

算力电力节点可调节资源的双向协同优化调度

周钱雨凡, 杨苹, 万思洋, 崔嘉雁, 李丰能, 隗知初
(华南理工大学电力学院, 广州市 510641)

摘要:在计算需求爆发式增长、算力资源成本高、数据中心能耗高以及电网运行稳定受到影响的背景下,亟需探索算力与电力可调节资源的双向协同技术以降低算力的能耗成本并提高电网运行的稳定性和经济性。首先,构建算力电力节点可调节资源的双向协同调度架构,分别对算力节点和电力节点内的多元实时可调资源进行量化建模。然后,考虑计算工作任务与算力资源的匹配性、实时调节特性,通过对算力节点下计算工作任务的调度以及电力节点下的可调节负荷调度,提出双层两阶段算电协同优化调度模型。最后,通过算例验证了算电节点可调节资源双向协同优化可行且效果显著:在电力节点整体可调节资源量约2 300 MW的设定下,50 MW算力节点为电力节点运行降低的成本可占到4.71%;同时算力节点自身日内运行成本降低约0.70%。

关键词:算电协同;可调节资源;双层优化;优化调度

Bidirectional Collaborative Optimization Scheduling of Adjustable Resources in Computing Node and Power Node

ZHOU Qianyufan, YANG Ping, WAN Siyang, CUI Jiayan,
LI Fengneng, WEI Zhichu

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

ABSTRACT: The era of intelligence has driven computing power resources to become highly flexible and adjustable. They have also made the bidirectional collaborative optimization of computing and electricity into a new method of economic optimization in comprehensive energy systems. The explosive growth in computational demand has led to a shortage of computational resources. It also brings the challenges of high energy consumption and carbon emissions for data centers, where the annual electricity consumption can reach billions of kilowatt-hours. When the cost of computing resources is high and the stability of power grid operations is affected, there is an urgent need to explore bidirectional collaborative technologies between computing and power nodes with adjustable resources to reduce the energy cost and enhance the stability and economic efficiency of power grid operation. This study constructs a bidirectional collaborative scheduling architecture for adjustable resources in computing and power nodes, and quantitatively models the diverse adjustable resources within them. Considering the matching and real-time adjustment characteristics between computing tasks and resources, a dual-layer two-stage collaborative optimization scheduling model is proposed by scheduling computing tasks under the computing node and adjustable loads under the power node. Through numerical examples, it was verified that the bidirectional collaborative optimization of adjustable resources for computing and power nodes is feasible and effective. Under the setting of an overall adjustable resource of approximately 2300 MW for power nodes, the cost reduction provided by computing nodes of 50 MW can account for 4.71% of the power node operation, while reducing its daily operating costs by approximately 0.70%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51937005) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB4203102).

KEYWORDS: computing and power collaboration; adjustable resources; double-layer optimization; optimize scheduling

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)02-0013-13

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.02.002

0 引言

2021年工信部发布的《“十四五”大数据产业规划》^[1]和2022年国务院发布的《关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见》^[2]明确指出推动大数据中心的建设以及全行业数字化转型。计算需求的爆发式增长使得数据中心面临高能耗和高碳排的挑战^[3-6],大型数据中心年耗电量可达数亿千瓦时^[7]。同时,算力资源因其响应快、调度成本低成为综合能源系统^[8]中潜力巨大的灵活性可调节资源^[9-10],亟需探索算力与电力可调节资源的双向协同技术以降低算力的能耗成本^[11-12],同时提高电网安全稳定运行的经济性^[13-14]。

现有国内外研究大多聚焦于算力调度,鲜有与电力的协同:文献[15-16]研究了基于多中心应用特征的任务调度方法;文献[17]研究了边缘计算算力的调度问题;文献[18-20]均从算网融合的视角研究计算任务与算力节点的优化问题。随着“东数西算”工程^[21-22]的提出,国内算力电力协同的相关政策和研究不断发展:2023年国家发改委公布的《深入实施“东数西算”工程加快构建全国一体化算力网的实施意见》^[23]中提出开展算力电力协同试点,学者们分别对京津冀^[24]、粤港澳^[25]、成渝^[26]等多个地区^[27-29]详细分析了算力枢纽建设的战略关键问题及未来发展方向;文献[30]对数据中心的能耗模型以及能效优化算法进行了总结;文献[31-32]作为国内算电协同领域的开山之作,研究了大型数据中心的负荷特征及其时空灵活性并分析了算电协同领域的未来发展潜力;文献[33-34]分析了数据中心园区在多元电力市场的规划和调度问题,指出数据中心园区内的多样化可调节资源可有效提供调频和容量保障服务。但上述模型中均是以数据中心为整体考虑,无法拆分分析算力资源与电力资源各自的特性并体现双向协同的优势。且对于算力节点内实时算力消耗及其可移特性的描述并未深入量化建模,没有考虑算力供需的匹配性和调度合理性。

为了深度挖掘算力电力协同的灵活调节潜力,通过算力电力节点运行的降本增效从内部支撑区域综合能源系统运行的经济优化,本文着眼于算力电力节点层级,构建算力电力节点可调节资源的双向协同调度架构,分别针对算力节点和电力节点内的多元可调节资源进行量化建模,提出上层电力节点优化-下层算力节点优化的双层两阶段算电协同优化调度模型。最后通过算例分析算力节点对电力节点运行经济性的贡献,以及在电力节点的价格驱动下算

力节点内算力资源的优化转移过程,验证模型在算力电力双向协同降本增效上的可行性和有效性。

1 算力电力节点可调节资源的双向协同调度架构

电力节点作为算力节点的能量供应来源,为算力节点中的信息技术(information technology, IT)设备以及各类辅助设备的正常运转提供可靠的电能以满足算力需求;与此同时,算力节点作为电力节点下一个重要的可调节负荷,为电力节点提供可调节资源。算力节点和电力节点可调节资源的协同调度架构如附录A中图A1所示,电力节点内部多种类型的发电机组于日前接收由电力调度中心确认的机组出力计划;算力节点根据其算力需求于日前对算力负载进行编排,从而确定算力节点内的IT设备及辅助设备的用电计划。为了保障电力节点的稳定运行,同时提高算力节点内设备的利用效率和运行的经济性,在日内运行过程中,电力负荷管理中心需要考虑实际负荷的随机变化以及电力节点内风电机组和光伏发电机组的随机波动,灵活调节各类可调节资源的用电曲线。算力负载管理中心则需要根据电力节点的调节情况,调整算力编排计划,改变算力节点内IT设备及各类辅助设备的能耗曲线。通过算力电力的双向协同调度保障算力电力节点的算电供需平衡并实现算力电力节点运行的降本增效。

2 算力电力节点可调节资源模型

基于上文中的算力电力可调节资源的协同调度架构,本节将分别详细阐述算力节点和电力节点内部的运行机制、可调节资源及其调节特性,构建算力电力节点可调节资源模型以支撑算力电力节点的双向优化调度。

2.1 算力节点模型

算力节点所属范围内各类用户均可针对自身的业务需求向算力负载管理中心申请计算服务,算力负载管理中心将计算服务拆解成可量化的工作任务,主要分为计算和存储两个方面。算力计算单位包括:每秒所执行的千万亿次浮点运算次数(peta floating point operations per second, PFLOPS)、每秒所执行的万亿次浮点运算次数(tera floating point operations per second, TFLOPS)、每秒所执行的十亿次浮点运算次数(giga floating point operations per second, GFLOPS)。

其中,算力计算任务分为以超算类应用为代表的超大型计算算力(>1 PFLOPS)、以卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和循环神经网络

络(recurrent neural network, RNN)训练为代表的大型计算算力(10 TFLOPS~1 PFLOPS)、以目标检测为代表中型算力和以单条语音语义为代表的小型计算算力(< 500 GFLOPS);算力存储任务分为以云AR/VR为代表的超大型存储算力(TB级存储容量)、以智能驾驶为代表的大型存储算力(百GB级~TB级存储容量)和以智能门禁为代表的中型存储算力(百GB级存储容量)^[35]。本文考虑以500 GFLOPS为一个计算算力单元,以100 GB为一个存储算力单元进行建模。负载管理中心将拆解后的工作任务与实时更新的算力资源进行匹配和优化,将工作任务分配到各个服务器中按照服务需求完成。

