

基于能源路由器的工业园区多时间尺度 低碳调度策略

何金松¹, 张宇¹, 陈毓姝¹, 侯延鹏¹, 李泽政², 王欢²

(1.国网辽宁省电力有限公司本溪供电公司, 辽宁 本溪 117100; 2.沈阳工程学院 电力学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 针对可再生能源随机特性导致的工业耗能园区综合能源系统日前调度计划误差较大问题, 文章提出了一种基于能源路由器控制特性的综合能源系统多时间尺度低碳调度策略。在日前优化调度阶段, 综合考虑系统低碳性及经济性, 以日运行成本及环境成本最小为目标优化设备出力; 在日内调度阶段, 考虑能源响应时间差异与源荷不匹配的问题, 提出自适应时间尺度的日内滚动计划调度策略。根据系统日前调度后运行状态合理切换日内滚动计划调度周期, 实现对日前调度计划的反复修正。仿真结果表明, 文章所提方法可在不同时间尺度条件下减小可再生能源出力的波动性、负荷等因素对系统优化运行的影响, 降低系统碳排放量, 保障园区综合能源系统低碳、可靠运行。

关键词: 工业园区; 综合能源系统; 能源路由器; 多时间尺度

中图分类号: TK0 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)09-1253-09

0 引言

能源是人类日常生活中不可缺少的组成部分, 随着人类社会和科技的不断进步, 传统能源已呈现枯竭的趋势, 寻找新的能源并在保证能源供应的前提下降低环境污染, 是目前能源领域的研究热点^[1-3]。综合能源系统打破了各种能源系统之间常规物理隔离的壁垒, 符合可再生能源发展的潮流, 能够完成多种能源的优势互补, 不仅能够满足人们不断增加的能源需求, 而且在减少碳排放应对气候危机方面发挥着至关重要的作用^[4]。

当前, 基于能源路由器的综合能源系统调度研究主要集中在能源路由器对园区各设备的调控, 通过灵活地制定优化目标, 达到综合能源系统优化运行的目的。文献[5]针对微电网提出一种以能源路由器为基础的源荷储联合优化调度策略。通过将单个能源路由器接口拓展为多个接口, 满足储能装置、分布式电源及柔性负荷在能源互联网中的应用需求。文献[6]中能源路由器作为能量传输和转化中心, 一方面根据配电网的运行状态进行优化, 提高电能质量, 另一方面以联络线功率为约束目标, 对多个能源路由器之间的能量分配和调控进行优化, 从而实现配电网和综合能源网络群的整体优化运行。

随着“双碳”目标的提出, 针对综合能源系统低碳运行方面的研究日益增多。文献[7]考虑经济性及环境问题, 建立了成本及碳排放多目标函数, 对综合能源系统进行低碳调度。文献[8]引入阶梯式碳交易机制, 以运行成本、碳交易成本及弃风弃光惩罚成本最小为目标函数, 建立系统低碳调度模型。但是, 上述文献中只考虑日前计划, 尚未考虑可再生能源的随机性。

针对可再生能源出力的随机性及不确定性, 学者提出了多时间尺度调度的方法。文献[9]构建了日前-日内滚动中长时间尺度调度模型, 滚动计划以日前计划为参考, 实现对日前计划的不断修正。文献[10]考虑电热响应时间差异问题, 在日前阶段以系统总运行成本最小进行优化, 在日内调度中, 针对电热的响应时间差异, 对电能调度时间尺度取 15 min, 热能调度时间尺度取 1 h 进行优化。仿真结果表明, 该策略能够提高系统调度的准确性, 保证系统可靠运行。

本文提出一种基于能源路由器控制特性的综合能源系统多时间尺度低碳调度策略。在日前优化调度阶段, 综合考虑系统低碳性及经济性, 以日运行成本及环境成本最小为目标优化设备出力; 在日内调度阶段, 考虑能源响应时间差异与源荷

收稿日期: 2024-03-18。

基金项目: 国网辽宁省电力有限公司管理科技项目(2023YF-28)。

作者简介: 何金松(1994-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统与综合能源。E-mail: 280779413@qq.com

不匹配的问题,提出自适应时间尺度的日内滚动计划调度策略。根据系统日前调度后运行状态合理切换日内滚动计划调度周期,对供电设备和供热设备进行日内滚动调度,发挥用能、产能设备的日内调控潜力,实现日前计划的反复修正。

1 基于能源路由器的工业耗能园区调控模型

1.1 基于能源路由器的工业耗能园区结构

工业耗能园区综合能源系统包括能源的产、销、储等不同环节^[11],通过能源路由器的调控枢纽功能,为各能源网络、负荷模块、能源生产转换模块、储能模块以及可再生能源模块提供即插即用的接口,可以使不同类型能量相互协调运行,保证系统安全可靠运行^[12]。

