doi:10.6043/j.issn.0438-0479.202103010

# 考虑信息负荷调度的融合型变电站优化运行

杨 琪[1]，孟 超[1*]，梅 超[2]，赵英汝[1]，郭熠昀[2]

（1.厦门大学能源学院，福建 厦门 361102；2.国网厦门供电公司，福建 厦门 361000）

**摘要：**融合型变电站作为集成建设多种功能站的新型运营模式，为边缘数据中心与电动汽车充电站的规划运行提出了新的方向，而作为典型的综合能源系统其运行优化方法也有待深入研究。针对融合型变电站内各功能站协同优化问题，设计了涵盖数据中心、储能电站、电动汽车充电站的融合型变电站运行架构，建立了以年净支出最小为目标函数的多站协同运行优化模型，提出了融合型变电站优化运行策略。通过模型的优化求解，确定多站协同运行最优方案。算例结果表明：电动汽车充电站负荷曲线具有明显的峰谷特性，且与电网用电高峰时间相符，电动汽车充电站接入融合型变电站会进一步加剧供电压力；通过信息负荷与储能电站的灵活调度，可以实现电力负荷在时间与空间上的转移，达到转移高峰负载，促进电动汽车平滑入网，显著降低运行成本的作用；融合型变电站的日净收益随低时延数据负荷的比例增大而增大，二者近似呈线性关系。

**关键词：**融合型变电站；信息负荷调度；边缘数据中心；储能电站；电动汽车充电站

**中图分类号：**TM 73　　**文献标志码：** A

随着大数据、人工智能、物联网、5G 等信息化技术的快速发展，“万物互联”不断推进，连接设备数量持续增长，在带来海量数据连接的同时，对数据计算与处理能力也提出了更高的要求。仅依靠移动终端本身已无法满足计算需求，而云计算平台较长的通信链路又极易导致高延时，影响服务质量与用户体验[1]。为解决这一矛盾，边缘计算得到广泛关注，边缘数据中心的建设需求也逐年上升。另一方面，随着能源短缺与环境污染日益严重，电动汽车由于其良好的环保节能特性受到了社会各界的重视，其大规模普及应用已成为未来交通出行的必然趋势，扩大电动汽车充电设施建设迫在眉睫。融合型变电站提倡利用电力企业变电站资源，建设数据中心站、充(换)电站、储能站、5G 通信基站等功能站，全面承载电网业务数据，满足日益增长的数据存储、融通和增值运营需求，实现“能源流、业务流、数据流”的三流合一[2]。融合型变电站具有供电方便、分布广泛、布点密集、贴近用户等优势，是边缘数据中心与电动汽车充电站选址建设的最佳选择。

收稿日期：2021-03-11　　录用日期：2021-04-07

* 通信作者：meng@xmu.edu.cn

厦门大学学报（自然科学版）

随着数据服务需求的日益增长，数据中心能耗不断攀升。2018 年全球数据中心耗电量约占全球总耗电量的 1%[3]，预计 2030 年将达到 8%[4]。电动汽车充电行为在空间和时间上具有极强的随机性与间歇性，而随着电动汽车保有量不断增长，电动汽车入网充电行为将对电力系统的安全性与稳定性带来更大冲击。数据中心能耗问题与电动汽车入网充电行为特性均将对融合型变电站运行带来极大影响，因此有必要针对数据中心节能运行方法与电动汽车充电站负荷模拟及其充电行为特性展开研究。此外，融合型变电站涵盖供冷、供电、储能等多种能源形式，也是典型的综合能源系统载体。因而融合型变电站的运行优化问题涉及电动汽车充电站的负荷特性研究、综合能源系统的规划研究以及传统数据中心的节能运行方法。

在电动汽车充电站负荷特性研究方面，Schäuble 等[5]基于真实电动汽车出行与充电数据建立电动汽车负荷模型，并对电动汽车无序充电和有序充电行为对电网影响展开了分析；Bhat 等[6]针对混合动力汽车与纯电动汽车充电需求展开研究利用其车辆运行参数估算行程能耗，进而构建充电需求模型；Bae 等[7]基于动态交通流量模型和 M/M/s 排队论知识，提出了适用于高速公路快速充电站的充电负荷预测模型；Anastasiadis 等[8]将入网电动汽车视作完全放电状态，利用充电时间和环境温度对电动汽车充电负荷进行计算；许威等[9]考虑用户出行习惯，采用马尔可夫链描述单日出行过程中电动汽车电池荷电状态的变化情况，利用蒙特卡洛模拟仿真计算不同场景下电动汽车充电负荷；刘文霞等[10]提出了一种基于新鲜度函数的交叉熵权重组合预测的方法，对北京市公交充电站进行了短期负荷预测。上述研究主要针对电动汽车充电负荷建模方法展开研究，并未涉及多站协同运营场景下电动汽车平滑入网方法研究。

在综合能源系统规划研究方面，Jin 等[11]主要针对微电网等多能互补系统的优化配置和运行策略展开研究，就热-电-储耦合能源网络的优化调度与需求响应问题进行了探讨；Crémel 等[12]研究城市能源系统的混合整数线性/非线性优化方法，统筹考虑建筑选址布局、负荷需求以及能源技术选择之间的关系；Rojas-Zerpa 等[13]采用遗传算法对混合发电系统进行规划设计；Pan 等[14]针对热-电耦合系统的协同调度问题提出了一种可行的模型重构方法；Gu 等[15]针对可再生能源出力及负荷不确定问题提出一种在线优化调度微网的方法；崔全胜等[16]考虑可再生能源与储能设备，对用户侧综合能源系统展开规划运行联合优化；卫志农等[17]利用电转气与燃气轮机改善了电－气互联综合能源系统净负荷波动性问题；张津珲等[18]构建了计及交通流量不确定性的综合能源系统三层鲁棒优化调度模型；曾鸣等[19]考虑用户侧冷、热、电负荷，搭建了兼容需求侧可调控资源的分布式综合能源系统经济优化运行模型。但遗憾的是，上述研究均未将信息负荷作为可调控负载纳入考量。