假设在整个调度周期内算力负载管理中心将计算需求拆解分割成 m 个工作任务 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ 需要分配到算力节点内的 n 台服务器 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 上进行处理。在工作任务的编排中,需考虑每个工作任务所需要的算力资源、任务优先级。每个计算任务 R_i 可描述为:

$$R_i = [R_{sto,i}, R_{cal,i}, R_{pri,i}, R_{ocu,i}], i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: R_i 表示第 i 个工作任务; $R_{sto,i}$ 表示处理该工作任务 i 所需要的存储容量,单位为个存储单元; $R_{cal,i}$ 表示工作任务 i 所需的标准计算算力,单位为个算力单元; $R_{pri,i}$ 表示工作任务 i 的处理优先级, $R_{pri,i} \in \mathbf{N}$,数值越大优先级越高; $R_{ocu,i}$ 表示工作任务 i 在标准计算算力下的服务器预计占用时间,单位为s。根据计算需求对时间的敏感性可以将其划分为时间可移和时间不可移两类。 m 个工作任务的不可移性质描述矩阵为如下0-1矩阵:

$$D_c = [d_{c1} \ d_{c2} \ \dots \ d_{ci} \ \dots \ d_{cm}]^T, i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中: D_c 表示工作任务的不可移性质描述矩阵; d_{ci} 表示工作任务 i 的时间可移性, $d_{ci} = 0$ 表示该工作任务为时间不可移任务, $d_{ci} = 1$ 表示该工作任务为时间可移任务。

各个服务器作为算力节点的算力供给来源,需要考虑其可用存储容量和最大计算算力用以与工作任务需求进行匹配,每台服务器可描述为:

$$S_j = [S_{sto,j}, S_{cal,j}, P_{Sj}^{full}, P_{Sj}^{idle}], j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: S_j 表示第 j 台服务器; $S_{sto,j}$ 表示服务器 j 的最大可用存储容量,单位为个存储单元; $S_{cal,j}$ 表示服务器 j 满载运行时的最大计算算力,单位为个存储单元; P_{Sj}^{full} 表示服务器 j 满载运行时消耗的电功率,单位为MW; P_{Sj}^{idle} 表示服务器 j 待机时消耗的电功率,单位为MW。

算力节点的能耗主要由IT设备决定,而IT设备主要为各类服务器。服务器的负载状态是其电能消耗的主要决定因素。处于重载状态的服务器会散发

更多的热量,算力节点内的制冷设备能耗增大,使得整个算力节点的能耗增大。整个算力节点于 t 时刻的计算算力消耗情况可以用以下矩阵表示:

$$C^t = \begin{bmatrix} C_{11}^t & C_{12}^t & \dots & C_{1j}^t & \dots & C_{1n}^t \\ C_{21}^t & C_{22}^t & \dots & C_{2j}^t & \dots & C_{2n}^t \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{i1}^t & C_{i2}^t & \dots & C_{ij}^t & \dots & C_{in}^t \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ C_{m1}^t & C_{m2}^t & \dots & C_{mj}^t & \dots & C_{mn}^t \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: C^t 表示算力节点于 t 时刻的计算算力消耗矩阵; C_{ij}^t 表示 t 时刻在服务器 j 上处理的工作任务 i 占用的实际消耗计算算力,单位为个算力单元。引入服务器的负载状态矩阵来描述 t 时刻各台服务器的负载状态:

$$u^t = [u_1^t \ u_2^t \ \dots \ u_j^t \ \dots \ u_n^t]^T, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$u_j^t = \frac{\sum_{i=1}^m C_{ij}^t}{S_{cal,j}} \quad (6)$$

式中: u^t 表示服务器负载状态矩阵; u_j^t 表示 t 时刻服务器 j 的负载状态。本文考虑通用型算力,在计算量较大时服务器通常运行在较低的基础频率下,服务器 j 的运行功耗可简化为(推导过程见附录B):

$$P_{Sj}^t = (P_{Sj}^{full} - P_{Sj}^{idle}) \times [2u_{avg} - u_{avg}^\tau + (2 - \tau u_{avg}^\tau)(u_j^t - u_{avg})] \quad (7)$$

式中: P_{Sj}^t 表示服务器 j 于 t 时刻消耗的电功率,单位为MW; u_{avg} 表示服务器的平均利用率,通常为0.3~0.6^[36]; τ 表示经验指数,根据文献[37]所述 $\tau = 1.4$ 。

服务器的使用成本主要考虑影响工作任务优化分配的因素,主要包括变动成本和固定成本两部分。其中,变动成本主要为能耗成本,该部分成本由算力节点用电量及其所连电力节点的用户侧统一结算点电价决定。由于服务器性能配置的不同,其固定成本也不同,可将该部分固定成本折算到服务器设备的全生命周期内进行计算。因此,调控周期内服务器 j 的使用成本具体可表示为:

$$F_j = \overbrace{\sum_{t \in \Delta_{all}} \sum_{i=1}^m F_{ij}^{fix,t} \times \Delta t^S}^{\text{折算的固定成本}} + \overbrace{\sum_{t \in \Delta_{all}} F_j^{cha,t} \times \Delta t^S}^{\text{变动成本}} = \sum_{t \in \Delta_{all}} \sum_{i=1}^m f_j(R_{sto,i}, R_{cal,i}) \times \Delta t^S + \sum_{t \in \Delta_{all}} F_{e,use}^t \times P_{Sj}^t \times \Delta t^S = \sum_{t \in \Delta_{all}} \sum_{i=1}^m (\alpha_j R_{sto,i} + \beta_j C_{ij}^t) \times \Delta t^S + \sum_{t \in \Delta_{all}} F_{e,use}^t \times P_{Sj}^t \times \Delta t^S \quad (8)$$

式中: F_j 表示整个调控周期内服务器 j 的总使用成本, 单位为欧元; Δt_{all} 表示算电协同的调控周期集合; $F_{ij}^{\text{fix},t}$ 表示当用服务器 j 处理工作任务 i 时, t 时刻服务器 j 单位使用时间的固定成本, 单位为欧元/s; Δt^s 表示算力节点的最小调控时间间隔, $\Delta t^s=1$ s; $F_j^{\text{cha},t}$ 表示 t 时刻服务器 j 单位使用时间的变动成本, 单位为欧元/s; $f_j(\cdot)$ 表示工作任务 i 所需的存储算力、在服务器上实际消耗计算算力与服务器 j 单位使用时间的固定成本之间的映射函数; $F_{e,\text{use}}^t$ 表示该算力节点所属的电力节点于 t 时刻的用户侧统一结算点电价, 单位为欧元/MWh; α_j 和 β_j 分别表示在单位时间下服务器 j 提供单位存储算力和单位计算算力的固定成本, 单位为欧元/(s·个单元)。

为保证服务器的持续供能往往在算力节点内配有储能设备(energy storage system, ESS)作为算力节点的长时间运行性后备电源。同时, 储能设备还可辅助算力中心调节功率曲线。假设算力中心内有 v 台储能设备 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_v\}$, 可以描述为:

$$E_h = [S_h, \overline{P_{c,h}}, \overline{P_{d,h}}, \eta_{c,h}, \eta_{d,h}, \overline{E_{\text{soc},h}}, \underline{E_{\text{soc},h}}],$$

$$h = 1, 2, \dots, v \quad (9)$$

式中: E_h 表示第 h 储能设备参数; S_h 表示储能设备 h 的最大可用容量, 单位为 MWh; $\overline{P_{c,h}}, \overline{P_{d,h}}$ 分别表示储能设备 h 的最大充电、放电功率, 单位为 MW; $\eta_{c,h}, \eta_{d,h}$ 分别表示储能设备 h 的充电、放电效率; $\overline{E_{\text{soc},h}}, \underline{E_{\text{soc},h}}$ 分别表示储能设备 h 的最大、最小荷电状态系数; v 为储能设备总数。

考虑算力节点内的 IT 设备、制冷设备、变电设备以及照明设备的能耗情况, 采用数据中心能源利用效率(power usage effectiveness, PUE)系数^[38]表示算力节点 t 时刻的消耗总电功率:

$$P_{c,\text{all}}^t = \theta \times \sum_{j=1}^n P_{s_j}^t + \sum_{h=1}^v (P_{c,h}^t - P_{d,h}^t) \quad (10)$$

式中: $P_{c,\text{all}}^t$ 表示算力节点 t 时刻的消耗总电功率, 单位为 MW; θ 表示数据中心能源效率的 PUE 评价指标系数^[38], 一般为 1.1~1.4^[39], 本文算例设定为 1.4; $P_{c,h}^t$ 和 $P_{d,h}^t$ 分别表示 t 时刻储能设备 h 的实际充电、放电功率, 单位为 MW。