本系统中,负荷模块分为电、热负荷;能源生产转换模块包括燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、电转气装置等;储能模块包括储电、储热以及储气设备;可再生能源模块由风力发电机组以及光伏发电机组构成。系统里,气能由上级气网供应;通过上级电网购电,风机、光伏发电机组、能源生产模块发电,满足电负荷需求;通过上级热网购热,能源生产模块产热,满足热负荷需求。

1.2 工业耗能园区能源路由器调控模型

1.2.1 工业耗能园区能源路由器概念

能源路由器是策略制定及执行的设备,可以将不同能源形式互相调配、转化、调节和补充,实现能源的高效利用和能源系统的协同运行^[13]。在综合能源系统中,能源网络将不同形式能量传输到能源路由器中,能源路由器接收多种数据信息,同时将数据信息进行处理、传送,实现能量的输入、输出。能源路由器能够根据能量供给、负荷变化等实时状况,制定相应的调度方案,控制单个能量接口的相互交换功率和每个能量转换装置的输出功率。能源路由器调控模型如图 1 所示。

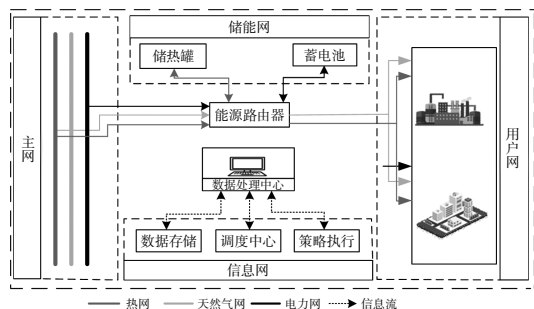


图 1 能源路由器调控模型

Fig.1 Energy router governance model

1.2.2 能源路由器能源传输转换模型

能源路由器中,多个能源之间有着复杂的转换、传递、储存和分配的关系。为了较为清楚地显示能源之间的相互耦合关系,能源路由器的能量流动特征可用矩阵加以表示^[14],其典型数学模型为

$$\begin{bmatrix} L_\alpha \\ L_\beta \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{\alpha\alpha} & \eta_{\beta\alpha} & \cdots & \eta_{\omega\alpha} \\ \eta_{\alpha\beta} & \eta_{\beta\beta} & \cdots & \eta_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{\alpha\omega} & \eta_{\beta\omega} & \cdots & \eta_{\omega\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \\ \vdots \\ P_\omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: L, η, P 分别为能源输出、耦合、转换及输入矩阵; α, β, ω 为能源的类型。

当多个设备对同一类型能源均有需求时会导致系统存在多条流动路径^[15],此时耦合矩阵包含能源传输转换效率矩阵 e 和能源调度矩阵 d 两部分,耦合矩阵数学模型为

$$\eta = e \cdot d = \begin{bmatrix} e_{\alpha\alpha} & e_{\beta\alpha} & \cdots & e_{\omega\alpha} \\ e_{\alpha\beta} & e_{\beta\beta} & \cdots & e_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{\alpha\omega} & e_{\beta\omega} & \cdots & e_{\omega\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{\alpha\alpha} & d_{\beta\alpha} & \cdots & d_{\omega\alpha} \\ d_{\alpha\beta} & d_{\beta\beta} & \cdots & d_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{\alpha\omega} & d_{\beta\omega} & \cdots & d_{\omega\omega} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于能源分配到某能源设备的功率应小于该种能源输入总量^[16],因此能源调度矩阵 d 须满足:

$$0 \leq d_{\alpha\beta} \leq 1 \quad \forall \alpha \in \xi, \forall \beta \in \Omega \quad (3)$$

1.3 园区综合能源系统设备模型

① 光伏发电机组

光伏的输出功率为

$$P_{PV,i}^T = \eta_{PV} S \varphi_{PV,i}^T \quad (4)$$

式中: $P_{PV,i}^T$ 为第 i 个光伏发电预测出力; η_{PV} 为光照效率; S 为光照面积; $\varphi_{PV,i}^T$ 为光照强度。

② 风力发电机组

风力发电的功率通常以风电机组的切入切出风速、额定风速和实测风速计算。

$$P_{wind} = \begin{cases} 0 & v < v_{in} \\ p_{rate} \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_r^3 - v_{in}^3} & v_{in} < v < v_r \\ p_{rate} & v_r < v < v_{out} \\ 0 & v \geq v_{out} \end{cases} \quad (5)$$

