

面向数据中心集聚化场景的储能配置及双层调度优化

刘嘉丽^{1*}, 黑文斌², 赵磊², 赵启新², 金琨¹

¹内蒙古电力集团蒙电经济技术研究院有限责任公司, 呼和浩特 010091, 内蒙古, 中国

²内蒙古电力(集团)有限责任公司, 呼和浩特 010091, 内蒙古, 中国

摘要: 随着“东数西算”工程的推进, 数据中心大量布局新能源电源侧。为提升电网调度的灵活性并优化储能系统配置, 本文提出了一种面向数据中心集聚化场景的储能配置及双层调度优化方法。首先, 模型上层通过最大化储能投资运营商的收益来优化储能的容量和位置, 下层基于数据中心约束计算最优潮流得到节点边际电价, 并将其反馈给上层以更新储能配置决策。其次, 为了提高模型的收敛性, 本文提出二分嵌入迭代法以抑制振荡问题。最后, 对内蒙古地区 IEEE30 节点电力系统进行算例分析, 仿真结果表明本方法能有效提升电网运行效率、数据中心服务质量以及储能投资的经济性。

关键词: 储能; 数据中心; 节点边际电价

Energy Storage Configuration and Two-layer Scheduling Optimization for Data Center Agglomeration Scenarios

JiaLi Liu^{1*}, WenBin Hei², Lei Zhao², QiXin Zhao², Kun Jin¹

¹Inner Mongolia Electric Power Economics and Technology Research Institute, Hohhot 010091, Inner Mongolia, China

²Inner Mongolia Power Group, Hohhot 010091, Inner Mongolia, China

Abstract: With the advancement of the "East Data West Computing" Project, data centers are extensively deployed on the renewable energy power supply side. To enhance the flexibility of power grid dispatching and optimize the configuration of energy storage systems, this paper proposes an energy storage configuration and dual-layer scheduling optimization method for the agglomeration scenarios of data centers. Firstly, the upper layer of the model optimizes the capacity and location of energy storage by maximizing the revenue of the energy storage investment operator. The lower layer calculates the optimal power flow based on the constraints of the data center to obtain the nodal marginal price, and feeds it back to the upper layer to update the energy storage configuration decision. Secondly, to improve the convergence of the model, this paper proposes the binary embedding iterative method to suppress oscillation problems. Finally, a case study was conducted on the IEEE 30-node power system in Inner Mongolia. The simulation results show that this method can effectively enhance the operational efficiency of the power grid, the service quality of data centers, and the economic efficiency of energy storage investment.

Keywords: Energy storage; Data center; Locational marginal price

一、引言

算力作为数字经济时代的新质生产力,为大数据与人工智能的爆发式发展提供了底层支撑 [1]。随着“东数西算”工程深入推进,数据中心加速向新能源资源富集的西部枢纽节点集聚,与风电、光伏等波动性电源深度耦合。这虽然为新能源消纳提供了支撑场景,但也给电网调度灵活性带来了严峻挑战 [2]。数据中心作为高能耗负荷主体,对电力供应的稳定性、连续性提出严苛要求。储能系统凭借削峰填谷、应急备用、源荷匹配的核心能力,成为平衡数据中心算力需求与新能源出力波动、提升电网运行稳定性的关键纽带 [3]。

针对储能系统选址定容的问题,现有研究大多结合数据中心负载特性、可再生能源接入约束及电网安全需求,探索储能配置与经济性、可靠性、低碳性的平衡。赵石以天津地区数据中心为研究对象 [4],分析光伏、风力发电装机容量对蓄电池、蓄冷池配置效果的影响,明确储能设备能提升可再生能源利用率、降低碳排放时的可再生能源容量阈值;李一锦等提出一种计及需求响应的数据中心与光-储系统协同优化配置方法 [5],协调光伏装机容量、储能容量与数据中心运行策略,实现经济与环境效益平衡;马浩然等开展考虑数据中心和储能接入的主动配电网经济调度研究 [6],优化调度策略以降低运行成本。然而,这些研究仍存在明显局限,要么仅单一优化储能容量或位置,要么未将储能配置与电网最优潮流、数据中心负载时空转移特性深度耦合,导致储能配置难以精准适配电网节点边际成本的动态分布,未能平衡储能投资运营商收益、电网安全经济运行效率、数据中心服务质量等多目标,无法实现社会福利最大化。

电价作为引导能源资源优化配置的核心经济杠杆,其精准刻画与模型融入直接决定储能与数据中心协同系统的运行经济性与电网适配性。Cheng Y H 等基于碳流模型构建多能源系统的能源-碳整合价格 [7],采用双层模型协调输配两级系统运行,实现低碳目标;李为润等构建含数据中心的综合能源系统双层容量优化模型 [8],上层以系统成本最小为目标优化多能源设备容量,下层通过电价引导负荷平移优化;吴长元等在双层协同规划中引入分时电价 [9],通过下层优化反馈电价对网损降低与电压质量改善的影响;杨诗瑶等设计考虑需求响应的数据中心储能配置及调度三层优化模型 [10],区分价格型与激励型需求响应,将电价信号与储能调度、需量电费管控深度结合。但是,这些研究多采用静态分时电价或区域平均电价,未能形成电价随储能配置规划决策的优化而变化的闭环机制,难以适配数据中心高渗透场景的动态决策需求。