2.2 电力节点模型

一个电力节点由电能供应侧和需求侧两大部分构成。电能供应侧受电力调度中心统一管辖, 主要包括燃煤机组、燃气机组、水电机组、核电机组以及以光伏和风电为代表的新能源发电机组。每个电力节点均与主网之间有功率联络线相连, 可与主网进行电能交换。电能需求侧受电力负荷管理中心统一

管理, 内含多种类型多种功率级别的用电设备, 按照负荷特性可以划分为固定负荷、可平移负荷、可削减负荷。电力调度中心于运行日前安排每个电力节点内各类发电机组的出力计划曲线, 并在实时运行时根据电网实时运行情况调整机组出力情况并计算出用户侧统一结算点电价。电力负荷管理中心接收电网的调节需求以及电价信息, 需要根据节点内的实际用电需求以及调节成本合理优化调度可调节资源。

假设一个电力节点包括 p 台机组 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ 和 q 个负荷资源 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_q\}$ 。每台发电机组 G_l 可以描述为:

$$G_l = [P_{G_l}^{\text{pre}}], l = 1, 2, \dots, p \quad (11)$$

式中: G_l 表示发电机组参数; l 表示发电机组编号; $P_{G_l}^{\text{pre}}$ 表示由电力调度中心确认的机组 l 出力, 单位为 MW, 即向电力节点注入的有功功率(注入为正, 输出为负); p 表示发电机组总数。每个负荷资源 L_r 可以描述为:

$$L_r = [P_{L_r}^{\text{pre}}, \underline{P}_{L_r}^t, \overline{P}_{L_r}^t, \overline{\Delta P}_{L_r}^t], r = 1, 2, \dots, q \quad (12)$$

式中: L_r 表示负荷资源参数; r 表示负荷资源编号; $P_{L_r}^{\text{pre}}$ 表示负荷资源 r 预计需要消耗的电功率, 单位为 MW; $\underline{P}_{L_r}^t, \overline{P}_{L_r}^t$ 分别表示负荷资源 r 最小和最大消耗功率; $\overline{\Delta P}_{L_r}^t$ 表示负荷资源 r 的最大调节功率, 单位为 MW; q 表示负荷资源总数。为了描述负荷资源的调节特性, 引入负荷调节特性矩阵 D_L :

$$D_L = [d_{L1} \quad d_{L2} \quad \dots \quad d_{Lr} \quad \dots \quad d_{Lq}]^T, r = 1, 2, \dots, q \quad (13)$$

式中: D_L 表示负荷调节特性矩阵; d_{Lr} 表示负荷资源 r 的调节特性。 $d_{Lr} = 0$ 表示负荷资源 r 为固定负荷, 不可调节且必须满足; $d_{Lr} = 1$ 表示负荷资源 r 为可平移负荷; $d_{Lr} = -1$ 表示负荷资源 r 为可削减负荷。可平移负荷和可削减负荷均为可灵活调节负荷资源, 前者为可以通过价格导向改变设备运行时间的负荷, 只需要在既定的时间周期内完成设备的作业即可; 后者为可以于必要时直接切断的负荷。 t 时刻负荷资源的运行状态用负荷资源状态矩阵 $Z_{L_r}^t$ 来描述:

$$Z_{L_r}^t = [z_{L_r1}^t \quad z_{L_r2}^t \quad \dots \quad z_{L_r}^t \quad \dots \quad z_{L_rq}^t]^T, r = 1, 2, \dots, q \quad (14)$$

式中: $Z_{L_r}^t$ 表示负荷资源 r 状态矩阵; $z_{L_r}^t$ 表示 t 时刻负荷资源 r 的运行状态。 $z_{L_r}^t = 1$ 表示 t 时刻负荷资源 r 正在运行消耗电能; $z_{L_r}^t = 0$ 表示 t 时刻负荷资源 r 停止运行不消耗电能。

3 算力电力节点双向协同优化调度策略

电力节点作为算力节点的电能供应源, 电价信

号的波动将直接影响算力节点内设备的运行变动成本;同时,算力节点作为电力节点下一个重要且灵活的可调节负荷资源,电力节点内的电能调度情况也会受到算力设备的运行状态的影响。本节通过构建算力电力节点双层双向协同优化调度模型,采用上层电力节点优化与下层算力节点优化迭代交互求解的方式,得到算力电力节点双向协同优化调度策略,充分利用算力电力可调节资源,实现电力节点和算力节点的双向协同优化。

3.1 上层电力节点优化

在上层电力节点的优化中,需将算力节点视为一类特殊的可平移负荷考虑。上层电力节点需要基于日前计划出力曲线,根据电力调度中心的调控需求以及平衡自身内部的新能源出力波动的需求,安排电力节点内各个可调节单元(包括算力节点)的最优调节量以实现电力节点运行成本最小的优化目标。

3.1.1 上层目标函数

为寻求电力节点的经济稳定运行,负荷管理中心需要考虑该节点下多类负荷资源的调节补偿成本以及向主网的购电成本以合理优化可调节负荷资源,电力节点日内运行成本最小的优化目标具体表示如式(15)–(16):

$$\begin{aligned} \min F_{NE} = & \overbrace{\sum_{t \in \Delta t_{all}} F_{e,use}^t \times P_{grid}^t \times \Delta t^E}^{\text{购电成本}} - \\ & \overbrace{\sum_{r=1}^q \sum_{t \in \Delta t_{all}} F_r^{com} \times \Delta P_{Lr}^t \times \Delta t^E}^{\text{调节补偿成本}} = \\ & \sum_{t \in \Delta t_{all}} F_{e,use}^t \times P_{grid}^t \times \Delta t^E - \\ & \sum_{r=1}^q \sum_{t \in \Delta t_{all}} f_r \left(\frac{\Delta P_{Lr}^t}{P_{Lr}} \right) \times \Delta P_{Lr}^t \times \Delta t^E \quad (15) \\ & \Delta P_{Lr}^t = |P_{Lr}^t - P_{Lr}^{t,pre}| \quad (16) \end{aligned}$$

式中: F_{NE} 表示电力节点的运行成本,单位为欧元; P_{grid}^t 表示该电力节点于 t 时刻向主网购买(正为购入,负为售出)的电功率,单位为MW; Δt^E 表示电力节点的最小调控时间间隔, $\Delta t^E=15 \text{ min}$; F_r^{com} 表示负荷资源 r 单位调节电能的调节成本补偿价格,单位为欧元/MWh; ΔP_{Lr}^t 表示 t 时刻负荷资源 r 的调节功率,单位为MW; $f_r(\cdot)$ 表示负荷资源 r 调节成本补偿价格与调节深度之间的分段映射函数,调节深度越大补偿价格越高; P_{Lr}^t 为 t 时刻负荷资源 r 实际运行功率,单位为MW; $P_{Lr}^{t,pre}$ 表示 t 时刻负荷资源 r 的原计划用电功率,单位为MW。

3.1.2 上层约束条件

电力节点的优化问题需要考虑节点内的功率平衡(式(17))、调节功率上限约束(式(18))、可调节资

源的调节特性约束(式(20)–(21)),具体如下:

$$P_{grid}^t = \frac{\sum_{l=1}^q P_{Lr}^t + P_{C,all}^t}{1 - \sigma} - \sum_{l=1}^p P_{Gl}^{pre} \quad (17)$$

$$\Delta P_{Lr}^t \leq \overline{\Delta P_{Lr}}, \forall r \quad (18)$$

$$P_{Lr}^t \leq P_{Lr} \leq \overline{P_{Lr}}, \forall r \quad (19)$$

$$\sum_{t \in \Delta t_{all}} P_{Lr}^t \times \Delta t^E = \sum_{t \in \Delta t_{all}} P_{Lr}^{t,pre} \times \Delta t^E, \forall r \in \{r: d_{Lr} = 1\} \quad (20)$$

$$P_{Lr}^t = P_{Lr}^{t,pre}, \forall t, \forall r \in \{r: d_{Lr} = 0\} \quad (21)$$