式中: v 为风速; v_{in}, v_{out} 分别为机组切入、切出风速; v_r 为额定风速; p_{rate} 为机组的额定功率。

③电锅炉设备

电锅炉(EB)是以电力为动力、以热量为输出的一种转换装置^[17]。电锅炉数学模型表达式为

$$Q_{EB,t}=\eta_{EB}E_{EB,t} \quad (6)$$

式中: $Q_{EB,t}$ 、 $E_{EB,t}$ 分别为电锅炉产能、用能功率; η_{EB} 为电锅炉热效率。

④燃气锅炉

燃气锅炉(GB)是自洽能源系统常用的供热设备,进一步加强了气-热耦合关系^[18]。燃气锅炉消耗的天然气的量模型为

$$Q_{GB}(t)=\eta_{GB}F_{GB}(t) \quad (7)$$

式中: Q_{GB} 为燃气锅炉生产的热功率; η_{GB} 为燃气锅炉的实际转化效率; F_{GB} 为燃气锅炉的运行效率,接受指令调度。

⑤燃气轮机

燃气轮机(GT)作为发电设备为用户提供电能。燃气轮机的天然气耗量与输出电热功率关系为

$$\begin{cases} P_{GT}(t)=\eta_{GT,e}F_{GT}(t) \\ Q_{GT}(t)=\eta_{GT,h}F_{GT}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_{GT} 和 Q_{GT} 分别为燃气轮机的输出电、热功率; $\eta_{GT,e}$ 和 $\eta_{GT,h}$ 分别为燃气轮机的电、热转化效率; F_{GT} 为燃气轮机的运行功率,接受指令调度; $t=1, \dots, n, n$ 为时间分辨率。

⑥蓄电池

电池的特性主要由电荷状态和充/放电功率描述。

$$SOC(t)=(1-\delta_e)SOC(t-1)-\frac{1}{E_e} \int_{t-1}^t \eta_{ess} \cdot P_{ess}(\chi) d\chi \quad (9)$$

式中: δ_e 为电池自放电系数; E_e 为电池额定容量; η_{ess} 为电池充/放电效率; P_{ess} 为电池运行功率,正为放电,负为充电,接受指令调度。

⑦储热罐

热储能的数学模型为

$$H_{HS}^T=(1-\psi_{HS})H_{HS}^{T-1} + \left[H_{HSch}^T \eta_{HSch} - \frac{H_{HSdis}^T}{\eta_{HSdis}} \right] \Delta T \quad (10)$$

式中: H_{HS}^T 为储热罐(HS)在 T 时段容量; ψ_{HS} 为HS散热损失率; H_{HSch}^T 、 H_{HSdis}^T 分别为HS在 T 时段的吸、放热功率; η_{HSch} 、 η_{HSdis} 分别为HS吸、放热效率。

1.4 系统碳排放模型

本文构建的综合能源系统实际碳排放量包括能源生产设备产生的 CO_2 排放以及购能产生的 CO_2 排放^[19]。计算式为

$$E_{CO_2} = \sum \int G_c(P_i)dt + P_e \cdot EF_{CO_2,e} + H_h \cdot EF_{CO_2,h} \quad (11)$$

式中: E_{CO_2} 为系统实际碳排放量; $G_c(P_i)$ 为第 i 个时段机组每小时碳排放量; P_e 为购电量; $EF_{CO_2,e}$ 、 $EF_{CO_2,h}$ 分别为电力、热力供应的 CO_2 排放因子; H_h 为购热量。

2 园区综合能源系统多时间尺度低碳调度模型

2.1 园区综合能源系统多时间尺度低碳调度策略

在园区综合能源系统多时间尺度低碳调度策略中,首先能源路由器根据园区负荷以及可再生能源出力的日前预测数据对园区进行日前低碳调度,从而为整个系统的低碳运行提供决策依据;其次,随着时间尺度的增加,负荷和可再生能源功率的预测精度下降。考虑到电热响应时间存在差异,本文采用自适应时间尺度的日内滚动计划调度方法,滚动调整日前规划方案,降低园区综合能源系统日内功率调整量,使工业耗能园区安全、稳定、低碳运行。

2.2 日前调度

2.2.1 目标函数

为了更好地兼顾系统运行的低碳性与经济性,本文将优化目标设置为日运行成本和环境成本最小。

①日运行成本

日运行成本包括系统向外部网络购买的电、气、热的平均日成本^[20]和设备维护成本。

$$F_{i*} = \sum_{t=1}^{T=24h} \left[c_{e,t} p_{e,t} + c_{h,t} p_{h,t} + c_{g,t} p_{g,t} + \sum_{i=1}^N c_i P_i(t) \right] \quad (12)$$

式中: F_{i*} 为系统的日运行总成本; $c_{e,t}$ 、 $c_{g,t}$ 、 $c_{h,t}$ 分别为 t 时段园区电网、气网、热网的单位能量价格; $p_{e,t}$ 、 $p_{g,t}$ 、 $p_{h,t}$ 分别为园区电网、气网、热网输送的总能量; c_i 为供能设备 i (燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、储能等装置)的单位功率运行维护费用; N 为综合能源系统内设备数量; $P_i(t)$ 为设备 i 在 t 时段的输出功率。