在数据中心节能运行方面，Liu 等[20]考虑数据中心后备供电设施不间断电源（uninterruptible power supply，UPS），提出名为 RE-UPS 的能源管理方案，利用可再生能源满足数据中心峰值电力需求；Srikantaiah 等[21]利用服务器整合方法减少服务器运行数量以降低数据中心能耗；Luo 等[22]提出了一种数据中心废热回收的系统方法，以降低数据中心的总体能源需求；Mirhoseininejad 等[23]考虑了 IT 设备与冷却单元之间的热

**基金项目：**国家自然科学基金（51876181）

* **通信作者：**meng@xmu.edu.cn

厦门大学学报（自然科学版）

相互作用，探索数据负荷与冷却单元运行参数之间的协同作用，以降低数据中心能耗；Alqawasmeh 等[24]考虑服务器性能状态建立数据中心能耗模型，允许服务器在不同处理速率与能耗之间进行权衡，实现数据中心服务质量与能耗水平的协同优化；郁善金[25]结合实时电价政策，在低谷电价时数据中心由外网供电并储能，峰值电价时直接由储能供电，从而降低数据中心运行成本；杨挺等[26]通过调整服务器集群负荷与 UPS 工作状态实现对新能源数据中心功率波动的有效平抑。上述研究主要针对单一数据中心的节能运行展开研究，并未涉及多个数据中心的联合运行优化，也不适用于融合型变电站内数据中心与其他功能站的协同运行优化研究。

综上可知，现有电动汽车充电站负荷建模方法主要包括基于充电行为机理、基于概率模型和基于启发式算法三类，仍存在对充电影响因素和充电方式考虑不全面等问题，也并未涉及电动汽车平滑入网方法的研究；现有综合能源系统的规划研究已将冷、热、电、气、交通等多种能源形式纳入考虑，但并未涉及信息负荷的调控；而针对考虑信息负荷调度的多个数据中心联合运行优化以及集成数据中心、储能电站、电动汽车充电站等功能站的融合型变电站优化运行的研究也有待进一步拓展。因此有必要针对融合型变电站站内各功能站协同一体化运行方法及站间信息负荷调度策略展开研究。

本研究构建了数据中心负荷模型、储能电站模型、电动汽车充电站负荷模型，建立了以年净支出最小为目标函数的多站协同运行模型，并设计融合型变电站优化运行策略，对模型进行分析求解得到多站协同运行的最优方案。

# 1 架构设计

融合型变电站集成建设数据中心、储能电站、充（换）电站、5G 基站等功能站，提倡改变各站单独规划、单独运行的模式，优化城市资源配置，实现多站一体化协同运营。本研究主要针对变电站、边缘数据中心、电动汽车充电站与储能电站的联合运营与协同优化。考虑变电站电力负载率、供电政策差异、土地资源限制以及周边区域设施组成等因素，利用变电站闲置的土地、电力等资源，配套建设边缘数据中心、储能电站与电动汽车充电站；为保证变电站运行的安全性，应在不同级别变电站建设不同规模的边缘数据中心，信息负荷在满足数据处理时延约束的情况下，在多个边缘数据中心间进行分配调度，实现数据处理成本最小化；传统数据中心一般配有储能系统作为市电断绝时的应急电源，本研究考虑对储能系统规模进行重新规划设计，在保留应急电量的情况下将储能系统纳入日常电力调度，实现削峰填谷，转移高峰负载；由于电动汽车充电站与外界的交互性较高，本研究考虑在变电站周边的园区停车场安装不同数量的充电桩，充电站的日常充电收入可用以补偿融合型变电站的运行成本。融合型变电站架构及各站交互过程如图 1 所示。

厦门大学学报（自然科学版）

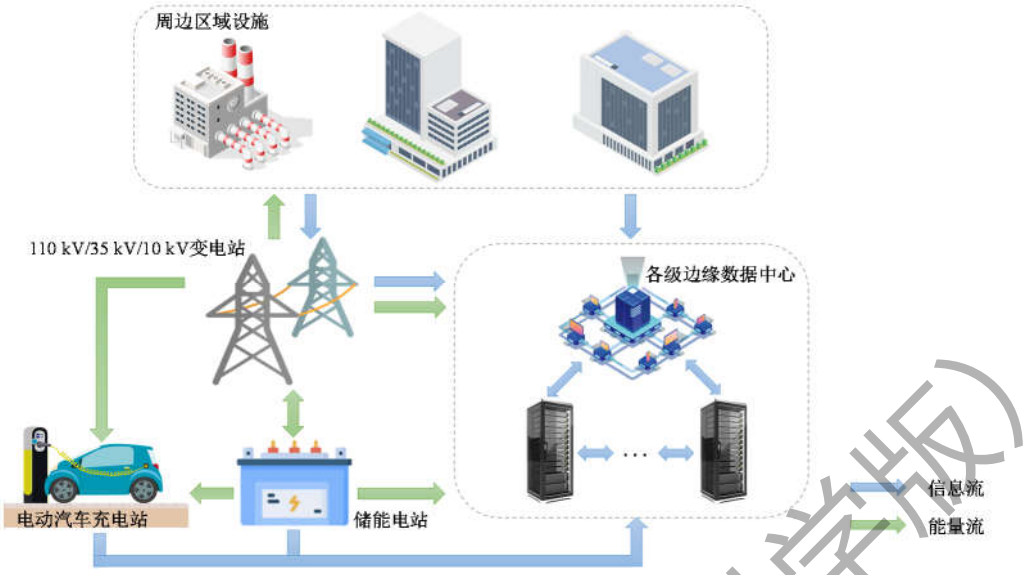



图 1 融合型变电站运行架构示意图

Fig.1 Schematic diagram of operation architecture of integrated substation

融合型变电站内能量与信息流动方向如图 1 所示。由能量流动方向可知，融合型变电站采用市电与储能电站协同供能，变电站为边缘数据中心、储能电站、电动汽车充电站以及周边区域设施供电，储能电站则在必要时向外界输出电量；由信息流动方向可知，周边区域产生的电力数据信息由电力系统传感设备收集流入变电站，边缘数据中心处理来自周边以及融合型变电站内产生的各种数据信息，这些数据处理任务遵循一定策略在各级不同规模边缘数据中心间进行分配迁移，实现信息负荷的互补调度。