式中: σ 表示网损系数,本文算例设定 $\sigma = 0.1$ 。

3.1.3 上层决策变量

求解上层电力节点优化问题得到各类可调节负荷资源以及数据中心的最优调节量。将数据中心的调节量信号发送至算力编排中心,进入下层算力节点的优化。

3.2 下层算力节点优化

当算力节点收到上层电力节点优化得到的调节量时,算力节点通过调节工作任务的编排以及储能设备的充放电计划以满足上层的调节需求。

3.2.1 下层目标函数

下层算力节点优化需要考虑算力的特性,先将优先级高的工作任务以及不可迁移的工作任务与服务器的资源状况进行匹配,优先编排该类工作任务以满足算力的服务质量(quality of service, QoS)需求。在此基础上优化编排可迁移的工作任务,并用储能设备辅助调节算力节点的功率曲线。算力节点相较电力节点更为灵活,算力工作任务的调度可在秒级时间尺度内实现,服务器的负载状态和功耗也会在秒级时间尺度内发生变化,因此对于算力节点的运行成本需要在更精细的时间尺度上进行计算($\Delta t^S=1 \text{ s}$)。在下层算力节点的优化中,考虑算力节点运行成本的最小化,目标函数如式(22)–(23):

$$\begin{aligned} \min F_{NC} = & \sum_{t \in \Delta t_{all}} F_{e,use}^t \times P_{C,all}^t \times \Delta t^S - \\ & \sum_{t \in \Delta t_{all}} F_C^{com} \times \Delta P_{C,all}^t \times \Delta t^E \quad (22) \end{aligned}$$

$$\Delta P_{C,all}^t = |P_{C,all}^t - P_{C,all}^{t,pre}| \quad (23)$$

式中: F_{NC} 表示算力节点的运行成本,单位为欧元; F_C^{com} 表示算力节点单位电能的调节成本补偿价格,单位为欧元/MWh; $\Delta P_{C,all}^t$ 表示算力节点的功率调节量,单位为MW; $P_{C,all}^{t,pre}$ 为 t 时刻算力节点的原计划用电功率,单位为MW。

3.2.2 下层约束条件

算力节点的整体电功率调节量约束(式(24))、可移算力运行约束(式(25))、不可移算力运行约束(式(26))、高优先级算力约束(式(27)),以及算力节

点下储能设备运行的荷电状态约束^[40](式(28)~(32)),具体如下:

$$\sum_{\Delta t^E \in \Delta t^E} \Delta P_{C,all}^t \times \Delta t^S = \Delta P_{C,all}^{t,com} \times \Delta t^E, \forall \Delta t^E \in \Delta t_{all} \quad (24)$$

$$\sum_{t \in \Delta t_{ij}} \sum_{j \in S} C_{ij}^t \times \Delta t^S = R_{cal,i} \times R_{ocu,i}, i = 1, 2, \dots, m \quad (25)$$

$$C_{ij}^t = C_{ij}^{t,pre}, \forall t, \forall j, \forall i \in \{i: d_{Ci} = 0\} \quad (26)$$

$$C_{ij}^t = C_{ij}^{t,pre}, \forall t, \forall j, \forall i \in \{i: R_{pri,i} \neq 0\} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{c,h}^t \leq \overline{P}_{c,h} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{d,h}^t \leq \overline{P}_{d,h} \quad (29)$$

$$P_{c,h}^t P_{d,h}^t = 0 \quad (30)$$

$$W_h^t = W_h^{t-1} + (P_{c,h}^t \eta_{c,h} - \frac{P_{d,h}^t}{\eta_{d,h}}) \Delta t^E \quad (31)$$

$$S_h \times \underline{E}_{soc,h} \leq W_h^t \leq S_h \times \overline{E}_{soc,h} \quad (32)$$

式中: $\Delta P_{C,all}^{t,com}$ 表示 t 时刻上层电力节点优化求解所得算力节点的功率调节量,单位为 MW; $C_{ij}^{t,pre}$ 为优化前 t 时刻在服务器 j 上处理的工作任务 i 原计划消耗计算算力,单位为个算力单元; W_h^t 为 t 时刻储能设备 h 的蓄电量,单位为 MWh。

3.2.3 下层决策变量

求解下层算力节点优化问题得到算力节点内的工作任务编排曲线以及储能设备的充放电曲线。

3.3 策略求解

根据 3.1 节和 3.2 节中构建的上层电力节点优化模型和下层算力节点优化模型,按下述流程进行求解(相关算法选择依据、参数设定及求解步骤见附录 C)。

1) 输入日前发电计划曲线、各类可调节资源的调节补偿价格分段曲线。

2) 输入次日待分配的工作任务信息,对算力节点内待分配的工作任务进行预编排,根据工作任务优先级按顺序匹配最优的处理服务器并编排各项工作任务处理计划,进而生成算力节点的预计用电曲线。

3) 考虑电力调度中心实时更新的发电曲线以及实时负荷用电曲线进入电力节点的优化,采用遗传算法优化得到各个可调节资源每 15 min 的调节量。

4) 根据步骤 3) 中所得到的算力节点的调节量进入算力节点优化,采用混合整数线性优化算法优化工作任务的编排曲线以及储能设备的充放电曲线。

4 算例分析

设定一个 110 kV 的电力节点及其下一个具有 50 MW 调节能力的算力节点作为算例场景,电力数据采用欧洲交易市场数据平台 ENTSO-E^[41]提供的西

班牙 2024 年 1 月 18 日的日前电价数据、各类电源及负荷实际功率的等比例缩放数据;算力工作任务需求以及服务器参数参考阿里巴巴公开运行数据^[42]进行设定。算例中所需参数设定^[43]见附录 A 中表 A1—A3 所示。在商用 2023a MATLAB 求解平台根据 3.3 节中的求解步骤,采用遗传算法求解上层电力节点优化问题,采用混合整数线性规划求解器求解下层算力节点优化问题。

4.1 电力节点优化结果分析

基于本文所构建模型,为验证模型的优化效果,规划以下电力节点运行场景:

场景一:不考虑任何调节资源的优化;

场景二:考虑可平移负荷和可削减负荷的优化;

场景三:考虑算力节点、可平移负荷和可削减负荷的优化;

场景四:于 00:00—09:00 时段加入延迟敏感的超大算力计算需求扰动,考虑算力节点、可平移负荷和可削减负荷的优化。

各场景的日内运行成本如表 1 所示。

表 1 四个电力节点运行场景日内运行成本优化结果
Table 1 The optimization results of daily operational costs for four electricity node operational scenarios

场景	日内运行成本/10 ⁵ 欧元
场景一	3.658 5
场景二	3.072 0
场景三	2.899 6
场景四	2.903 5

场景三的上层电力节点优化求解结果如图 1 所示。由图 1 可见,算力节点主要通过把运行功率调节至低电价时段,减少高电价时段向主网的购电量以降低电力节点运行成本。在本文的算例参数规模下,场景三中算力节点的参与优化使得电力节点的日内运行成本减小了 $1.723 5 \times 10^4$ 欧元。在电力节点整体可调节资源量约 2 300 MW 的设定下,50 MW 算力节点为电力节点运行降低的成本可占到 4.71%。场景四由于受到干扰,工作任务调节的灵活度下降,因此运行成本较场景三更高。

4.2 算力节点优化结果分析

服务器根据型号可分为五个服务器类群,优化后的场景三每个服务器类群上的工作任务分布如图 2 所示。

由图 2 可知,优化后的服务器功率曲线均有一定程度的调整,可移工作任务经过优化后均安排在了相较原本运行时段更低电价的时段区间,以调节服务器的利用率和运行功率,让服务器尽量在低电价

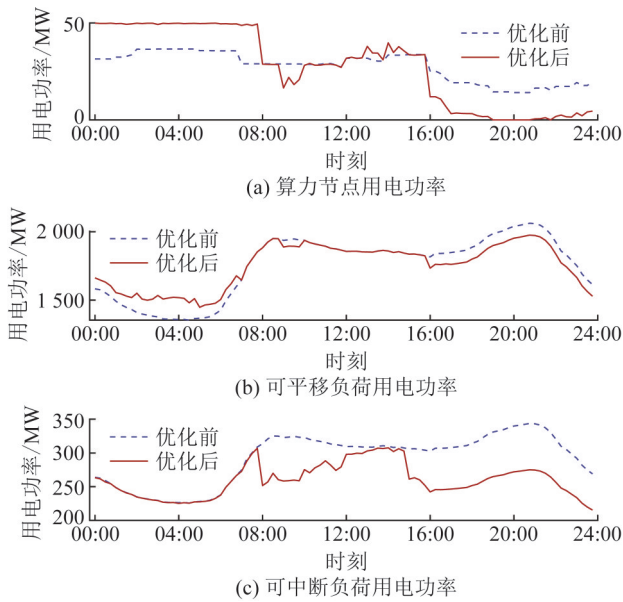


图 1 场景三的上层电力节点优化求解结果
Fig. 1 The optimization solution results for the upper-level electricity node in Scenario three