②环境成本

系统在运行过程中,燃气锅炉和燃煤机组消耗天然气和煤会产生 CO_2 ,向上级网络购能同样

会产生 CO₂, 因此该系统的环境成本 C_{env} 为排放 CO₂ 所需要的惩罚成本 $W_{CO_2}^{[21]}$ 。

$$C_{env} = W_{CO_2} \cdot E_{CO_2,e} \quad (13)$$

式中: $E_{CO_2,e}$ 为系统实际碳排量。

综上所述, 该系统的整体优化函数为

$$C_{\Sigma} = C_{cost} + C_{env} \quad (14)$$

2.2.2 约束条件

园区综合能源系统在运行过程中须考虑热、电、气 3 个系统的能量平衡。

$$\begin{cases} P_{elec}(t) + P_{pv}(t) + P_w(t) + P_{gt}(t) = \\ P_{eb}(t) + P_{ec}(t) + P_{load,e}(t) + P_{aba}(t) \\ P_{heat}(t) + P_{eb,h}(t) + P_{gh}(t) + P_{gb}(t) = \\ P_{load,h}(t) + P_{hs}(t) \\ P_g(t) = P_{CB}(t) + P_{HC}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{elec}(t), P_{pv}(t), P_w(t), P_{gt}(t)$ 分别为 t 时刻电网、光伏、风机及燃气轮机的出力; $P_{eb}(t), P_{load,e}(t), P_{ec}(t), P_{aba}(t)$ 分别为 t 时刻电锅炉、电负荷、储能电池、弃风光的功率; $P_{heat}(t), P_{eb,h}(t), P_{gh}(t), P_{gb}(t)$ 分别为 t 时刻热网、电锅炉、燃气轮机及燃气锅炉产热功率; $P_{load,h}(t), P_{hs}(t)$ 分别为 t 时刻负荷、蓄热槽所需热量的功率; $P_g(t)$ 为 t 时刻外购气功率; $P_{CB}(t)$ 为 t 时刻燃气锅炉消耗的气功率; $P_{HC}(t)$ 为 t 时刻储气罐存储气功率。

此外, 园区综合能源系统在运行过程中还须考虑设备的出力约束, 即设备出力不大于设备最大出力。

2.3 基于自适应时间尺度的滚动计划调度模型

2.3.1 基于自适应时间尺度的日内滚动优化策略

在日前调度阶段, 随着时间尺度的增加, 负荷和可再生能源功率的预测精度下降^[22]。考虑到电、热响应时间不同, 本文采用电热混合自适应时间尺度调节的滚动规划方法, 实现日前规划方案的滚动校正。

本文将自适应时间尺度的滚动计划开始时间设置为 0 时, 热计划层调度周期设置为 $4t$, 间隔为 $1t, 2t$ 更新一次; 电计划层调度周期设置为 $2t$, 间隔为 $1/4t, 1t$ 更新一次。

在某一时刻, 能源路由器下达指令, 获取未来 $4t$ 的负荷与可再生能源出力数据, 优化 0~ $4t$ 内产热机组的出力, 将结果传递给电计划层。电计划层在 0 时刻基于 0~ $2t$ 的数据对产电机组出

力进行优化; 在 $1t$ 时刻, 以 $1t$ 为距离向前滚动, 对 $1t$ ~ $3t$ 产电机组出力进行优化, 结束第一次自适应时间尺度滚动计划。以此类推, 实现日前计划的反复修正。

2.3.2 自适应时间尺度

在滚动计划调度环节, 在系统净负荷预测功率波动相对平稳的情况下, 按照分度值 1 h 进行调度; 而在波动较大时, 切换到较小时间尺度分度值, 以降低功率波动。

为实现滚动调度时间尺度的自适应合理切换, 须兼顾电源负荷的匹配以及时间尺度转换前、后的成本。

源荷匹配度增加率 M 计算式如下:

$$M = D^r - D^{r-b} \quad (16)$$

$$D = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{n^{data}} |P_{1-eq}^{data}(i) - \bar{P}_{1-eq}^{data}|}{n^{data} \cdot \bar{P}_{1-eq}^{data}} \right] \times 100\% \quad (17)$$

式中: D^{r-b}, D^r 分别为分度值切换前后的调度成本; n^{data} 为滚动计划调度分度值 1 h 的净负荷预测功率点数; $P_{1-eq}^{data}(i), \bar{P}_{1-eq}^{data}$ 分别为第 i 时段的预测净负荷功率及其平均值。

成本增加率 N 计算式为

$$N = \frac{C^r - C^{r-b}}{C^{r-b}} \times 100\% \quad (18)$$

自适应选取的滚动计划调度时间尺度分度值为 t , 则两个分度值应满足:

$$\begin{cases} T^R = m \cdot 1 \text{ h}, m \in N^* \\ T^{r-b} = n^r \cdot t, n^r \in N^* \end{cases} \quad (19)$$