双层模型的求解效率与收敛稳定性直接决定储能配置方案的工程适用性,现有研究通过改进迭代法、启发式算法等提升求解性能。Kasra Shafiei 等采用遗传算法求解含可再生能源与电池储能系统的网络系统多目标优化问题 [11],以提升系统稳定性;王述祯等提出基于 i-C&CG 求解算法的数据中心与储能协同规划方法 [12],提升规划问题的求解效率;陈绪昌等采用 MDP-ADMM 算法优化数据中心储能系统运行 [13],平衡算力需求与储能调度;孙晓杰等提出基于多层粒子群算法的数据中心能耗优化调度策略 [14],通过分层搜索机制降低系统能耗。但是,这些算法虽在特定场景下能提升求解性能,但缺乏专用的振荡抑制机制,无法确保结果的收敛性。

基于以上问题,本文提出了一种面向数据中心集聚化场景的储能配置及双层调度优化方法。主要贡献有两个方面:

1)模型。本文提出了考虑电算协同最优储能规划的双层模型。上层为储能规划层,以储能投资运营商的收益最大化为目标函数求解电池储能系统的最优位置和容量。下层为电网运行层,基于得到的最优储能系统位置和容量,结合数据中心约束条件,求解电力系统运行最优潮流问题,进而得到节点边际电价(Locational Marginal Price, LMP),并以此为信号反馈给储能规划层,更新当下储能系统最优的安装地点及容量,以此方式循环迭代,

最终得到期望的电池储能系统规划方案。

2)算法。为了求解上述双层模型, 提出了一种二分嵌入迭代法, 通过迭代计算上下层问题以达到最优解。同时, 该方法可以有效解决迭代过程中的潜在振荡问题, 当迭代过程中观察到振荡时, 触发二分法更新上界和下界, 从而保证结果的收敛性。

二、含数据中心的储能与电网协同规划模型

(一) 储能模型

目标函数为最小化储能投资与运行成本, 式(2)代表储能系统投资成本, 式(3)代表储能系统运行成本。

$$\min F_1 = C_{BES}^{IN} + C_{BES}^{OP} \quad (1)$$

$$C_{BES}^{IN} = \sum_{y=1}^Y (1+\delta)^{1-y} \cdot \left(\sum_{i \in \Omega_i} \sum_b C_b \cdot X_b^{i,y} \right) \quad (2)$$

$$C_{BES}^{OP} = \sum_{y=1}^Y (1+\delta)^{(1-y)} \cdot \left[\sum_{d=1}^D N_d \cdot \sum_{t=1}^T \sum_b \left(LMP_b^{t,d,y} \cdot \left(P_{ch,b}^{t,d,y} - P_{dc,b}^{t,d,y} \right) \right) \right] \quad (3)$$

C_{BES}^{IN} 代表储能系统的投资成本, C_{BES}^{OP} 代表储能系统的运行成本, δ 代表年度贴现率, C_b 代表储能的投资成本, $X_b^{i,y}$ 为二元变量, 代表第 y 年是否在节点 i 处投资储能, $LMP_b^{t,d,y}$ 代表节点边际电价, $P_{ch,b}^{t,d,y}$ 代表储能充电功率, $P_{dc,b}^{t,d,y}$ 代表储能放电功率。 N_d 代表选取的典型日天数。

储能投资约束条件如下, 式(4), (5)代表每个节点只能存在一个储能系统。

$$\sum_{y=1}^Y \sum_b X_b^{i,y} \leq 1; \quad \forall i \in \Omega_i \quad (4)$$

$$Y_b^{i,y} - Y_b^{i,y-1} = X_b^{i,y}; \quad \forall i \in \Omega_i \quad (5)$$

$Y_b^{i,y}$ 代表第 y 年节点 i 处是否存在储能。

储能运行约束条件如下, 式(6), (7), (8)别代表充放电功率约束与电量约束。式(9)代表储能的初始状态和末状态需保持一致。式(10)代表储能系统时序约束。

$$0 \leq P_{ch,b,s}^{t,d,y} \leq Y_b^{i,y} \cdot P_b^{\max} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{dc,b,s}^{t,d,y} \leq Y_b^{i,y} \cdot P_b^{\max} \quad (7)$$

$$Y_b^{i,y} \cdot E_b^{\min} \leq E_{b,s}^{t,d,y} \leq Y_b^{i,y} \cdot E_b^{\max} \quad (8)$$

$$E_{b,s}^{1,t,y} = E_{b,s}^{T,d,y} = Y_b^{i,y} \cdot E_b^0 \quad (9)$$

$$E_{b,s}^{t,d,y} = E_{b,s}^{t-1,d,y} + \left(\eta_b^{ch} \cdot P_{ch,b,s}^{t,d,y} - P_{dc,b,s}^{t,d,y} / \eta_b^{dc} \right) \quad (10)$$

P_b^{\max} 为充放电功率上限, E_b^{\min} 、 E_b^{\max} 代表电量上下限, η_b^{ch} 、 η_b^{dc} 分别代表充放电效率。