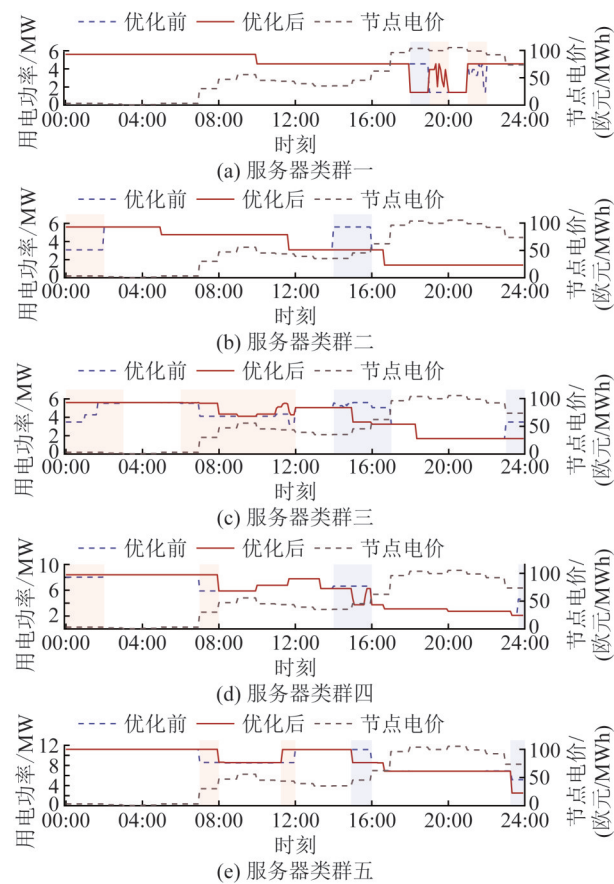


图 2 场景三各服务器类群上的工作任务分布
Fig. 2 The distribution of workload tasks across various server clusters in scenario three

时段高功率运行。

各服务器类群运行在场景三和场景四下相较场景一的成本下降幅度如表 2 所示。结合表 2 可知,场景三和场景四每类服务器运行成本均有不同程度的下降。

类群一和类群二性能较弱,服务器上的工作任务较少,稍有调动就会出现大段大幅度功率的平移,优化调节的经济效益较高。类群三性能中等,有较多零散的可移动工作任务,因此功率调节效果更加灵活。类群四和五由于性能较强,分配了较多计算量大、内存需求高的固定工作任务,因此服务器四和五的功率调节量和经济效益相较不明显。经计算,整个算力节点的日内运行成本降低 1 092.5 欧元(约 0.70%)。

表 2 各服务器类群运行在场景三和场景四下相较场景一的成本下降幅度

Table 2 The cost reduction of each server cluster running in scenario three and four compared to scenario one %

服务器类群	场景三降低幅度	场景四降低幅度
一	1.66	1.66
二	12.05	12.05
三	2.38	2.70
四	0.37	0.64
五	0.21	0.15

以服务器类群四为例进行具体分析,场景三下服务器类群四上的可移工作任务优化结果如图 3 所示。由图 3 可见,场景三中服务器类群四上的可移工作任务为工作任务 16 和 11。由于节点电价较低的夜间时段服务器四仍有空闲算力,因此可以将部分原本于 14:00—16:00 的工作任务 16 调整到 00:00—02:00 进行处理;同理,将部分于 15:00—16:00 以及 23:30 之后的工作任务 11 调整到 07:00—08:00 时段进行处理。

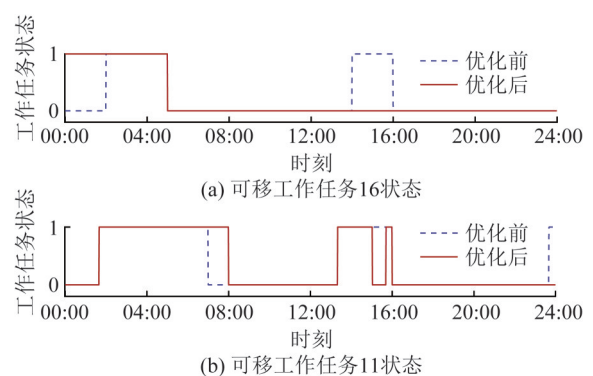


图 3 场景三下服务器类群四上的可移工作任务优化结果
Fig. 3 Optimization results of mobile tasks on server cluster four in scenario three

场景四下服务器类群四上的可移工作任务优化结果如图 4 所示。由图 4 可见,场景四中服务器类群四上新增了工作任务 12、13 和 49 参与调节,因此其调节成本下降程度较场景三中更多。对比场景三和场景四,由于在 00:00—09:00 时段有延迟敏感的超

大算力计算需求影响,高性能的服务器类群五被紧急占用,可调节空间显著减小,其调节成本下降程度较场景三中明显减小。考虑被影响的工作任务的算力服务需求,原本在服务器类群五上的工作任务被转移分配至服务器类群三和四上,服务器之间协同互补共同满足计算需求并成功功率调节任务。

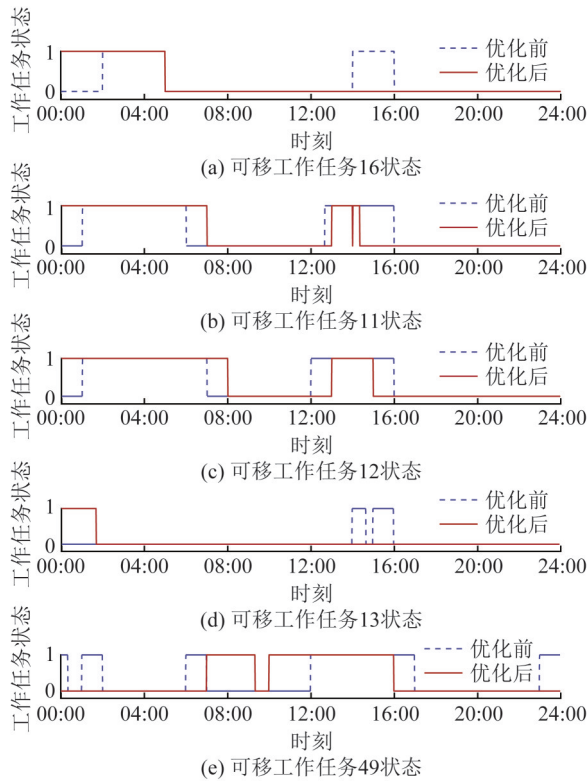


图4 场景四下服务器类群四上的可移工作任务优化结果
Fig. 4 Optimization results of movable work tasks on server cluster 4 in scenario four

场景三下各服务器类群的利用率优化结果如图5所示,场景四下各服务器类群的利用率优化结果如图6所示。整体而言,由图5和图6可知,场景三和场景四下的五类服务器在电价较低的时段基本可以实现满功率运行,显著提高了低电价时段服务器的利用率,以此实现降低用能成本的目标。对比图5和图6,由于场景四00:00—09:00时段服务器类群五被占用,服务器类群四承接了大部分被影响的工作任务,利用率显著增大且整体运行时间显著增长。

此外,由于服务器能耗在工作任务处理开始时瞬间上升,处理完成时又会瞬间下降,工作任务的变动会带来服务器能耗的大幅度上升或降低,因此需要通过储能来修正整个算力节点的功率曲线以满足调度需求。

场景三中算力节点内部服务器及储能优化后的运行功率如图7所示。由图7可见,场景三下的算力节点内储能设备于高电价时段为服务器提供大量电

能,且荷电状态始终保持0.4以上,既能留有充足的电能为算力节点提供备用保障,又能配合算力节点内的其他高能耗设备调节算力节点的功率曲线。

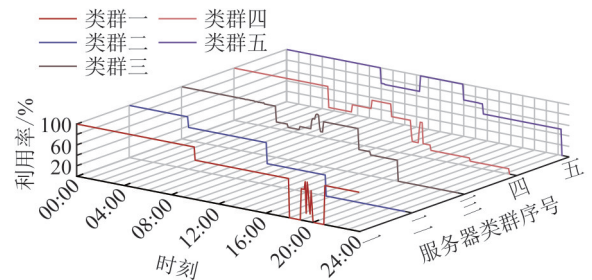


图5 场景三下各服务器类群的利用率优化结果
Fig. 5 Optimization results of utilization rates for each server cluster in scenario three