## 2 系统建模

为实现对融合型变电站站内各功能站协同优化与站间联合运行优化问题的研究，本研究建立数据中心负荷模型、电动汽车充电站负荷模型与储能电站模型，并对模型涉及的约束条件与目标函数进行分析设计。本研究为课题组前期研究的进一步创新，储能电站沿用前期模型，具体参见文献[27]。需要注意的是，与前期模型对数据中心总能耗的简单估算不同，本研究建立的数据中心负荷模型通过调研目前数据中心能效指标，采用 PUE 值对数据中心总能耗进行计算，并对具有不同时延要求的信息负荷加以考虑，相比原模型准确性与完整性都有所提高。

### 2.1 数据中心负荷模型

数据中心能耗主要由 IT 设备能耗、制冷设备能耗与配电系统能耗组成，其中数据中心能耗与 IT 设备能耗的比值，即电源使用效率（power usage effectiveness ,PUE）是评价数据中心能耗水平的主要指标之一。PUE 值越接近 1，则数据中心能效水平越好。据统计，2018 年中国在用超大型数据中心平均 PUE 为 1.63，大型数据中心平均 PUE 为 1.54[28]。而随着绿色数据中心建设的不断推进，我国针对新建数据中心的能效提出了更高的要求，PUE 设计值已从 1.4 逐步降低到 1.3 甚至 1.25[29]。数据中心 PUE 表达式如下：

厦门大学学报（自然科学版）

$$\eta_{\mathrm{PUE}}=\frac{P_{\mathrm{DC}}}{P_{\mathrm{IT}}} \tag{1}$$

式中，$P_{\mathrm{DC}}$表示数据中心能耗，$P_{\mathrm{IT}}$ 为IT设备能耗。其中服务器能耗是IT设备能耗的主要组成部分，通过建立服务器能耗模型，进而利用PUE值即可计算得到数据中心能耗。

1）服务器能耗模型

将服务器状态分为工作状态与休眠状态，考虑数据中心服务质量要求与服务器使用寿命，对服务器关机状态不做考虑。通过调整工作服务器数量对服务器能耗进行调控，具体模型如下：

$$P_{\mathrm{s},t}=P_{\mathrm{w}}n_t+P_{\mathrm{h}}(M-n_t)\,, \tag{2}$$

式中，$P_{\mathrm{s},t}$为服务器总能耗，$P_{\mathrm{w}}$为工作服务器能耗，$P_{\mathrm{h}}$为休眠服务器能耗，$M$为服务器总数，$n_t$为工作服务器数量。

2）数据处理时延约束

数据处理延迟时间是影响数据中心服务质量的一项重要指标。当数据处理任务被分配到数据中心后，首先进入等待序列，数据中心则遵循顺序服务的原则对其进行处理。本研究通过对数据处理任务的分配迁移，实现各边缘数据中心间信息负荷的转移调度，调度时需满足数据处理时延约束，如下[30]：

$$0\le\frac{1}{\mu_k-\dfrac{\lambda_{k,i,t}}{n_{k,i,t}}}\le T_{\mathrm{d},k} \tag{3}$$

$$n_{i,t}=\sum_k n_{k,i,t} \tag{4}$$

式中：$\lambda_{k,i,t}$为在$t$时刻到达数据中心$i$的$k$型数据任务总量，$n_{k,i,t}$为$t$时刻数据中心$i$中处理$k$型任务所需的工作服务器数量，$n_{i,t}$为$t$时刻数据中心$i$工作服务器总量，$\mu_k$为工作服务器对于$k$型数据任务的服务率，该值取决于服务器性能,$T_{\mathrm{d},k}$为数据处理的延迟界限,针对不同类型数据负荷具有不同的时延要求。

## 2.2 电动汽车充电站模型

1）电动汽车充电模型

开展电动汽车充电负荷建模研究是充电站运行规划的前提，本研究的电动汽车充电负荷模拟对象为私家车用户，充电采用恒压恒流结合法，充电过程近似简化为恒功率充电，采用蒙特卡洛模拟方法对电动汽车充电站进行负荷模拟，流程如图2所示。蒙特卡洛模拟法又称随机抽样或统计试验法，是以概率和统计理论方法为基础，构造概率模型并从中抽样，以获得问题近似解的方法。

厦门大学学报(自然科学版)

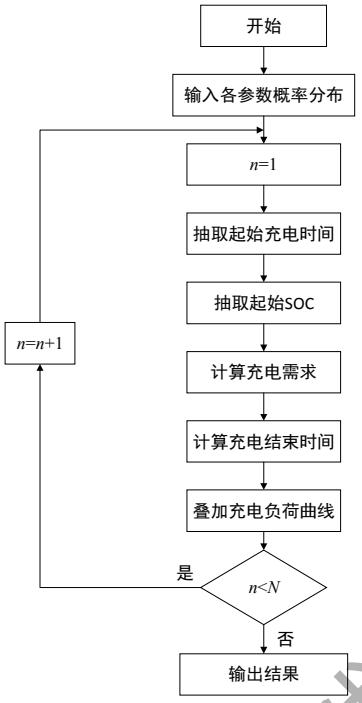



图 2 充电站负荷模拟流程图

Fig.2 Flow chart of load simulation of electric vehicle charging station

首先利用蒙特卡洛模拟抽取单辆电动汽车的起始充电时间与入站时电量水平，然后计算得出充电所需时间与充电结束时间，如式(5)所示。根据充电时间分布计算得到单辆电动车的实时充电功率分布，通过累加得到充电站实时负荷曲线，如式(6)所示。