(二) 含数据中心的电网模型

目标函数为最小化发电成本, 即:

$$\min F_2 = C_{gen}^{OP} \quad (11)$$

$$C_{gen}^{OP} = \sum_{y=1}^Y (1+\delta)^{(1-y)} \cdot \left[\sum_{d=1}^D N_d \cdot \sum_{t=1}^T \sum_g \left(\alpha_g \cdot \left(P_g^{t,d,y} \right)^2 + \beta_g \cdot P_g^{t,d,y} + \gamma_g \right) \right] \quad (12)$$

式中, C_{gen}^{OP} 代表发电成本, $P_g^{t,d,y}$ 代表发电厂发电功率, α_g 、 β_g 、 γ_g 代表发电厂成本系数,

1. 数据中心能耗特性建模

数据中心能耗主要包括 IT 设备能耗、供配电系统能耗、制冷系统能耗、照明及其他能耗。PUE 是评价数据中心能源效率的指标, 是数据中心消耗的所有能源与 IT 负载使用的能源之比。PUE 的基准是 2, 越接近 1 表明能耗水平越好。PUE 的值越小, 就说明数据中心的电大部分被服务器、网络设备、存储设备消耗而非被制冷设备、照明设备消耗。式(14)代表负载组成, 式(15)代表数据中心 IT 设备功耗, 式(16)代表服务器数量约束, 式(17)代表能处理的负载上限约束。

$$P_{c,t}^{IDC} = PUE_{c,t} \cdot P_{c,t}^{IT} \tag{13}$$

$$L_{c,t} = L_{c,t}^{dl} + L_{c,t}^{tran} + L_{c,t}^{base} \tag{14}$$

$$P_{c,t}^{IT} = m_{c,t} \cdot P_{c,t}^{idle} + (P_{c,t}^{peak} - P_{c,t}^{idle}) \cdot L_{c,t} / \tau_c \tag{15}$$

$$m_{c,t} \leq M_c \tag{16}$$

$$0 \leq L_{c,t} \leq M_c \cdot U^{\max} \cdot \tau_c \tag{17}$$

式中, $P_{c,t}^{IDC}$ 为 t 时刻 IDC 总能耗, $P_{c,t}^{IT}$ 为 t 时刻 IT 设备的能耗, U^{\max} 为单台服务器最大处理效率。 $L_{c,t}$ 为调度结束后的负载总量, $L_{c,t}^{dl}$ 为调度结束后的可延迟负载总量, $L_{c,t}^{tran}$ 为调度结束后的可转移负载总量, $L_{c,t}^{base}$ 为不可延迟转移的负载总量。 $m_{c,t}$ 为服务器开机数量, $P_{c,t}^{idle}$ 为服务器静态功耗, $P_{c,t}^{peak}$ 为服务器额定功耗, τ_c 为服务器服务效率。 M_c 为服务器总配备量, U^{\max} 为单台服务器最大处理效率。

2. 数据中心时空灵活性建模

在每个时隙中, 信息节点通过一条或多条通信链路将用户的每个请求接收并分配给 IDC。这些请求通常可以分为两类: 延迟敏感的交互式请求, 这些请求通常需要立即处理, 如数据流和市场交易; 以及允许延迟的批处理类型请求, 这些请求可以容忍较长的服务延迟, 如设备监控和数据挖掘任务。时序调度约束如下:

$$L_{c,t}^{dl} = L_{c,t}^{dl0} + \sum L_{c,t't}^{dl} - \sum L_{c,t't'}^{dl} \tag{18}$$

$L_{c,t}^{dl}$ 为调度结束后数据中心 c 在时刻 t 的可延迟负载总量, $L_{c,t}^{dl0}$ 为数据中心 c 在时刻 t 接收到的初始可延迟负载总量, $L_{c,t't}^{dl}$ 为数据中心 c 从时刻 t' 转移到时刻 t 的负载量, $L_{c,t't'}^{dl}$ 为数据中心 c 从时刻 t 转移到时刻 t' 的负载量。

在数据中心集群的协同运行中, 各站点间往往存在负载分布不均和资源利用率差异的情况。可以利用数据中心的空间转移特性提升整体能效并降低运营成本。允许将过载数据中心的计算任务动态迁移至资源空闲的站点, 通过时空维度上的负载转移实现资源优化配置。空间调度约束如下:

$$L_{c,t}^{tran} = L_{c,t}^{tran0} + \sum L_{c'c,t}^{tran} - \sum L_{cc',t}^{tran} \tag{19}$$

$L_{c,t}^{tran}$ 为调度结束后数据中心 c 在时刻 t 的可转移负载总量, $L_{c,t}^{tran0}$ 为数据中心 c 在时刻 t 接收到的初始可转移负载总量, $L_{c'c,t}^{tran}$ 为时刻 t 数据中心 c' 转移到数据中心 c 的负载量, $L_{cc',t}^{tran}$ 为时刻 t 数据中心 c 转移到数据中心 c' 的负载量。