2.3.3 日内滚动优化模型

①热计划层目标函数

自适应时间尺度滚动计划采用热、电混合时间尺度分层调度。能源路由器向热计划层下达指令, 依据日前规划获得基本方案, 对系统中的能量产出和转化设备进行输出调节, 达到能量供给与需求的均衡。热计划层的目标函数为购能功率、产热机组出力调整量最小, 如式(20)所示。

$$\begin{cases} \min_{f_{is,h}} = \min(f_p + f_c) \\ f_p = \sum_{i=t}^{t+4} (d_1 |\Delta P_e^i| + d_2 |\Delta P_g^i|) \\ f_c = \sum_{i=t}^{t+4} d_3 (|\Delta P_{GT}^i| + |\Delta P_{CB}^i| + |\Delta P_{EB}^i|) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} P_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{24} (P_e^i + P_g^i + P_{\text{GTh}}^i + P_{\text{GBh}}^i + P_{\text{EBh}}^i) \\ d_1 = \frac{1}{P_{\text{sum}}} \sum_{i=1}^{24} P_e^i, d_2 = \frac{1}{P_{\text{sum}}} \sum_{i=1}^{24} P_g^i \\ d_3 = \frac{1}{P_{\text{sum}}} \sum_{i=1}^{24} (P_{\text{GTh}}^i + P_{\text{GBh}}^i + P_{\text{EBh}}^i) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\Delta P_e^i, \Delta P_g^i$ 分别为滚动计划第 i 个时段购电、购气功率的调整量; d_1, d_2, d_3 分别为园区购电量、购气量、产热机组的单位功率调整权重系数; $\Delta P_{\text{GT}}^i, \Delta P_{\text{GB}}^i, \Delta P_{\text{EB}}^i$ 分别为第 i 个时段燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉的调整量; P_e^i, P_g^i 分别为购电、热功率; $P_{\text{GTh}}^i, P_{\text{GBh}}^i, P_{\text{EBh}}^i$ 分别为燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉的产热功率; P_{sum} 为归一化处理所需计算的设备出力总量。

②电计划层目标函数

电计划层对产电设备进行优化的目标函数为系统运行总成本最小。电计划层系统运行总成本 $f_{\text{RS},e}$ 包含购能成本 f_{buy} 和设备运行成本 f_{op} 。

$$\min_{f_{\text{RS},e}} = \min \left[\sum_{i=1}^T \left(p_e^i P_e^i + p_g^i P_g^i + c_{\text{WT}} P_{\text{WT}}^i + c_{\text{PV}} P_{\text{PV}}^i + c_{\text{GT}} P_{\text{GT}}^i + c_{\text{EB}} P_{\text{EB}}^i + c_{\text{Se}} \Delta P_{\text{Se}}^i \right) \right] \quad (22)$$

式中: p_e^i, p_g^i 分别为购电、热成本; $c_{\text{WT}}, c_{\text{PV}}, c_{\text{GT}}, c_{\text{EB}}, c_{\text{Se}}$ 分别为风电、光伏、燃气轮机、电锅炉、电储能的运行成本。

2.3.4 自适应时间尺度滚动计划约束条件

由于热能响应时间较长,难以在分钟级实现供需平衡,因此自适应时间尺度滚动计划的约束条件包含日前计划约束条件,但不包含热能供需实时平衡约束。对于热能约束,本文仅考虑调度周期结束后的热功率平衡约束,如式(15)所示。

此外,自适应时间尺度滚动计划约束条件还包含供热设备的出力偏差不宜过大,约束条件为

$$\begin{cases} |P_{\text{GTh},F}^i - P_{\text{GTh},L}^i| \leq \lambda_{\text{RS}} P_{\text{GTh}}^{\text{max}} \\ |P_{\text{EB},F}^i - P_{\text{EB},L}^i| \leq \lambda_{\text{RS}} P_{\text{EB}}^{\text{max}} \\ |P_{\text{GBh},F}^i - P_{\text{GBh},L}^i| \leq \lambda_{\text{RS}} P_{\text{GBh}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{\text{GTh},F}^i, P_{\text{GBh},F}^i, P_{\text{EB},F}^i$ 分别为前一时间窗中燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉在 t 时刻的供热功率;

$P_{\text{GTh},L}^i, P_{\text{GBh},L}^i, P_{\text{EB},L}^i$ 分别为后一时间窗中燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉在 t 时刻的供热功率; λ_{RS} 为自适应时间尺度滚动计划约束因子。

2.4 模型求解

本文所提调度模型均为混合整数线性规划模型,决策变量规模一般,基于 MATLAB 中的 YALMIP 平台,可以通过调用 CPLEX/GUROBI/LINGO 等商业求解器,在满足运行约束的前提下,对控制变量进行优化,使其达到最优。

3 仿真算例及结果分析

3.1 基础数据

为了验证本文建立策略的有效性,以某综合能源系统园区典型日下系统电力、热力、燃气负荷需求以及可再生能源实际出力值为例进行优化分析。仿真中,综合能源系统主要设备的相关基础参数如表 1 所示。园区典型日下风、光机组实际出力值如图 2 所示。园区分时电价如表 2 所示,气价取 2.3 元/ m^3 ,热价取 0.55 元/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h})$,自适应时间尺度滚动计划 $t=1 \text{ h}$ 。

表 1 工业耗能园区机组参数
Table 1 Unit parameters of industrial energy-consuming parks

设备	出力上限/kW	电效率	热效率
燃气轮机	4 800	0.45	0.40
燃气锅炉	3 500		0.85
电锅炉	1 200		0.85
电储能	5 500	0.85	
热储能	5 800		0.90