$$\mathrm{end}(x)=st(x)+\frac{(S_{\mathrm{EV,max}}-S(x))\cdot C_{\mathrm{EV}}}{P_c\eta_c}, \tag{5}$$

$$P_{\mathrm{EV},i,t}=\sum_x P_{i,t,x}. \tag{6}$$

式中，$st(x)$为第 $x$ 辆电动车的起始充电时间，end($x$)为第 $x$ 辆电动车的充电结束时间，单位为 min；$S_{\mathrm{EV,max}}$ 为电动车电池最大荷电状态，$S(x)$为第 $x$ 辆电动车电池的起始荷电状态；$C_{\mathrm{EV}}$ 为电动车电池容量；$P_c$ 为电动车充电功率；$\eta_c$ 为电动车充电效率。本研究设定充电负荷模拟以 min 为单位，对一天 1440 min 进行模拟，每 15 min 对充电站负荷进行一次结算，$P_{i,t,x}$ 为 $i$ 充电站中 $t$ 时刻第 $x$ 辆车的充电功率，$P_{\mathrm{EV},i,t}$ 为 $i$ 站 $t$ 时刻电动车充电总负荷。

2）充电站容量约束

筹建电动汽车充电站时需考虑变电站土地资源限制与剩余供电容量限制，因此各级变电站安装充电桩数量有限，充电站实时用电功率约束如下：

$$P_{EV,i,t}\le P_{i,\max}. \tag{7}$$

式中，$P_{i,\max}$ 为 $i$ 充电站可容纳最大用电功率。

厦门大学学报（自然科学版）

## 2.3 能量平衡约束

融合型变电站日常运行采用市电与储能电站联合供电，能量消耗主要包括数据中心耗能、储能电站的充电以及电动汽车充电站耗电。融合型变电站能量平衡约束如下：

$$P_{g,i,t}+P_{bd,i,t}=P_{DC,i,t}+P_{bc,i,t}+P_{EV,i,t}, \tag{8}$$

$$P_{g,i,t}\le P_{max}. \tag{9}$$

式中，$P_{DC,i,t}$ 为融合型变电站 $i$ 的数据中心在 $t$ 时刻的用电功率；$P_{g,i,t}$ 为融合型变电站 $i$ 在 $t$ 时刻与电网交换功率，$P_{max}$ 为最大交换功率。融合型变电站用电来源为变电站闲置电力资源，因而为保证变电站对周边供电的可靠性，融合型变电站与电网交换功率需考虑变电站周边供电情况以及供能管网限制。

## 2.4 目标函数

本研究考虑经济性指标，以最小化融合型变电站年净支出为目标函数，对融合型变电站运行进行优化。年净支出由年总成本扣除年总盈利得到，其中年总成本由年等额投资成本、年维护费用与年购电费用组成，年总盈利则包括充电站盈利与数据中心盈利。具体目标函数如下：

$$\min(R)=R_{inv}+R_{m}+R_{g}-R_{EV}-R_{DC}, \tag{10}$$

$$R_{inv}=f\sum_{u}E_u p_{inv,u}, \tag{11}$$

$$R_{m}=\sum_{t}\sum_{u}P_{u,t}p_{m,u}, \tag{12}$$

$$R_{g}=\sum_{t}P_{g,t}p_t, \tag{13}$$

$$R_{EV}=\sum_{t}P_{EV,t}(p_{ch}+p_{se}), \tag{14}$$

$$R_{DC}=K\sum_{i}Q_i. \tag{15}$$

式中，$R_{inv}$ 为年等额投资成本，$R_{m}$ 为年维护费用，$R_{g}$ 为年购电费用，$R_{EV}$ 为充电站盈利，$R_{DC}$ 为数据中心盈利；$f$ 为资本回收因子，$E_u$ 为设备 $u$ 的装机容量，$p_{inv,u}$ 为设备 $u$ 的单位投资成本；$P_{u,t}$ 为设备 $u$ 在 $t$ 时刻的用电功率，$p_{m,u}$ 为设备 $u$ 的单位维护费用；$P_{g,t}$ 为向电网购电功率，$p_t$ 为购电价格；$P_{EV,t}$ 为电动车充电功率，$p_{ch}$ 为电动车充电价格，$p_{se}$ 为充电服务费；$K$ 为数据中心机柜年租金，$Q_i$ 为数据中心 $i$ 安置机柜数量。

# 3 融合型变电站的运行策略设计

## 3.1 站内协同运行策略

单个融合型变电站内设有变电站、电动汽车充电站、数据中心与储能电站，各站功能定位如下。变电

厦门大学学报（自然科学版）

站作为主要供电来源，利用其剩余容量为数据中心、储能电站与电动汽车充电站进行日常供电。电动汽车充电站在本研究作为设计负载，利用蒙特卡洛方法获取实时负荷曲线，充电站营业收入可用以补偿融合型变电站日常运行成本。储能电站作为辅助电源：1）在电动汽车入网充电造成电网波动时，为电网提供紧急支撑、调峰调频的功能；2）结合分时电价政策，在低电价时段充电，高电价时段放电为数据中心与电动汽车充电站供电，以达到降低数据中心运行电费，削减电动汽车充电站充电成本的作用；3）兼顾数据中心后备电源的功能，在参与日常电力调度时需保留一定容量以备市电中断时的紧急供能。数据中心作为灵活的需求响应资源，可利用各级变电站电价差异，通过信息负荷的合理调度，改变自身用电行为，进而实现数据中心用电成本最小化，具体信息负荷调度方法将在 3.2 节中进行详细说明。