假设 IDC 内服务器为同一类型, 使用 M/M/1 排队模型描述为:

$$T_{c,t}^Q = 1 / (\tau_c - L_{c,t} / m_{c,t}) \tag{20}$$

$$T_{c,t}^H = 1 / \tau_c \tag{21}$$

$$T_{c,t}^O + T_{c,t}^H \leq T^{Del} \quad (22)$$

$T_{c,t}^O$ 代表数据排队时间, $T_{c,t}^H$ 代表数据处理时间, T^{Del} 为数据可接受的总等待时间。

服务器最少开机数量约束如下:

$$m_{c,t} \geq \frac{L_{c,t}}{\tau_c \left(1 - \frac{1}{\tau_c \cdot T^{Del} - 1} \right)} \quad (23)$$

3. 电网最优潮流模型

采用 **distflow** 描述电网最优潮流模型, 式(24)、(25)分别代表有功功率和无功功率平衡, 式(26)代表电压降落约束, 式(27)、(28)、(29)、(30)代表有功功率、无功功率、电压、电流上下限约束, 式(31)为经过二阶锥松弛后的功率约束。

$$p_j = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij} - r_{ij} \cdot I_{ij}), \forall j \in N \quad (24)$$

$$q_j = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij} - x_{ij} \cdot I_{ij}), \forall j \in N \quad (25)$$

$$U_j = U_i - 2(r_{ij} \cdot P_{ij} + x_{ij} \cdot Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \cdot I_{ij}, \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (26)$$

$$p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^{\max}, \forall i \in N \quad (27)$$

$$q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}, \forall i \in N \quad (28)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \forall i \in N \quad (29)$$

$$I_{ij}^{\min} \leq I_{ij} \leq I_{ij}^{\max}, \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (30)$$

$$\left\| \begin{array}{l} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ I_{ij} - U_i \end{array} \right\|_2 \leq l_{ij} + U_i, \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (31)$$

P_{ij} 、 Q_{ij} 代表电力系统支路有功功率和无功功率, p_i 、 q_i 代表电力系统节点有功功率和无功功率, U_i 代表电压的平方, I_{ij} 代表电流的平方。

综合上述模型, 得功率平衡约束如下, 通过求解对偶变量 π 可得节点边际电价。

$$p_{i,t} + \sum_{\forall c \in \Omega^{DC}} P_{c,t}^{IDC} + \sum_{b \in \Omega^{BES}} P_{ch,b,t} = \sum_{g \in \Omega^{GEN}} P_{g,t} + \sum_{b \in \Omega^{BES}} P_{dc,b,t} : \pi \quad (32)$$

式中, $p_{i,t}$ 为电网潮流功率, $\sum_{\forall c \in \Omega^{DC}} P_{c,t}^{IDC}$ 为数据中心的耗电功率, $\sum_{b \in \Omega^{BES}} P_{ch,b,t}$ 为储能充电功率, $\sum_{g \in \Omega^{GEN}} P_{g,t}$ 为电厂发电功率, $\sum_{b \in \Omega^{BES}} P_{dc,b,t}$ 为储能放电功率

4. 双层规划模型

该双层优化模型由储能扩展规划与电网运行决策共同构成。上层以储能系统的投资与运行优化为目标, 目标函数计算公式为式(1)-式(3), 约束条件为式(4)-式(10), 为保证含数据中心的电网处于最优运行状态, 下层模型旨在保证含数据中心的电网处于最优运行状态, 目标函数为最小化系统发电成本, 计算公式为式(11), 式(12), 其中数据中心的运行约束见式(13)-式(23), 电网运行约束条件为式(24)-式(31)。

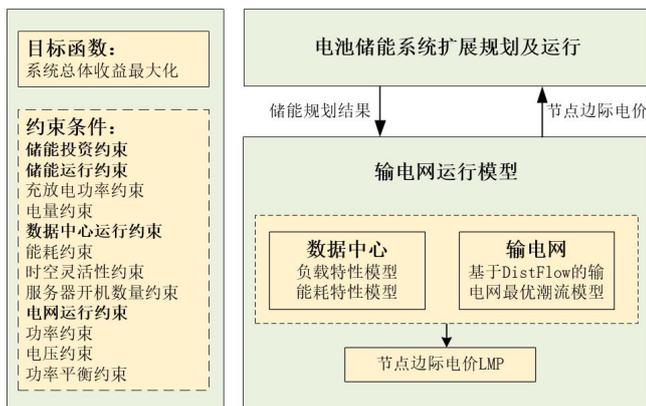


Figure 1 Energy storage and power grid coordinated planning model including data centers

图 1 含数据中心的储能与电网协同规划模型图

在求解过程中，上层模型输出的储能规划结果作为下层模型的输入条件，下层在给定规划结果条件下，进行潮流计算并生成各节点的节点边际电价反馈至上层。通过上述双向迭代交互，直至结果收敛，实现储能规划与电网运行的协同优化，如图 1 所示。

三、算法

(一) 算法基本思想

本文提出的算法采用迭代法思想，其核心目标是通过合理配置储能，提高电力系统的运行效率，改善数据中心的服务质量，优化电力系统的运营成本。算法通过迭代计算的方式，在上下层模型之间不断调整，逐步实现该目标。