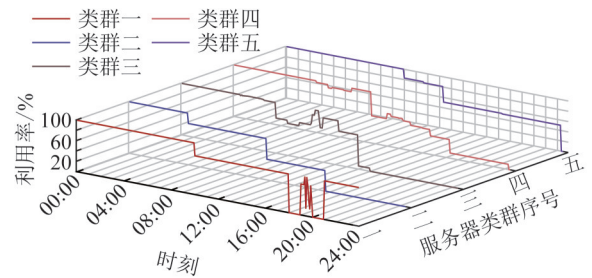
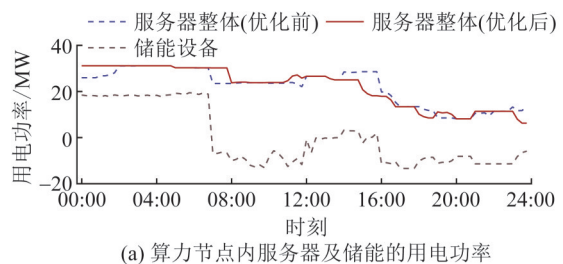
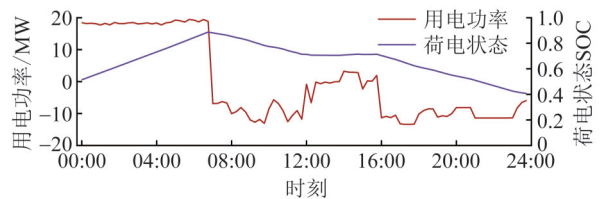


图6 场景四下各服务器类群的利用率优化结果
Fig. 6 Optimization results of utilization rates for each server cluster in scenario four



(a) 算力节点内服务器及储能的用电功率



(b) 储能设备功率及状态

图7 场景三中算力节点内部服务器及储能优化后的运行功率

Fig. 7 The optimized operating power of the internal servers and energy storage within the computing node in scenario three

5 结论

本文考虑综合能源系统中的算力电力节点,基于算力电力节点双向协同优化架构,针对算电资源

特性构建算力电力节点可调节资源模型,经优化得到算力电力双向协同优化调度策略。

1)本文建立了算力电力节点可调节资源模型,量化表征实时可调节的算电资源并将二者的优化协同考虑,经算例验证了本文构建模型和算力电力可调节资源协同优化策略的可行性和有效性,以及特殊场景下的适应性。

2)通过本文算例验证,算力和电力的资源协同优化有利于寻求算力节点运行和电力节点运行的最优经济效益。通过双向协同优化可在算电资源价格驱动向下充分利用算电可调节资源的调节特性,寻找经济性最高的算电资源调节路径以提升算力节点运行的稳定性并降低其调节成本,从内部为上层综合能源系统的经济运行优化提供了新的可行方式。

但本文仍存在以下不足之处:现今算力资源的实时计量体系较为缺失,有待探索与实时计量体系匹配且更精确的算力服务成本计算模型;此外,本文并未考虑算力的动态行为以及算力资源在多个节点之间的转移性质。下一步将沿此方向丰富算力实时量化模型表征其稳态和暂态特性,探索更深层次的算力-电力协同互动作用方式。

6 参考文献

- [1] 工业和信息化部关于印发“十四五”大数据产业发展规划的通知[EB/OL]. (2021-11-15) [2024-03-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/30/content_5655089.htm.
- [2] 关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见[EB/OL]. (2020-12-23) [2024-03-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/28/content_5574288.htm.
- [3] 李梦宇,王健,田野. 碳达峰碳中和目标下中国经济产业发展研究[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(6): 629-639.
LI Mengyu, WANG Jian, TIAN Ye. Research on the development of China's economic industry under the goal of carbon peak and carbon neutrality [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(6): 629-639.
- [4] 郑敏嘉,吴伟杰,李逸欣,等. 广东电力碳达峰路径研究[J]. 广东电力, 2023, 36(1): 29-34.
ZHENG Minjia, WU Weijie, LI Yixin, et al. Research on carbon emission peak path for power industry in Guangdong[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(1): 29-34.
- [5] 黄永林. 我国数字经济发展的成效与未来方向[J]. 人民论坛, 2022 (23): 79-83.
HUANG Yonglin. Achievements and future direction of China's digital economy development [J]. People's Tribune, 2022 (23): 79-83.
- [6] 周瑜,张伟乐,段婉婷. “东数西算”背景下数据中心碳减排效益分析[J]. 大数据, 2023, 9(5): 48-60.
ZHOU Yu, ZHANG Weile, DUAN Wanting. Data center carbon reduction analysis in the context of “Channel Computing Resources from the East to the West” [J]. Big Data Research, 2023, 9(5): 48-60.
- [7] MASANET E, SHEHABI A, LEI N A, et al. Recalibrating global data center energy-use estimates [J]. Science, 2020, 367(6481): 984-986.
- [8] 江训谱,吕施霖,王健,等. 考虑阶梯碳交易和最优建设时序的园区综合能源系统规划[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 11-19.
JIANG Xunpu, LV Shilin, WANG Jian, et al. Park-level integrated energy system planning considering tiered carbon trading and optimal construction timing [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 11-19.
- [9] 邢家维,程艳,于芑,等. 基于合作博弈的多园区互联综合能源系统低碳经济调度[J]. 山东电力技术, 2024, 51(5): 19-29.
XING Jiawei, CHENG Yan, YU Peng, et al. Low-carbon economic scheduling of multiple interconnected park-level integrated energy systems based on cooperative game [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(5): 19-29.
- [10] 昌力,曹荣章,庞腊成,等. 低碳背景下考虑用户侧碳责任的电力系统源荷协调优化调度研究[J]. 供用电, 2024, 41(5): 46-55.
CHANG Li, CAO Rongzhang, PANG Lacheng, et al. Research on optimal dispatching of power system source load coordination considering customer side carbon responsibility under low carbon background [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(5): 46-55.
- [11] 沈玉明,斯辉,马浩天,等. 考虑数据中心和分布式能源接入的配电网双层规划方法[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 116-125.
SHEN Yuming, SI Hui, MA Haotian, et al. A bilevel programming model for distribution networks considering data center and distributed energy access [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 116-125.
- [12] 张益飞,高赐威,严兴煜. 面向电价型需求响应的数据中心能耗多目标联合优化策略[J]. 供用电, 2024, 41(12): 47-53.
ZHANG Yifei, GAO Ciwei, YAN Xingyu. Multi-objective joint optimization strategy for data center energy consumption based on price-driven demand response [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(12): 47-53.
- [13] 石勇,寇纲,李彪. “东数西算”战略与问题的分析研究[J]. 大数据, 2023, 9(5): 3-8.
SHI Yong, KOU Gang, LI Biao. Analysis and research on the strategy and problems of “Channel Computing Resources from the East to the West” [J]. Big Data Research, 2023, 9(5): 3-8.
- [14] 李俊杰,姬浩浩. “东数西算”驱动西部地区经济增长的内在机理与对策[J]. 中州学刊, 2022(9): 23-30.
LI Junjie, JI Haohao. The inherent mechanism and countermeasures of the economic growth in the western regions driven by “east data and west calculation” [J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2022(9): 23-30.
- [15] LIU C B, LI K L, LI K Q. A game approach to multi-servers load balancing with load-dependent server availability consideration [J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2021, 9(1): 1-13.
- [16] 寇大治,韦建文,唐小勇. 应用感知的算力优化调度方法[J]. 数据与计算发展前沿, 2022, 4(5): 3-10.
KOU Dazhi, WEI Jianwen, TANG Xiaoyong. Application-aware method for optimized computing power scheduling [J]. Frontiers of Data & Computing, 2022, 4(5): 3-10.
- [17] DONG S, XIA Y J, KAMRUZZAMAN J. Quantum particle swarm optimization for task offloading in mobile edge computing [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(8): 9113-9122.
- [18] GAO J, KUANG Z F, GAO J, et al. Joint offloading scheduling