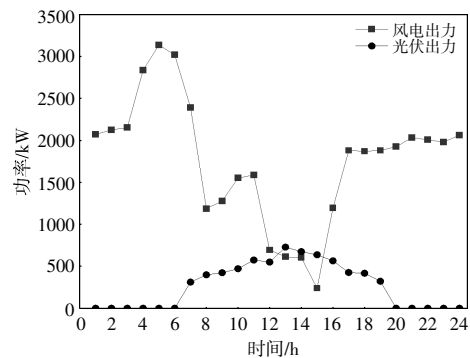


图 2 风、光机组出力曲线
Fig.2 Wind and solar unit output curve

表 2 分时电价
Table 2 Time-of-use tariff 元/(kW·h)

时间	0:00-6:00	6:00-11:00	11:00-15:00	15:00-20:00	20:00-24:00
价格	0.25	0.50	0.65	0.50	0.25

3.2 结果分析

本文设置了两种运行方案进行对比分析。方案 1: 能源路由器不参与综合能源系统耦合优化调度, 调度模型采用多时间尺度低碳调度; 方案 2: 将多时间尺度低碳调度方法引入能源路由器中, 实现对综合能源系统的耦合优化。

3.2.1 日前优化调度结果

从图 3~6 可以看出, 相较于方案 1, 通过能源路由器对电、气、热能的协调与控制, 在 01:00-06:00 和 22:00-24:00 热负荷需求较大时段, 由于能源路由器增大了电锅炉出力, 系统热能产量逐渐增多, 系统不再需要向热网购买能量, 在保持系统正常运行的同时达到降碳经济运行的目的。07:00 后, 系统内电负荷、电转气、蓄电池等装置消耗电能的同时, 能源路由器调度燃气轮机、燃气锅炉等装置运行, 以增加系统热能产量, 热能满足热负荷需求后, 多余热量在能源路由器调控下存储在储热罐中, 待热能需求量较大时段, 储热罐放热以供热负荷需求。13:00 后, 能源路由器控制燃气轮机、燃气锅炉以及储热装置同时供给热能, 系统向热网购买能量减少, 达到低碳经济运行的

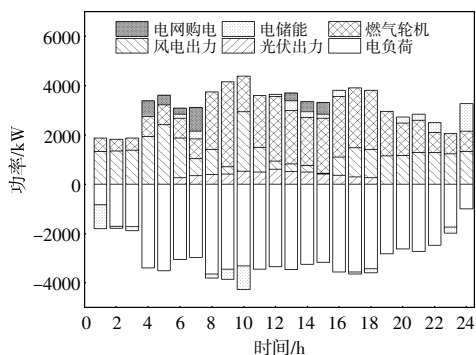


图 3 方案 1 电功率调度结果
Fig.3 Scheme 1 electric power scheduling results

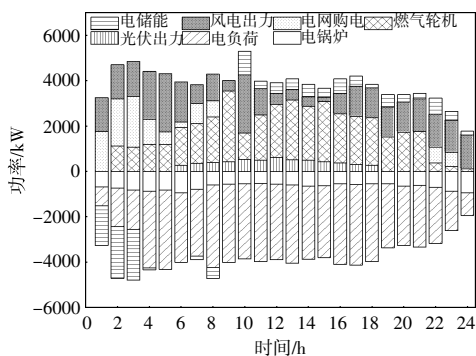


图 4 方案 2 电功率调度结果
Fig.4 Scheme 2 electric power scheduling results

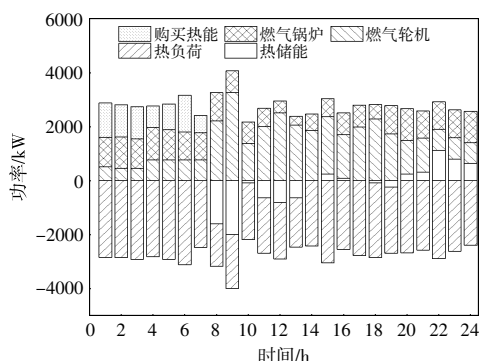


图 5 方案 1 热功率调度结果
Fig.5 Scheme 1 thermal power scheduling results

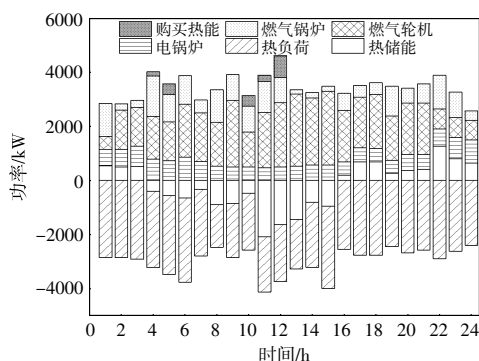


图 6 方案 2 热功率调度结果
Fig.6 Scheme 2 thermal power scheduling results

目的。

3.2.2 多时间尺度优化调度结果

如图 7~9 所示, 自适应时间尺度滚动计划中, 园区各用能、产能设备功率变化趋势与日前规划基本吻合, 体现了日前计划对滚动调度的指导作用。从多时间尺度优化调度结果可以看出, 在日内滚动优化阶段, 综合能源系统各设备出力波动较日前优化大, 主要是为了满足实时变化的负荷需求, 充分发挥可再生能源出力的高波动性, 相较于日前优化调度, 能够更好地平衡系统内的能量。