## 3.2 站间信息负荷调度策略

数据中心能耗中 IT 设备能耗的占比最大，该能耗主要在服务器处理信息负荷的过程中直接生成，数据中心所承担信息负荷越多，则 IT 设备能耗值越大[31]。因此利用各融合型变电站站间的信息负荷调度，可以实现电力负荷的转移。另一方面，电信号在电缆中的传输存在网损，而光纤传输带宽较宽，传输损耗较低，抗干扰能力较强[32]，因此通过数据网络转移电力负荷在经济性与稳定性方面也更具有优势。信息负荷与电力负荷流动方向如图 3 所示。

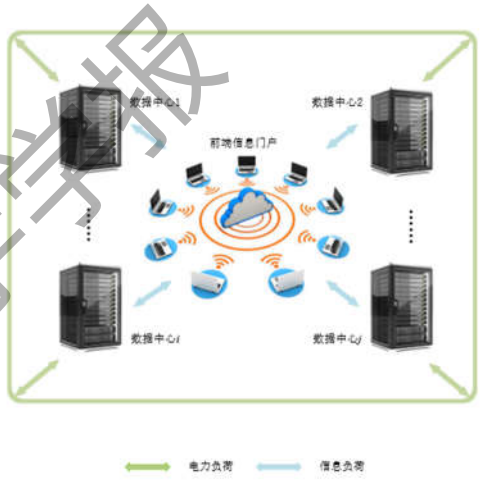



图 3 信息负荷与电力负荷流动方向示意图

Fig.3 Schematic diagram of flow direction of information load and power load

本研究中各级融合型变电站建设的边缘数据中心规模不一，承担的信息负荷体量不同，用电需求也有较大差别。首先设定一前端门户对各边缘数据中心接收的数据处理任务进行整合，然后考虑各级变电站电价差异与电力负载率，对信息负荷进行合理的分配转移，优化各边缘数据中心工作服务器数量。如此既可利用价格信号削减数据中心的运行电费，还可通过数据网络转移电力负荷，缓解个别融合型变电站的用电压力，实现各站间的互补调度。

厦门大学学报（自然科学版）

# 4 案例研究

在数学规划与优化的高级建模软件 GAMS24.0 中建立融合型变电站系统模型，以最小化年净支出为优化目标对模型进行求解，获得全局最优运行方案。

## 4.1 参数设置

本研究设计 110 kV 变电站为大型工业园区供电，2 个 35 kV 变电站为一般工商业建筑供电，2 个 10 kV 变电站为居民区供电，利用变电站空间资源在站内建设不同规模的边缘数据中心与储能电站，并在各园区停车场内配置不同数量充电桩。考虑变电站土地资源限制与剩余供电容量限制，在 10 和 35 kV 变电站仅设置 7 kW 交流慢充桩，在 110 kV 变电站设置 7 kW 交流慢充桩与 60 kW 直流快充桩。电价采用北京分时电价，如表 1 所示。通过考察北京私家车年平均出行里程与出行时间分布对电动汽车充电负荷进行蒙特卡洛模拟，设置入站电动汽车电量水平 $S(x)$服从正态分布 $N(0.55,0.1^2)$，私家车在小区停车场与单位停车场的起始充电时间不同，分别服从 $N(1140，90^2)$，$N(540，30^2)$。数据中心网络信息负载采用泊松过程模拟，本文考虑的信息负荷均为延迟敏感型，根据其时延要求不同分为两类：Ⅰ型信息负荷包括实时视频通信、虚拟现实、地图数据传输等对时延要求更高的任务，以 10 ms 为延迟界限；Ⅱ型信息负荷包括在线游戏、视频缓存、广播业务等对时延要求更低的任务，以 50 ms 为延迟界限。各设备技术参数见表 2。

表 1 分时电价表

Tab.1 Time-of-use tariff

| 用电分类（电压等级） | 平时段（07：00-08：00，11：00-18：00）/(元·(kW·h)$^{-1}$) | 峰时段（08：00-11：00，18：00-23:00）/(元·(kW·h)$^{-1}$) | 谷时段（23:00-07：00）/(元·(kW·h)$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 大工业（110 kV） | 0.6370 | 0.9334 | 0.3496 |
| 一般工商业（35 kV） | 0.7547 | 1.2734 | 0.2873 |
| 一般工商业（10 kV） | 0.7697 | 1.2884 | 0.3023 |

表 2 设备技术参数表

Tab.2 The technical parameters of equipment

| 设备 | 参数 | 数值 |
|---|---|---|
| 蓄电池 | 最大充电功率/kW | 500 |
| | 最大放电功率/kW | 500 |
| | 充电效率/% | 95 |
| | 放电效率/% | 95 |
| 充电桩 | 交流桩充电功率/kW | 7 |
| | 直流桩充电功率/kW | 60 |
| | 充电效率/% | 95 |

厦门大学学报（自然科学版）

| | | |
|---|---|---|
| 服务器 | 工作功率/W | 500 |
| | 休眠功率/W | 250 |

## 4.2 单项设备运行分析

各充电站典型日负荷曲线如图 4 所示。由图可见，电动汽车充电负荷在两个时段出现高峰，分别为 10：00-11：00 与 20：00-21：00，与电网供电高峰时间相符。可以想见随电动汽车保有量持续增加，大量电动汽车入网充电将导致用电高峰时段电网供电压力进一步增大，对电网稳定性造成更大冲击。而这一现象与私家车主的出行规律以及电动汽车充电特性具有密切关系，车主在上午离开居民区前往工作地点，到达单位停车场后部分车主选择充电，随着充电车辆的增多，充电站负荷上升，在 10：30 左右到达峰值，此后入站充电的车辆逐渐减少且部分车辆充满电离开，充电站负荷由此降低；同理，车主结束当天的工作后回到居住小区，夜间充电车辆逐渐增多，负荷累加直到 20：30 左右到达峰值，随着入站车辆减少以及部分车辆充电任务的完成，负荷曲线呈下降趋势，直至次日 3：00 充电站内充电车辆基本清零。110 kV 充电站由于设有直流快充桩，车辆入站后充电时间更短，因而负荷曲线更早（10：00 左右）达到峰值。此外，各充电站设置充电桩数量不同，可容纳充电车辆数量不同，其峰值负荷也有一定差距。