- and resource allocation in vehicular edge computing: a two layer solution[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(3): 3999-4009.
- [19] MUNIR A, HE T, RAGHAVENDRA R, et al. Network scheduling and compute resource aware task placement in datacenters[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28(6): 2435-2448.
- [20] ZHANG H K, QUAN W, CHAO H C, et al. Smart identifier network: a collaborative architecture for the future Internet [J]. *IEEE Network*, 2016, 30(3): 46-51.
- [21] 王建冬, 于施洋, 窦悦. 东数西算: 我国数据跨域流通的总体框架和实施路径研究[J]. *电子政务*, 2020(3): 13-21.
WANG Jiandong, YU Shiyang, DOU Yue. East digital computing and west computing: research on the overall framework and implementation path of cross-domain data circulation in China[J]. *E-Government*, 2020(3): 13-21.
- [22] 童楠楠, 陈东, 李慧颖, 等. “东数西算”工程建设的现状、问题与对策[J]. *大数据*, 2023, 9(5): 9-19.
TONG Nannan, CHEN Dong, LI Huiying, et al. Research on the internal logic and solution of the “Channel Computing Resources from the East to the West” project[J]. *Big Data Research*, 2023, 9(5): 9-19.
- [23] 关于深入实施“东数西算”工程加快构建全国一体化算力网的实施意见[EB/OL]. (2023-12-25) [2024-03-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924596.htm.
- [24] 郭琨, 康雨馨, 卓训方. 京津冀国家算力枢纽节点赋能全球数字经济标杆城市建设[J]. *大数据*, 2023, 9(5): 134-139.
GUO Kun, KANG Yuxin, ZHUO Xunfang. Beijing-Tianjin-Hebei national integrated big-data center system empowers global digital economy benchmark city construction [J]. *Big Data Research*, 2023, 9(5): 134-139.
- [25] 杜洋, 蔡小芳, 李彪. “东数西算”粤港澳大湾区(广东)枢纽的国际化发展及保障机制[J]. *大数据*, 2023, 9(5): 78-89.
DU Yang, CAI Xiaofang, LI Biao. International development and safeguard mechanism of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (Guangdong) Hub of “Channel Computing Resources from the East to the West”[J]. *Big Data Research*, 2023, 9(5): 78-89.
- [26] 张自力, 解婷, 李文平. “东数西算”成渝枢纽战略分析和示范落地[J]. *大数据*, 2023, 9(5): 32-47.
ZHANG Zili, XIE Ting, LI Wenping. National computing hub built in Chengdu-Chongqing economic circle boosts China’s “Channel Computing Resources from the East to the West” project [J]. *Big Data Research*, 2023, 9(5): 32-47.
- [27] 邓伟, 邓周灰. “东数西算”背景下贵州省大数据产业发展现状、问题与对策[J]. *大数据*, 2023, 9(5): 90-99.
DENG Wei, DENG Zhouhui. Current status, challenges and strategies of the big data industry development in Guizhou Province under “Channel Computing Resources from the East to the West” [J]. *Big Data Research*, 2023, 9(5): 90-99.
- [28] 王华存, 刘伯霞, 丑一斐, 等. “东数西算”甘肃枢纽庆阳集群: 现状与前景[J]. *大数据*, 2023, 9(5): 111-133.
WANG Huacun, LIU Boxia, CHOU Yifei, et al. “Channel computing resources from the east to the west” of Qingyang cluster at Gansu hub: current status and prospects[J]. *Big Data Research*, 2023, 9(5): 111-133.
- [29] 石勇, 刘平, 冯锦源. “东数西算”宁夏节点数字经济产业发展研究[J]. *大数据*, 2023, 9(5): 100-110.
SHI Yong, LIU Ping, FENG Jinyuan. Research on the development of the digital economy industry in Ningxia hub node of “Channel Computing Resources from the East to the West” project [J]. *Big Data Research*, 2023, 9(5): 100-110.
- [30] 王继业, 周碧玉, 张法, 等. 数据中心能耗模型及能效算法综述[J]. *计算机研究与发展*, 2019, 56(8): 1587-1603.
WANG Jiye, ZHOU Biyu, ZHANG Fa, et al. Data center energy consumption models and energy efficient algorithms[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2019, 56(8): 1587-1603.
- [31] 丁肇豪, 曹雨洁, 张素芳, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(一): 数据中心能耗模型[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9): 3161-3177.
DING Zhaohao, CAO Yujie, ZHANG Sufang, et al. Coordinated operation for data center and power system in the context of energy internet (I): energy demand management model of data center[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(9): 3161-3177.
- [32] 曹雨洁, 丁肇豪, 王鹏, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(二): 机遇与挑战[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(10): 3512-3527.
CAO Yujie, DING Zhaohao, WANG Peng, et al. Coordinated operation for data center and power system in the context of energy internet (II): opportunities and challenges[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(10): 3512-3527.
- [33] 丁巧宜, 王梓耀, 潘振宁, 等. 面向电量-调频-容量市场的数据中心园区算力及电力资源规划[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(1): 59-66.
DING Qiaoyi, WANG Ziyao, PAN Zhenning, et al. Planning of computing power and electric power resources in data center parks for electricity, frequency regulation and capacity markets [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(1): 59-66.
- [34] 唐伟, 单葆国, 郑海峰, 等. 数据中心两阶段源荷协同优化调度研究[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(4): 49-58.
TANG Wei, SHAN Baoguo, ZHENG Haifeng, et al. Research on two-stage source-load coordinated optimal scheduling of data centers[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(4): 49-58.
- [35] 马雷鸣, 孙杰, 欧阳晔. 算力网络详解 卷1: 算网大脑[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023.
MA Leiming, SUN Jie, OUYANG Ye. Explanation of computing power network volume 1: computing brain [M] Beijing: Tsinghua University Press, 2023.
- [36] SHEHABI A, SMITH S, SARTOR D, et al. United States data center energy usage report [R/OL]. [2024-03-30]. <https://escholarship.org/content/qt84p772fc/qt84p772fc.pdf>.
- [37] QURESHI A, WEBER R, BALAKRISHNAN H, et al. Cutting the electric bill for internet-scale systems [C/OL]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2009 conference on data communication. Barcelona Spain: ACM, 2009: 123-134. [2024-04-23]. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1592568.1592584>.
- [38] AVELAR V, AZEVEDO D, FRENCH A, et al. PUE: a comprehensive examination of the metric[EB/OL]. [2024-03-30]. <http://nikom.in/Downloads/0a58778d-fc96-4482-8c46-13abe76b015c.pdf>.
- [39] 三部门关于加强绿色数据中心建设的指导意见[EB/OL]. [2024-04-03]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-02/14/content_5365516.htm.
- [40] GUO Z J, WEI W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Two-timescale dynamic energy and reserve dispatch with wind power and energy storage [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14

(1): 490-503.

[41] ENTSO-E Transparency Platform[EB/OL]. [2024-03-30]. <https://transparency.entsoe.eu/>.

[42] Github. Alibaba cluster trace program [CP/OL]. Alibaba, 2024 [2024-03-30]. <https://github.com/alibaba/clusterdata>.

[43] GEIDL M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems[D/OL]. Switzerland; ETH Zurich, 2007[2024-04-03]. <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/123494/eth-29506-02.pdf>.

收稿日期: 2024-04-12 修回日期: 2024-05-16

作者简介:

周钱雨凡(2001),女,硕士研究生,通信作者,研究方向为算力电力协同、信息物理融合的电网优化调度,E-mail:1085845569@qq.com;

杨苹(1967),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为可调节资源优化调度、可再生能源的发电控制、电能质量分析与监控管理,E-mail: eppyang@scut.edu.cn;

万思洋(2000),男,硕士研究生,研究方向为可调节资源优化调度、新能源功率预测,E-mail:534437824@qq.com;

崔嘉雁(2000),女,硕士研究生,研究方向为优化调度、新能源场站储能配置,E-mail:cuijiayan03@163.com;

李丰能(1999),男,硕士研究生,研究方向为可再生能源发电与并网控制技术,E-mail:1229971324@qq.com;

魏知初(2000),男,硕士研究生,研究方向为新能源功率预测,E-mail:574262735@qq.com。

(编辑 魏希辉)