(二) 收敛性分析

在算法的迭代过程中，本文认为收敛性问题至关重要。上层模涉及储能投资成本、规划位置和充放电功率多个复杂因素，下层模型中数据中心的工作负载共享和潮流分布也会影响整体优化结果，因此在迭代过程中可能会出现振荡或无法收敛的现象，可分为以下三类：1) 振荡现象：算法迭代过程中，电力需求可能会出现周期性波动，导致模型在一定时间内难以收敛。2) 约束更新问题：若储能规划与电力调度之间协调不足，约束条件可能无法满足，进而影响模型的收敛。3) 计算精度问题：电力调度过程中，模型具有非线性性质，计算可能会出现不稳定，影响最终结果的收敛性。

当收敛性不足时，上下层交互难以稳定在最优解附近，容易产生不可行解或结果大幅波动，降低优化的可靠性。收敛问题还会影响经济性，若节点边际电价在迭代中频繁波动，上层储能规划就难以准确判断投资收益，导致投资决策偏离最优，整体效益降低。

(三) 二分嵌入迭代法

为有效算法的收敛性问题，我们提出了二分法嵌入迭代法。该算法能够有效解决储能规划和输电网运行之间的协调问题。在算法迭代过程中，我们将通过二分法更新电力需求的上下限，从而保证每次迭代都朝着最优解收敛。通过这种方式，算法能够避免在迭代中出现振荡现象，从而加速收敛过程。所提出的算法如图 2 所示，主要步骤如下：

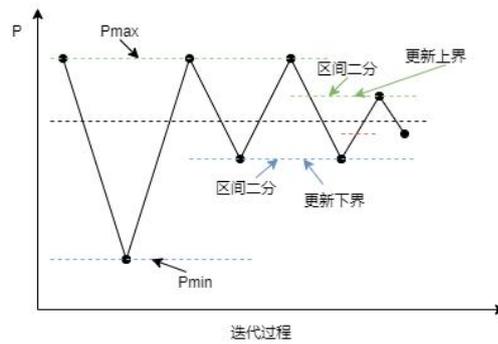


Figure 2 Algorithm Iteration Process

图 2 算法迭代过程

如果在第 k 次迭代过程中出现振荡现象, 且上层的电力需求为 P , 那么假设 $P_{\max} = \max\{P(k), P(k-1)\}$, $P_{\min} = \min\{P(k), P(k-1)\}$, 这是上层模型的初始运行区间。

1) 令 $P = (P_{\max} + P_{\min})/2$, $k = k + 1$, 转到下一步。

2) 将约束 $P(k) = P$ 加入求解下层模型的过程中, 求解双层模型。通过这一步, 上层的运行区间被分成两半。如果此时的计算结果满足收敛条件, 则终止迭代。否则, $k = k + 1$, 转到步骤 3。

3) 将约束 $P_{\min} \leq P \leq P_{\max}$ 加入求解下层模型的过程中进行求解。这一步我们得到了包含最优状态的新运行区间。如果此时的计算结果满足收敛条件, 则终止迭代。否则, 转到步骤 4。

4) 若 $P(k) = P_{\max}$, 则最优运行区间应在 $[P, P_{\max}]$ 内, 于是更新下界, 即 $P_{\min} = P$ 。否则, $P(k) = P_{\min}$, $[P_{\min}, P]$ 为最优运行区间, 更新下界 $P_{\max} = P$ 。转到步骤 1, 重复上述步骤, 直至满足收敛条件。

四、算例分析

(一) 参数设置

为了研究本文所构建的分布式数据中心与储能系统双层优化规划模型, 算例中的 IDC 架构的数据参数和储能系统的配置如表 1 所示 [15]。

Table 1 IDC System Parameters and Energy Storage System Parameters

表 1 IDC 系统参数与储能系统参数

IDC	参数	储能系统	参数
C_{gen}^{OP}	850万元/IDC	C_{BES}^{IN}	16.8万元/BESS
$P_{c,t}^{idle}$	0.05MW	C_{BES}^{OP}	0.84万元/年
$P_{c,t}^{peak}$	0.1MW	δ	7%
τ_c	0.9	P_b^{\max}	1.5MW
M_c	3个	E_b^{\min}	0.3MWh
U^{\max}	400W	E_b^{\max}	1MWh

<i>PUE</i>	1.18	<i>SOC(0)</i>	0.5
------------	------	---------------	-----

对内蒙古和林格尔新区与集宁大数据产业园周边的能源网络架构进行分析, 乌兰察布集宁南 220 千伏变电站—乌兰察布大数据中心 110 千伏供电网架的能源结构与 IEEE30 节点系统类似, 主要包括传统的火电、风电等多种能源形式, 在这些节点之间, 电力的传输和调度遵循着类似的电网拓扑结构, 其对应数据中心直接挂在 220/110 kV 节点上的负荷, 数据中心中负荷节点的电力需求是动态变化的, 具备需求波动性和电力负荷的不确定性的特点, 并且乌兰察布集宁南地区是中国风能和太阳能资源最丰富的地区之一, 其风力发电和光伏发电的比例可以通过在 IEEE30 节点模型中设置多个风电和光伏发电节点来实现。由此本文选取 IEEE30 节点基准电力系统模型进行仿真分析, 验证本文所构建模型的可行性, 具体网络拓扑图如图 3 所示。该网络配备了 5 台分布式发电(DG)机组和 3 台可再生能源发电(RES)机组。配电馈线容量为 4.4MVA, 最小功率因数为 0.85, DG 机组和光伏发电机组的特性具体见文献 [16]。