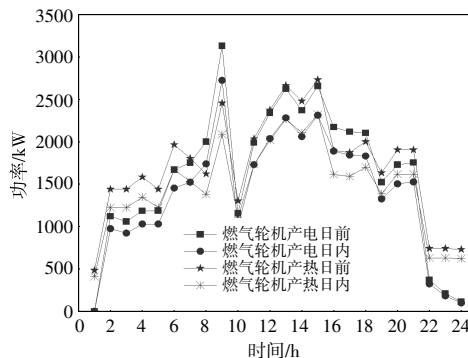


图 7 多时间尺度燃气轮机优化结果
Fig.7 Multi-time scale gas turbine optimization results

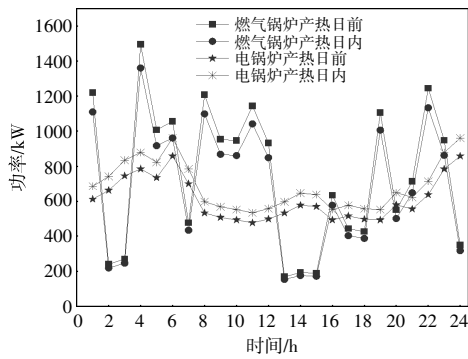


图8 多时间尺度燃气锅炉、电锅炉优化结果
Fig.8 Multi-time scale gas boiler and electric boiler optimization results

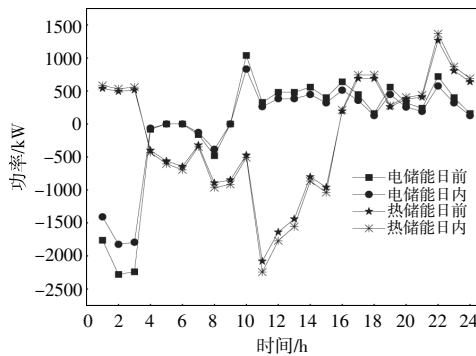


图9 多时间尺度储能优化结果
Fig.9 Multi-time scale energy storage optimization results

3.2.3 多时间尺度优化调度低碳性分析

本文分别对3种调度方案的低碳性进行对比,结果如表3所示。方案1:能源路由器不参与综合能源系统耦合优化调度,调度模型仅采用日前低碳调度;方案2:能源路由器不参与综合能源系统耦合优化调度,调度模型采用多时间尺度低碳调度;方案3:将多时间尺度低碳调度方法引入能源路由器中,实现对综合能源系统的耦合优化。

表3 不同方案下运行成本与系统碳排放对比

Table 3 Comparison of operating cost and system carbon emission under different schemes

方案	日运行成本/元	购能成本/元	碳排放成本/元	系统碳排放量/t
1	59 236	41 786	16 450	30.31
2	52 952	32 332	16 620	25.57
3	48 250	30 201	14 147	22.31

从表3可以看出,基于能源路由器的多时间尺度低碳调度的低碳性最佳。相较于方案2,方案3系统的低碳性提高14.6%。相较于方案1,方案2虽然没有能源路由器对综合能源系统的调控,但是由于其进行了多时间尺度的优化,在更小时间尺度内使机组出力与负荷需求进行了匹配,

其低碳性比相对粗糙的日前优化调度更优越。

4 结论

本文提出了一种基于能源路由器控制特性的综合能源系统多时间尺度低碳调度策略。在日前优化调度阶段,综合考虑系统低碳性及经济性,以日运行成本及环境成本最小为目标优化设备出力;在日内调度阶段,考虑能源响应时间差异与源荷不匹配的问题,提出自适应时间尺度的日内滚动计划调度策略,实现对日前调度计划的反复修正。通过仿真分析,得到如下结论。

①在多时间尺度低碳调度过程中,通过能源路由器的调度中心功能,综合考虑电、热响应时间差异,在不同规划阶段设定合理的目标函数,实现多时间尺度的最优调度。算例结果表明,所提出的策略既能有效地降低系统运行费用,又能减少碳排放,实现了安全、稳定、绿色运行,验证了本文提出策略的有效性。

②日前调度通过预测信息生成了综合能源系统一日的调度计划,可使各用能、产能设备协调运行,保证了系统安全、稳定、低碳运行。

③自适应滚动调度方案对供电设备及供热设备进行分层调度,充分挖掘了用能、产能设备的调节潜力,能够实现日内计划的反复修正。

参考文献:

- [1] 刘秋华,刘鑫,郑亚先,等.基于绿电和自愿减排量交易的园区低碳电力运营优化[J].可再生能源,2024,42(2):233-240.
- [2] 王义军,孙健淳,高敏,等.考虑含HRD的光热电站和综合需求响应的综合能源系统低碳经济调度[J].东北电力大学学报,2024,44(1):72-82.
- [3] 孙亮,原瑞彤,张程,等.考虑电热需求响应的综合能源系统低碳优化运行[J].可再生能源,2023,41(6):836-844.
- [4] C Xu, J Ma, L Wang, et al. Research on planning difficulty and decoupling method of integrated energy system [A]. 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2) [C]. Beijing: IEEE, 2018.1-5.
- [5] 张政斌,叶鹏,张娜,等.基于能源路由器的微网源荷储联合优化调度[J].河北电力技术,2022,41(3):30-36.
- [6] 仇书山,毛承雄,马春艳,等.基于能源路由器的配电网与综合能源微网群协同运行优化[J].高压技术,

- 2022, 48(12):5024–5036.
- [7] 陈洪银, 郭毅, 王松岑, 等. 计及风光储的冷热电联产综合能源系统低碳经济优化 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(2):277–285.
- [8] 廖波, 张央, 徐鸿飞, 等. 考虑电-碳交易园区综合能源系统经济运行评估[J]. 可再生能源, 2024, 42(2):252–258.
- [9] 胡文博, 陈思安, 耿若曦, 等. 园区综合能源系统的多时间尺度低碳调度[J]. 控制工程, 2023, 30(12):2267–2273.
- [10] 徐艳芳, 杨培宏, 赵欢, 等. 电热综合能源系统多时间尺度优化调度策略研究[J]. 电工技术, 2023(20):41–44.
- [11] Cao J, Yang Y, Qu N, et al. A low-carbon economic dispatch method for regional integrated energy system based on multi-objective chaotic artificial hummingbird algorithm [J]. Scientific Reports, 2024. DOI:10.1038/s41598-024-54733-2.
- [12] 杨茂, 崔宇, 马苗苗, 等. 考虑时间差异性的综合能源系统多层协调优化调度[J]. 可再生能源, 2023, 41(9):1239–1246.
- [13] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3):10–17.
- [14] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈颖光, 等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9):48–55.
- [15] 骆钊, 卢涛, 马瑞, 等. 可再生能源配额制下多园区综合能源系统优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4):8–14.
- [16] Li Xiaozhu, Wang Weiqing, Wang Haiyun. Hybrid time-scale energy optimal scheduling strategy for integrated energy system with bilateral interaction with supply and demand[J]. Applied Energy, 2021, 285:116458.
- [17] Ji Ling, Liang Xiaolin, Xie Yulei, et al. Optimal design and sensitivity analysis of the stand-alone hybrid energy system with PV and biomass-CHP for remote villages[J]. Energy, 2021, 225:120323.
- [18] 颜宁, 马广超, 李相俊, 等. 考虑跨季节性储能能的园区综合能源系统低碳经济调度方法 [J]. 高电压技术, 2023, 49(10):4182–4191.
- [19] 汤翔鹰, 胡炎, 耿琪, 等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4):81–90.
- [20] Zhong X Q, Zhong W F, Liu Y, et al. Optimal energy management for multi-energy multi-microgrid networks considering carbon emission limitations [J]. Energy, 2022, 246:123428.
- [21] 王谦, 王斌, 刘翔. 零碳交易下工业园区综合能源系统优化配置[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(11):2294–2304.
- [22] 朱建全, 刘海欣, 叶汉芳, 等. 园区综合能源系统优化运行研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(7):2469–2482.

Multi-time scale low-carbon dispatching strategy for industrial parks based on energy routers

He Jinsong¹, Zhang Yu¹, Chen Yushu¹, Hou Yanpeng¹, Li Zezheng², Wang Huan²

(1.State Grid Liaoning Electric Power Co.,Ltd. Benxi Power Supply Company, Benxi 117100, China; 2.School of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to solve the problem of large error in the day-ahead scheduling plan of the integrated energy system of industrial energy-consuming parks caused by the random characteristics of renewable energy, a multi-time scale low-carbon dispatching strategy of the integrated energy system based on the energy router was proposed based on the control characteristics of the energy router. In the day-ahead optimization scheduling stage, considering the low-carbon and economic performance of the system, the equipment output is optimized with the goal of minimizing the daily operating cost and environmental cost, and in the intra-day scheduling stage, considering the problem of energy response time difference and source-load mismatch, an adaptive time-scale intraday rolling plan scheduling strategy is proposed, and the intraday rolling plan scheduling cycle is reasonably switched according to the operation status of the system after the day-ahead scheduling, so as to realize the repeated correction of the day-ahead scheduling plan. The simulation results show that the proposed method can reduce the influence of renewable energy, load and other factors on the optimal operation of the system under different time scales, reduce the carbon emissions of the system, and ensure the low-carbon and reliable operation of the integrated energy system in the park.

Keywords: industrial parks; integrated energy systems; energy routers; multiple time scales