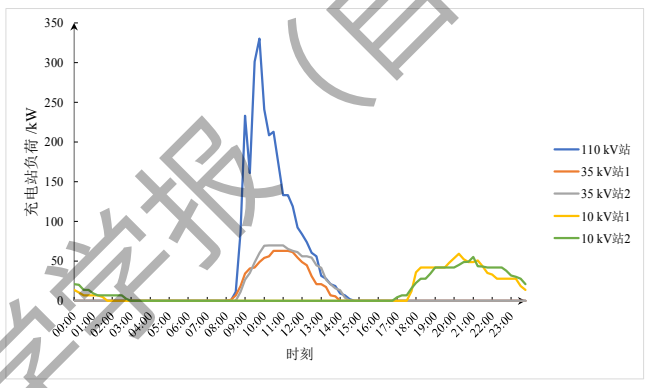



图 4 充电站典型日负荷曲线

Fig.4 Typical daily load curve of electric vehicle charging station

各储能电站典型日实时运行曲线如图 5 所示。考虑电池寿命损耗，本研究对电池的充放电深度进行限制。由图可见，储能电站参与日常电力调度后，一日进行两次充放电。在电价处于低谷时进行充电，在 7:00 前完成第一次充电；在电价处于高峰时段（8:00 以后）进行第一次放电，以供边缘数据中心与充电站用电；第二次充电发生在电价平时段（11：00-18：00），在该时段充入的电量将在夜间的电价高峰时段（18：00-23:00）放出，以达到转移高峰负荷，促进电动汽车充电负荷平滑入网，以及降低融合型变电站运行成本的作用。

厦门大学学报（自然科学版）

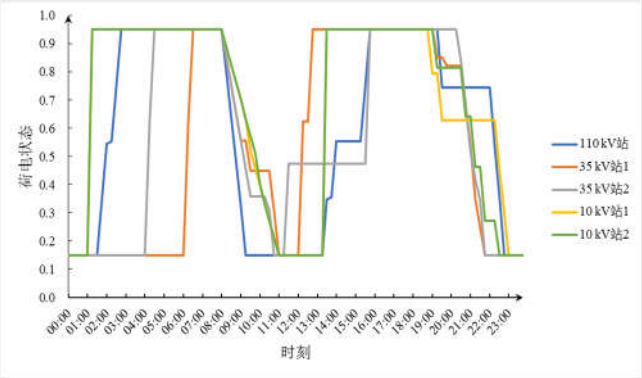
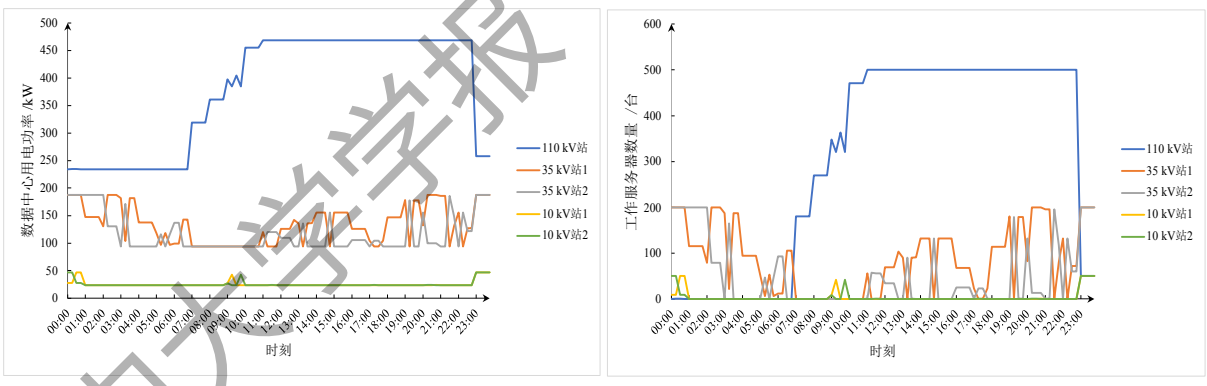



图 5 储能电站实时运行曲线

Fig.5 Typical daily real-time operation curve of energy storage power station

各边缘数据中心实时运行曲线如图 6 所示。由图 6(a)可见，110 kV 变电站建设的边缘数据中心的用电功率最大，35 kV 变电站建设的数据中心次之，10 kV 变电站建设的数据中心负荷最小。这是由于：1）高电压等级的变电站周边建设的数据中心规模更大，能够承担更多的信息负荷；2）为保证数据中心运行成本最低，在前端门户进行数据任务的整合与调度时将优先将信息负荷分配至电价更低的边缘数据中心；3）110 kV 变电站建设的数据中心由于规模更大，服务器数量更多，其基础待机能耗也已是一项较大的用电负荷。结合图 6(b)可知，在电价低谷时段（23：00-7：00），尽可能将信息负荷转移至电价更低的 35 kV 边缘数据中心，而在平时段与峰时段则大多转移至 110 kV 边缘数据中心。




(a)典型日负荷曲线　　(b)工作服务器数量

图 6 各边缘数据中心实时运行曲线

Fig.6 Real-time operation curve of each edge data center

## 4.3 融合型变电站综合运行分析

融合型变电站典型日净收益值曲线如图 7 所示。充电站通过收取入站车辆充电费与服务费进行营利，而数据中心营利方式则为机柜出租，实时收益由年租金均摊到每日得到。数据中心收益为融合型变电站主要收益来源。收益图中各曲线 0:00-7:00 的低谷是由储能电池分段充电造成，此时处于低谷电价故而充电成本不高；7:00-8:00 各收益曲线均出现降低现象，这是电价从谷时电价转变为平时电价导致的，其中 110 kV 站收益下降尤为明显，这是由于随电价信号变化，110 kV 站成为实时电价最低的融合型变电站，信息负荷