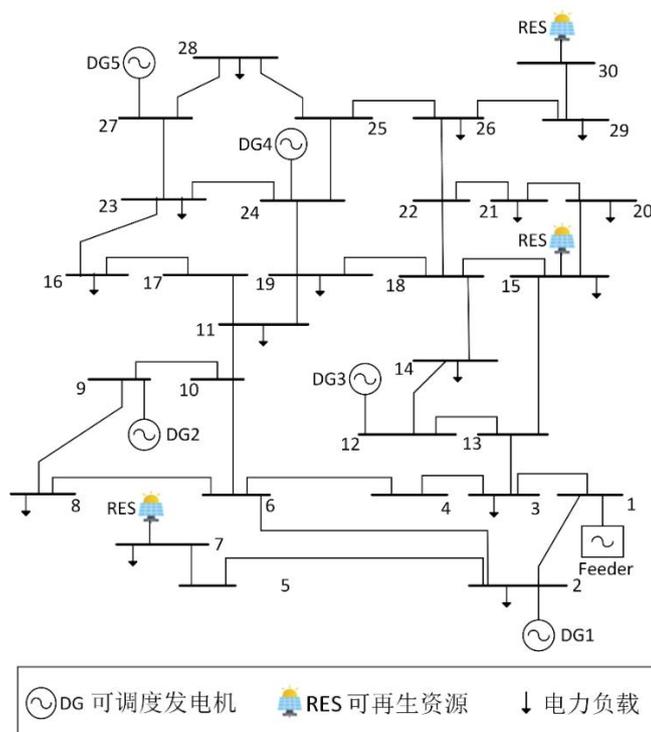


Figure 3 N30-Node Transmission Grid System Network Topology Diagram

图 3 30 节点输电网系统网络拓扑图

在本文中, 假设总线 7、15 和 30 上分别有光伏太阳能电源和风能电源 [17]。所研究 IDC 和储能系统以 1 小时为单位统计一天的数据, 每个交互请求的最大允许延迟设置为 0.5s, 每个请求的数据大小设置为 0.3Mbit, IDC 和储能系统的折扣率和服务年限分别设置为 6%和 10 年, 扩建规划的时间范围为 5 年, 年折扣率为 8%。可接受的年平均误差为 10^{-6} , 收敛误差为 0.1%, 表 2 显示了具有典型日的天数和每年的具体日期。此外, 本文认为有 4 个 IDC 和 3 个储能系统将被安装在系统中, 根据规划模型寻找出其最佳位置与容量。

Table 2 Number of Days in a Typical Year and Specific Dates**表 2** 每年典型日的天数与具体日期

年数	典型日	具体日期
1	D _{1,1}	194
	D _{1,2}	22
2	D _{2,1}	49
	D _{2,2}	50
3	D _{3,1}	351
	D _{3,2}	267
4	D _{4,1}	56
	D _{4,2}	120
5	D _{5,1}	1
	D _{5,2}	134

(二) 仿真结果与分析

为验证分布式数据中心与电网储能系统双层优化模型的有效性, 并在此基础上深入探讨区域系统内储能规划的各项性能指标, 本文划分以下 4 个设计场景。

场景 1: 只考虑做储能系统的规划, 而不考虑 IDC 的渗透;

场景 2: 将 IDC 视为传统刚性负荷, 即不考虑算力负荷的时空灵活性;

场景 3: 储能系统始终安装在承担 IDC 的总线上, 即 IDC 只能就地使用储能能源;

场景 4: 本文所构建的分布式数据中心与储能系统综合规划模型;

通过计算双层优化模型中的最小化电网规划成本和储能规划成本, 得到四种场景下的储能系统和 IDC 规划结果如表 3 所示。

Table 3 Optimal Planning Results for all Scenarios**表 3** 所有场景的最优规划结果

场景	IDC分布以及容量[M_c]	储能系统分布以及额定参数(E_b^{\max}, P_b^{\max})
1	---	11(8.6,3.7),13(6.8,3.1),21(10.0,1.6)
2	4[137],12[118],19[97],27[105]	5(6.1,3.4),10(8.8,2.2),21(8.6,2.7)
3	7[112],9[119],15[141],22[153]	7(8.3,4.7),9(7.6,5.1),15(8.4,4.0)
4	7[105],9[59],15[102],22[81]	13(8.1,0.7),16(5.9,3.5),21(9.6,0.5)

图 4 比较了场景 2 和场景 4 的请求调度结果, 对于场景 4 中选择的解决方案, IDC 是均匀分布在电力系统中, 使它们能够以相对较短的延迟服务于所有来源的请求。在场景 2 中, 所有请求仅根据空间位置进行调度, 没有考虑不同时间段的电价、负载波动等因素, 其在高峰时段系统负荷较大, 导致延迟增加。而场景 4 通过引入时间调度策略, 能够在电价较低或系统负载较小的时段调度请求, 平滑负荷波动, 从而有效降低了系统的总延迟, 图中的调度结果显示, 情况 4 下的批量处理请求被合理地调度在电价较低、负荷需求较小的时间段中, 通过利用算力负荷的时空灵活性, 系统不仅可以优化电力资源的使用, 还能提升数据中心的服务质量, 确保计算任务在最适合的时间段完成, 进而提高了系统的整体运行效率。