附录 A

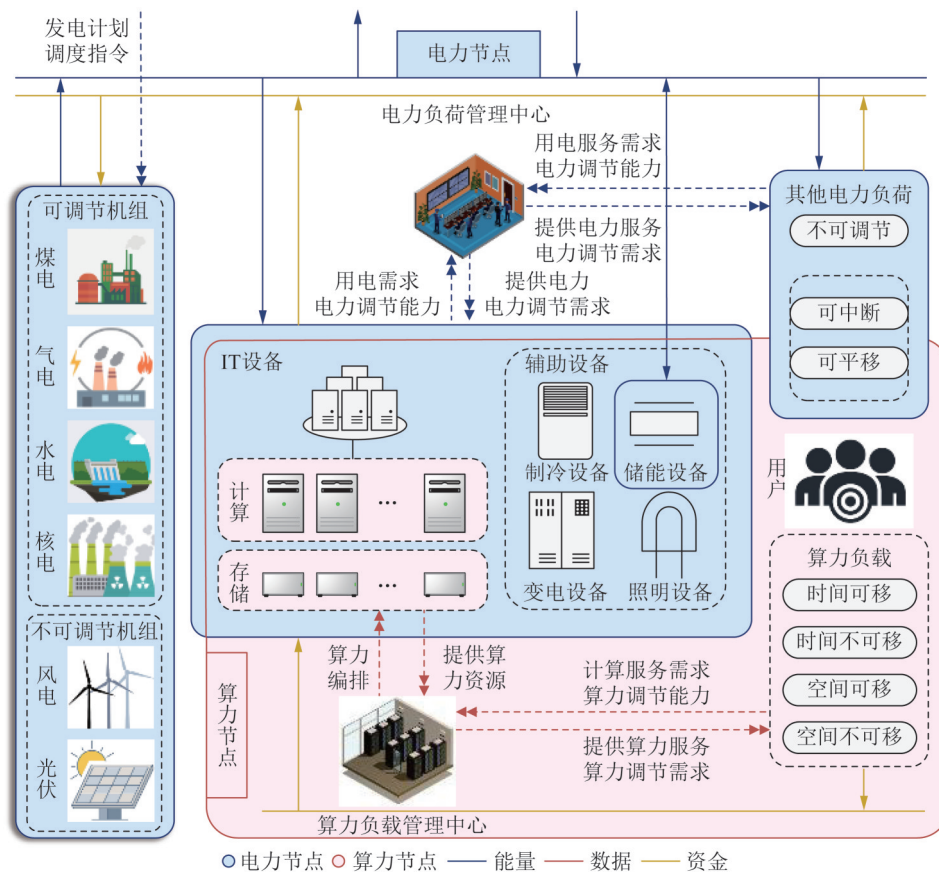


图 A1 算力电力节点可调节资源的双向协同调度架构

Fig. A1 The bidirectional coordinated scheduling architecture diagram of computing power and electrical nodes' adjustable resources

表 A1 各类负荷的参数设定

Table A1 Parameter setting for various loads

负荷	K_r /(欧元/MWh)	$P_{L,r}^t$ /MW	$\overline{P_{L,r}}$ /MW	$\Delta P_{L,r}$ /MW
可平移负荷	25	0	2 000	600
可削减负荷	45	0	原用电计划消耗功率	Inf
算力节点	10	0	50	15

表 A2 储能设备部分的参数设定

Table A2 Parameter setting of energy storage equipment

储能设备参数	设定值
储能最大可用容量/MWh	300
最大充电功率/MW	50
最大放电功率/MW	50
最大荷电状态	0.85
最小荷电状态	0.20
放电效率	0.9
充电效率	0.9

表 A3 服务器成本相关系数的参数设定

Table A3 Parameter setting of server cost correlation coefficient

服务器类群	α_j /(欧元/(s·unit))	β_j /(欧元/(s·unit))	$P_{S_j}^{\text{full}}$ /MW	$P_{S_j}^{\text{idle}}$ /MW	服务器类群	α_j /(欧元/(s·unit))	β_j /(欧元/(s·unit))	$P_{S_j}^{\text{full}}$ /MW	$P_{S_j}^{\text{idle}}$ /MW
一	0.2	0.1	6	1	四	0.6	0.2	10	1.5
二	0.3	0.1	6	1.1	五	0.7	0.2	12	1.8
三	0.5	0.2	6	1.2					

附录 B

对于通用型算力而言,算力计算量较大,服务器通常运行在较低的基础频率下,基于CPU的利用率能够为计算密集型算力精确地构建服务器能耗模型^[31],拟合公式如下:

$$P_{S_j}^t = (P_{S_j}^{\text{full}} - P_{S_j}^{\text{idle}})[2u_j^t - (u_j^t)^\tau] \quad (\text{B1})$$

将式(B1)在 $u_j^t = u_{\text{avg}}$ 处泰勒展开,并忽略拉格朗日余项可得($\xi \in [\min\{u_j^t, u_{\text{avg}}\}, \max\{u_j^t, u_{\text{avg}}\}]$):

$$P_{S_j}^t = (P_{S_j}^{\text{full}} - P_{S_j}^{\text{idle}})[2u_{\text{avg}} - u_{\text{avg}}^\tau + (2 - \tau u_{\text{avg}}^{\tau-1})(u_j^t - u_{\text{avg}})] - \frac{(P_{S_j}^{\text{full}} - P_{S_j}^{\text{idle}})}{2!} [\tau(\tau - 1)\xi^{\tau-2}](u_j^t - u_{\text{avg}})^2 \approx (P_{S_j}^{\text{full}} - P_{S_j}^{\text{idle}})[2u_{\text{avg}} - u_{\text{avg}}^\tau + (2 - \tau u_{\text{avg}}^{\tau-1})(u_j^t - u_{\text{avg}})] \quad (\text{B2})$$

针对各类可调节负荷,调节成本补偿价格与调

节深度之间的分段映射函数设定如下:

$$f_r\left(\frac{\Delta P_{L,r}^t}{P_{L,r}}, K_r\right) = \begin{cases} K_r & \frac{\Delta P_{L,r}^t}{P_{L,r}} < 0.3 \\ 3K_r & 0.3 \leq \frac{\Delta P_{L,r}^t}{P_{L,r}} \leq 0.7 \\ 5K_r & 0.7 < \frac{\Delta P_{L,r}^t}{P_{L,r}} \end{cases} \quad (\text{B3})$$

式中: $f_r(\cdot)$ 表示负荷资源 r 调节成本补偿价格与调节深度之间的分段映射函数,调节深度越大补偿价格越高; $\Delta P_{L,r}^t$ 表示 t 时刻负荷资源 r 的调节功率,单位为MW; $P_{L,r}^t$ 为 t 时刻负荷资源 r 实际运行功率,单位为MW; K_r 为负荷资源 r 的调节成本补偿的基础价格,参数设定见表A1。

附录 C

表 C1 遗传算法参数设定

Table C1 Genetic algorithm parameter setting

算法参数	设定值
CrossoverFraction	0.8
Generations	10 000
PopulationSize	100
MigrationFraction	0.2
FitnessLimit	-Inf
StallGenLimit	50

C1 算法设定

上层电力节点优化问题中存在分段线性函数约束,经整理后属于混合整数非线性优化问题,遗传算法对于该类含变量较多的混合整数非线性优化问题有很好的适应性且收敛相对较快(约5 000次迭代即可收敛)。本文所采用遗传算法的参数设定如表C1所示。

下层算力节点优化为混合整数线性优化问题,由于分支定界算法适用于带等式、不等式约束的混合整数线性优化问题,因此可直接调用商用MATLAB 2023a平台中的intlinprog求解器,采用分支定界算法松弛整数变量约束并求解该优化问题的精确解。

C2 数据集预处理

C2.1 电力数据

采用欧洲交易市场数据平台ENTSO-E提供的西班牙2024年1月18日的日前电价数据、各类电源出力曲线及各类负荷实际功率数据。在参考文献[34]的网址中有“Day-ahead Prices”一栏,点击进入“Day-ahead Prices”相关数据导航页,选中西班牙2024年1月18日即可导出电价数据;在参考文献[34]的网址中有“Actual Generation per Production Type”一栏,点击进入“Actual Generation per Production Type”相关数据导航页,选中西班牙2024年1月18日即可导出各类电源出力曲线;在参考文献[34]的网址中有“Total Load - Day Ahead / Actual”一栏,点击进入“Total Load - Day Ahead / Actual”相关数据导航页,选中西班牙2024年1月18日即可导出各类负荷实际功率数据。

将各类电源出力曲线和各类负荷实际功率数据

缩小到原来的10%,剔除数据集中的负数值并采用平均值(取前一时刻和后一时刻的实时数据平均值,若出现前一时刻/后一时刻实时数据缺失则继续前/后推一个时刻)填充法填补缺失值。可平移负荷、固定负荷、可削减负荷由所得负荷实际功率数据按照6:3:1的比例进行划分。同时,将处理后的各类电源出力曲线作为日前发电计划曲线,将处理后的各类负荷实际功率曲线加上算力节点的预计用电曲线作为实时负荷用电曲线,输入到上层电力节点优化的模型中。

C2.2 算力数据

参考阿里巴巴公开运行数据,选择v2023版的集群数据“集群-trace-gpu-v2023”。分析整合P100系列、G3系列、V100M32、T4航站楼、G2系列一共五类GPU计算节点服务器类群信息作为服务器类群信息,参考“openb_pod_list_default.csv”中工作任务信息作为待编排的工作任务信息,进入对算力节点的预编排。

根据工作任务优先级按顺序匹配最优的处理服务器并编排各项工作任务处理计划,从而生成算力节点的预计用电曲线以进行上层电力节点的优化。在电力节点优化完成后,将电力节点的优化结果、服务器类群信息以及工作任务信息输入到下层算力节点优化的模型中。