厦门大学学报（自然科学版）

遵循成本最低原则，大部分被转移至 110 kV 数据中心；8:00 后各站收益曲线开始剧烈波动，这是主要是电价高峰时段电池分段放电以削减成本导致，此外充电站运营收入也为融合型变电站成本削减带来积极作用；电池放电带来的收益波动持续至 11:00，此时峰时电价结束；电价处于平时段，各储能站开始充电，110 kV 储能站从 13:00 左右开始分段充电，直至到达设定的电量上限，使收益曲线出现 3 个低谷，2 个 35 kV 储能站分别在 11:00 与 12:00 左右开始分段充电，收益曲线呈现 2 个低谷，2 个 10 kV 储能站在 13:00 左右开始充电，曲线形成明显尖峰；同理，18:00 以后高峰电价时段的收益波动也由电池放电以及充电站运营收入补偿所致；23:00 以后电价信号重回低谷，信息负荷向低成本的 35 kV 站与 10 kV 站转移，使得 110 kV 站的收益大幅回升，其余各站收益则有所降低。

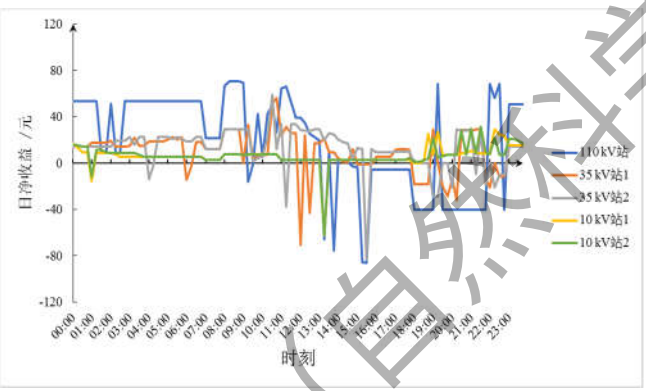



图 7 融合型变电站典型日净收益值曲线

Fig.7 Typical daily net profit curve of integrated substation

多站协同运行方式与传统独立运行方式的典型日净收益值对比如图 8 所示，年净支出对比如图 9 所示。传统独立运行方式是指充电站、数据中心站与储能电站均独立运行，储能电站仅作为数据中心后备电源使用，不参与日常电力调度，各边缘数据中心间不进行信息负荷的分配调度，仅处理各分管区域产生的信息负荷。由图 8 可见，在高峰电价时段，协同站的净收益值有大幅提高，而电价较低的某些时刻协同站净收益低于传统站，这是储能电站在电价低时充电，电价高时放电导致的；除储能电站发挥作用而产生的大幅收益变化外，协同站净收益在全时段均较传统站有所提高，这则是在对各边缘数据中心数据处理任务进行整合再分配时，尽可能将信息负荷转移至电价低的数据中心所致；此外，由图 9 可见，协同站的年购电费用相比传统站有明显降低，而年维护费用略微升高。通过计算，协同站的典型日净收益值较传统站提升 54.87%，年净支出则降低 19.68%。可见，利用数据中心信息负荷的转移调度与储能电站充放电行为的策略控制，确实可以显著提升协同站的经济性。

厦门大学学报（自然科学版）

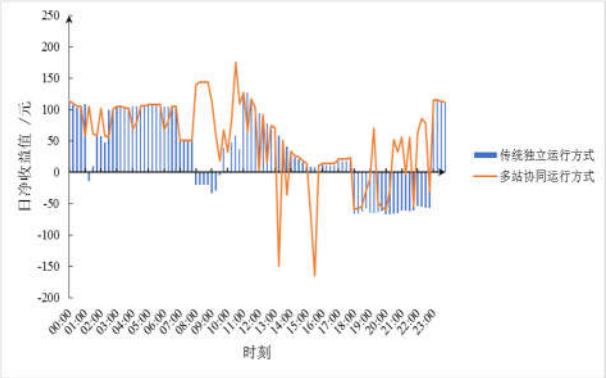



图 8 典型日净收益值对比图

Fig.8 Comparison of typical daily net profit

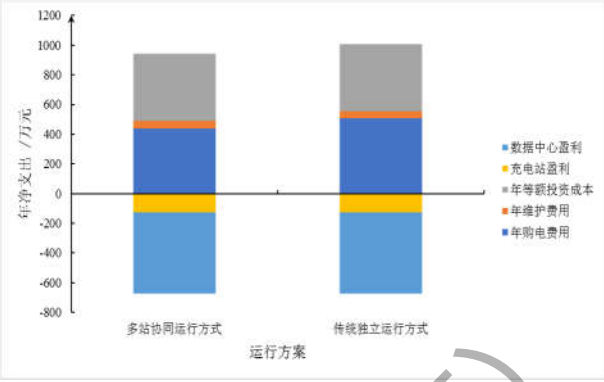



图 9 年净支出对比图

Fig.9 Comparison of annual net expenditure

## 4.4 关于信息负荷类型比例的敏感性分析

通过改变Ⅰ型信息负荷与Ⅱ型信息负荷的比例研究不同信息负荷类型所占比例对融合型变电站净收益值的影响。调整Ⅰ型信息负荷占信息负荷总量的比例，分别计算协同站日净收益与数据中心单日用电总量，对上述结论进行验证。如图 10 所示，随着时延要求更高的Ⅰ型信息负荷占信息负荷总量的比例增加时，数据中心日用电量降低，协同站日净收益值升高，基本呈线性变化。这是由于Ⅰ型信息负荷虽然具有更高的时延要求，但由于此类任务的处理计算量更小，因此服务器将花费更少的时间对其进行计算处理，即具有更高的服务效率。故而当此类型任务比例增加时，虽然对时延的要求更高，工作服务器数量反而有所降低，因此数据中心的用电量更低，净收益则有所提高。由于仅考虑两种任务类型，曲线呈简单线性变化。