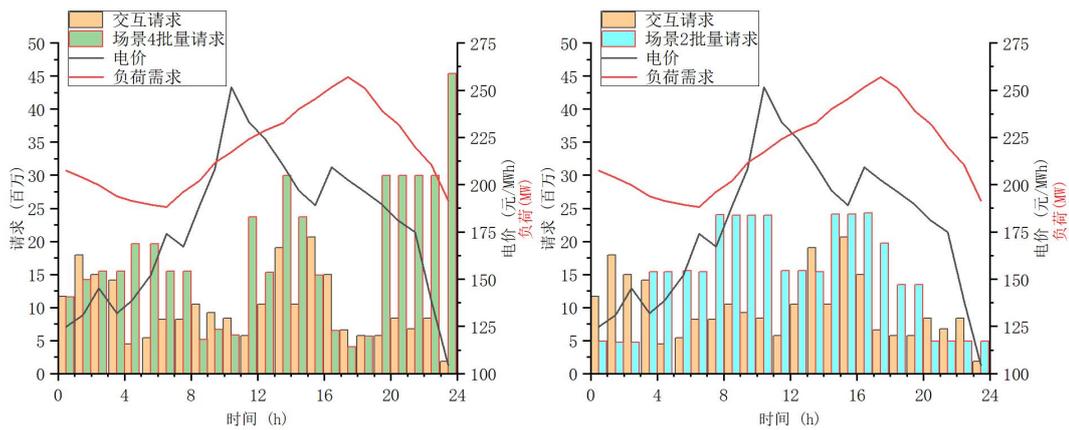


Figure 4 Comparison Chart of Computing Power Load Between Scenario 2 and Scenario 4

图 4 场景 2 与场景 4 的算力负载比较图

图 5 展示了场景 3 和场景 4 中储能系统的充电/放电行为和状态电量 (SOC) 分布。通过比较可以看到, 在场景 3 中, 储能系统的充放电活动较少, 因为储能系统被限制于与 IDC 同一总线, 导致其充电和放电频率较低, 且主要用于应对 IDC 的电力需求。而在场景 4 中, 储能系统不仅为 IDC 提供电力, 还能为电网的负荷波动提供支持, 在高负荷时段进行放电, 在低负荷时段进行充电, 极大地提高了储能系统的利用效率, 其充放电活动更加频繁, SOC 变化也更加明显。这表示在场景 4 中储能系统的灵活调度可以更好地适应系统负荷的变化, 同时提升系统的稳定性和可靠性, 通过合理规划储能系统的充放电策略, 可以有效平衡电网负荷, 应对高峰期的电力需求波动并提高可再生能源的利用效率。

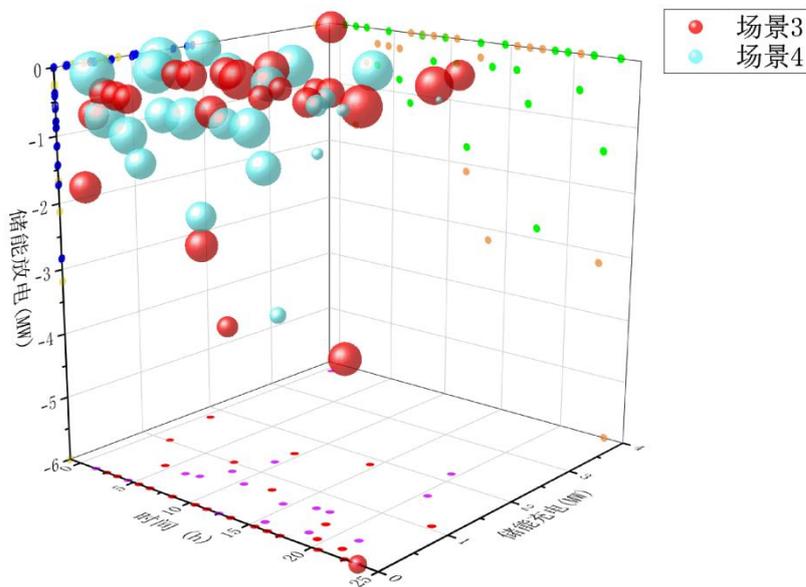


Figure 5 Charging and discharging of energy storage systems in Scenario 3 and Scenario 4

图 5 场景 3 与场景 4 储能系统的充放电以及 SOC 散点图

图 6 展示了四种不同规划场景下的成本比较, 各个场景的成本分别反映了不同的设计选择对系统投资和运行成本的影响。为方便起见, 我们使用情况 4 的值作为标准值, 对所有指标进行归一化。根据图中的数据, 场

