, 梁政. 基于多目标两阶段规划的虚拟电厂优化调度[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 109 – 118.
- WEI Zhenbo, SUN Zhoubei, LIANG Zheng. Virtual power plant optimal dispatching based on multi-objective and two-stage programming [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 109 – 118.
- [22] 肖勇, 肖小兵, 金鑫, 等. 含储能和分布式光伏的配电网系统计及静态电压稳定性的多目标优化[J]. 广东电力, 2024, 37(4): 24 – 32.
- XIAO Yong, XIAO Xiaobing, JIN Xin, et al. Multi-objective optimization of distribution network system with energy storage and distributed photovoltaic considering static voltage stability[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 24 – 32.
- [23] 刘超凡, 韩恺, 王永真, 等. 计及共享储能分布式多能源系统的多目标优化[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 88 – 96.

- LIU Chaofan, HAN Kai, WANG Yongzhen, et al. Multi-objective optimization of distributed multi-energy system considering shared energy storage [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(10): 88 – 96.
- [24] 马瑞, 李佳乐, 宋晨辉. 考虑动态舒适区间的配网-台区-用户多层次多目标协同优化方法[J]. *南方电网技术*, 2025, 19(11): 11 – 26, 49.
- MA Rui, LI Jiale, SONG Chenhui. Multi-level multi-objective collaborative optimization method for distribution network-substation area-end users considering dynamic comfort intervals [J]. *Southern Power System Technology*, 2025, 19(11): 11 – 26, 49.
- [25] MAYER M J, SZILAGYI A, GROF G. Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm [J]. *Applied Energy*, 2020(269): 115058.1 – 115058.10.
- [26] 陈光宇, 杨锡勇, 江海洋, 等. 高比例新能源接入下计及工业负荷特性的电网需求响应调控策略[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(4): 177 – 184.
- CHEN Guangyu, CHEN Xiyong, JIANG Haiyang, et al. Demand response regulation strategy for power grid accessed with high proportion of renewable energy considering industrial load characteristics [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(4): 177 – 184.
- [27] HUANG C, ZHANG H, SONG Y, et al. Demand response for industrial micro-grid considering photovoltaic power uncertainty and battery operational cost [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3043 – 3055.
- [28] CHIU W, YEN G, JUAN T. Minimum manhattan distance approach to multiple criteria decision making in multiobjective optimization problems [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016, 20(6): 972 – 985.
- [29] GUROBI OPTIMIZATION. Gurobi optimizer reference manual [EB/OL]. 2023 – 12 – 20]. <http://www.mendeley.com/catalog/gurobi-optimizer-reference-manual/>.
- [30] LIU W, HUANG Y, LI Z et al. Optimal allocation for coupling device in an integrated energy system considering complex uncertainties of demand response [J]. *Energy*, 2020(198): 117279.1 – 117279.11.

收稿日期: 2024-06-12; 网络首发日期: 2024-09-30

作者简介:

喻磊(1985), 男, 通信作者, 高级工程师(教授级), 博士, 从事分布式电源并网运行控制及智能配电网研究, yulei@csg.cn;

王扬(1993), 男, 工程师, 硕士, 从事配电网运行分析与控制方面研究, yangwstu@163.com;

林心昊(1991), 男, 高级工程师, 硕士, 从事分布式电源并网运行控制及智能配电网研究, linxh2@csg.cn。

(上接第74页 Continued from Page 74)

- XU Zheng. Broadband oscillation mechanism and its suppression technology based on C-type damping filter [J]. *Southern Power System Technology*, 2026, 20(1): 3 – 11, 23.
- [24] 龚轩. 面向系统动态过程的变换器电流控制时间尺度独立激励-响应特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [25] 袁小明, 李胜. 电力系统中变换器电流时间尺度动态过程分析的幅值/频率调制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(15): 4732 – 4744.
- YUAN Xiaoming, LI Sheng. An amplitude/frequency modulation based method of voltage source converter for power systems dynamic analysis in current control timescale [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(15): 4732 – 4744.
- [26] 吴鹏辉, 王思成, 袁小明. 系统小扰动初期交变电气量的幅频调制特征及解调方法[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(7): 57 – 67.

WU Penghui, WANG Sicheng, YUAN Xiaoming. Amplitude-frequency modulation characteristics and demodulation method of alternating electrical variables in initial stage of system small-disturbance [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(7): 57 – 67.

收稿日期: 2025-08-20; 网络首发日期: 2026-03-20

作者简介:

蔡百科(2000), 男, 硕士, 研究方向为电力系统振荡特征分析, baike_cai@hust.edu.cn;

王思成(1995), 男, 通信作者, 博士(博士后), 研究方向为电力电子化电力系统动态问题分析;

袁小明(1966), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 973计划项目首席科学家, 研究方向为多发电机多变流器电力系统稳定与控制、直流输电系统及其控制、可再生能源发电设备及其控制。