景 4 的投资和运行成本显著低于其他场景, 这验证了通过综合考虑储能系统和 IDC 的交互影响, 可以带来明显的成本节约效益。在场景 4 中, IDC 和储能系统的规划是协同进行的, 因此能够更高效地使用系统资源, 从而减少不必要的支出。而在其他 3 种场景中, 由于 IDC 负荷调度的限制或储能系统的局部限制, 系统的成本明显增加, 虽然其 IDC 和储能系统的容量和位置得到了相对应的优化, 但由于缺乏协同调度或资源共享, 导致了更高的成本。由此进一步强调了本研究提出的规划模型在成本控制方面的优势, 特别是在电力负荷管理和储能系统调度的结合上, 能够大幅度减少总体支出。



Figure 6 Cost Comparison Chart for Four Scenarios

图 6 四种场景的成本对比图

五、结论

本文所提出的分布式数据中心与储能系统综合规划模型通过充分考虑 IDC 与储能系统的协同效应, 提供了一种高效、低成本的优化方案, 为未来电网与数据中心的协同发展提供了科学依据和实践参考。通过对不同场景进行仿真分析, 主要研究成果如下:

1)考虑 IDC 的算力负荷时空灵活性与电网储能系统的协同调度, 本文对网络和能源资源之间的耦合影响建立了双层优化模型, 使得电网规划和储能规划的成本最低。通过这种方式, 在场景 4 中结合时空调度策略后, IDC 对请求的服务延迟、规划成本得到有效提升, 相较于仅考虑空间调度的场景 2, 其灵活性和经济性得到显著增强。该算例结果表明, 通过合理利用网络数据中心的时空负荷转移灵活性以及协调规划数据中心和电池储能系统的位置和大小, 能显著提高系统的服务质量、经济性和可靠性。

2)储能系统在不同规划场景中的优化部署, 充分证明了其对电力系统稳定性的贡献。在 IDC 与储能系统自由规划的情境下, 储能系统的充放电调度不仅受到 IDC 负荷的影响, 同时也能根据系统负荷波动进行灵活调节, 从而优化系统负荷曲线, 降低负荷峰谷差。而在仅将储能系统部署于 IDC 所在母线的情况下, 其调度频率显著降低, 未能发挥储能系统的全部潜力。

参考文献

- [1] 马蕴颖. AI时代清洁能源数据中心发展趋势及实践探索. 通信世界, 2025(17): 32-35.
- [2] 蒋昌俊. 赋能东数西算战略构筑智能算力网络. 中国科学基金, 2025, 39(02): 193.
- [3] 谭力, 于娟. 储能与数据中心融合应用的前景、挑战及建议. 数字经济, 2025(01): 42-44.

- [4] 赵石. 大型数据中心供能系统储能设备配置研究. 节能, 2025, 44(07): 80-84.
- [5] 李一锦, 王冀波, 张梓豪, 等. 计及需求响应的数据中心和光-储系统协同优化配置方法. 供用电, 2025, 1-11.
- [6] 马浩然, 袁至, 王维庆, 等. 考虑数据中心和储能接入的主动配电网经济调度研究. 发电技术, 2025, 46(04): 748-757+634.
- [7] Cheng Y H, Zhang N, Zhang B S, et al. Low-Carbon Operation of Multiple Energy Systems Based on Energy-Carbon Integrated Prices. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11, 1307-1318.
- [8] 李为润, 林永君, 刘卫亮, 等. 含数据中心综合能源系统双层容量优化配置. 电力科学与工程, 2025, 41(05): 68-78.
- [9] 吴长元, 杨斐平, 胡高峰, 等. 考虑互动响应的数据中心与新能源配电网双层协同规划方法. 黑龙江电力, 2025, 47(02): 109-117.
- [10] 杨诗瑶, 李勇, 杨洪海. 考虑需求响应的数据中心储能配置及调度三层优化. 节能, 2025, 44(07):36-42.
- [11] Kasra Shafiei, Saeid Ghassem Zadeh, Mehrdad Tarafdar Hagh. Planning for a network system with renewable resources and battery energy storage, focused on enhancing resilience. Journal of Energy Storage, 2024, 87, 111339.
- [12] 王述祯. 基于i-C&CG求解算法的数据中心与储能协同规划. 储能科学与技术, 2025, 14(02): 671-687.
- [13] 陈绪昌, 王育飞, 薛花. 基于MDP-ADMM的数据中心储能系统优化运行方法. 储能科学与技术, 2023, 12(06): 1890-1900.
- [14] 孙晓杰, 刘昊儒, 余韵滢, 等. 基于多层粒子群算法的数据中心能耗优化调度策略. 电信工程技术与标准化, 2024, 37(S1): 242-246.
- [15] Guo Caishan, Luo Fengji, Cai Zexiang, et al. Integrated planning of internet data centers and battery energy storage systems in smart grids. Applied Energy, 2021, 281: 116093.
- [16] Mongird K, Viswanathan V V, Balducci P J, et al. Energy storage technology and cost characterization report. Technical Report, PacificNorthwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States), 2019. DOI: <https://doi.org/10.2172/1573487>.
- [17] Measurement and Instrumentation Data Center (MIDC). Restore original map zoom magnification. Measurement and Instrumentation Data Center (MIDC). 2018. <http://midcdmz.nrel.gov>.