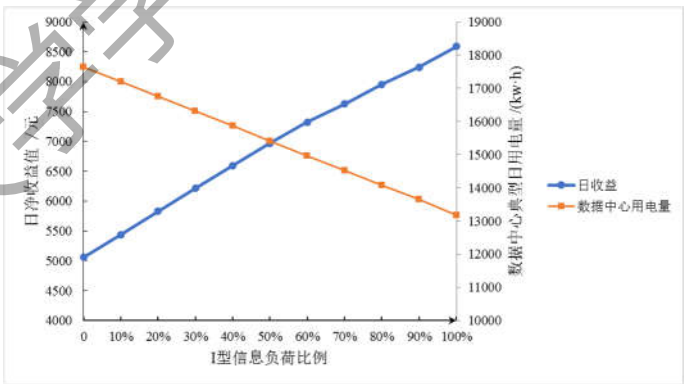



图 10 协同站日净收益值及数据中心典型日用电量关于Ⅰ型信息负荷比例的变化曲线

Fig.10 The curve of typical daily net profit curve of integrated substation and daily electricity consumption of data center to the information load Ⅰ ratio

# 5 结 论

本文针对涵盖数据中心、电动汽车充电站、储能电站等多个功能站的融合型变电站一体化运营方式展开研究，将网络信息负载到达作为泊松过程处理，采用蒙特卡洛方法对电动汽车充电站负荷进行模拟，以

厦门大学学报（自然科学版）

最小化年净支出为目标函数，建立了多站协同优化运行模型。通过对模型进行求解与分析，得到以下结论：

1）电动汽车充电站负荷曲线存在明显的峰值，且在时间上恰好与电网供电高峰时间相符，随电动汽车保有率的不断增大，大量电动汽车入网充电将对电网运行带来极大冲击，开展多站协同运行优化有利于提高电力系统稳定性；

2）重新规划数据中心后备电源规模，将其作为储能电站纳入日常运行调度范围，在电价低谷与平时段充电蓄能，电价高峰时段放电供能，可以转移高峰负载，促进电动汽车平滑入网，实现协同站最优经济运行；

3）在满足时延约束的前提下，将数据处理任务进行整合再分配，尽可能将信息负荷转移至电价较低且具有富余计算能力的边缘数据中心，可以实现电力负荷的空间转移，进而有效削减协同站运行成本；

4）对于延迟敏感型数据任务，随着低时延数据任务比例增大，协同站单日净收益值也有所增大，且由于本文仅考虑两种数据任务类型，曲线呈线性变化。

本文对变电站、边缘数据中心、电动汽车充电站、储能电站的联合调度与协同运行展开研究，利用混合整数非线性规划进行单目标优化进而得到融合型变电站最优运行方案。考虑更多数据负荷类型的信息负荷调度方法、涵盖多种车型与充电模式的电动汽车充电站的融合型变电站运行规划以及多目标运行优化将成为下一步研究方向。

## 参考文献


[1] 郭玉华，贾宝军，侯乐，等. 基于 RSD 的边缘数据中心构建方法研究[J]. 信息通信技术，2018，12(5)：16-21.

[2] 多杰才让，张玲，吴稀西，等. 变电站建设融合发展新模式浅析[J]. 青海电力，2019，38(3)：24-26, 30.

[3] MASANET E, SHEHABI A，LEI N，et al. Recalibrating global data center energy-use estimates[J]. Science，2020，367(6481)：984-986.

[4] ANDRAE A S，EDLER T. On global electricity usage of communication technology：trends to 2030[J]. Challenges，2015，6(1)：117-157.

[5] SCHÄUBLE J，KASCHUB T，ENSSLEN A，et al. Generating electric vehicle load profiles from empirical data of three EV fleets in Southwest Germany[J]. Journal of Cleaner Production，2017，150：253-266.

[6] BHAT N G，PRUSTY B R，JENA D. Cumulant-based correlated probabilistic load flow considering photovoltaic generation and electric vehicle charging demand[J]. Frontiers in Energy，2017，11(2)：184-196.

[7] BAE S，KWASINSKI A. Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2011，3(1)：394-403.

[8] ANASTASIADIS A G，KONSTANTINOPOULOS S，KONDYLIS G P，et al. Electric vehicle charging in stochastic smart microgrid operation with fuel cell and RES units[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2017，42(12)：8242-8254.

[9] 许威，吕林，许立雄，等. 基于马尔可夫链的电动汽车充电需求计算[J]. 电力系统及其自动化学报，2017，29(3)： 12-9.

[10] 刘文霞，龙日尚，徐晓波，等. 考虑数据新鲜度和交叉熵的电动汽车短期充电负荷预测模型[J]. 电力系统自动化，2016，40(12)：45-52.

[11] JIN M，FENG W，LIU P，et al. MOD-DR：microgrid optimal dispatch with demand response[J]. Applied Energy，2017，187：758-776.


厦门大学学报（自然科学版）

[12] CRÉMEL S，GUO M，BUSTOS-TURU G，et al. Optimal design of urban energy systems with demand side management and distributed generation[J]. Computer Aided Chemical Engineering，2017，40：2371-2376.
[13] ROJAS-ZERPA J C，YUSTA J M. Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2015，52：557-571.
[14] PAN Z，GUO Q，SUN H. Feasible region method based integrated heat and electricity dispatch considering building thermal inertia [J]. Applied Energy，2017，192：395-407.
[15] GU W，WANG Z，WU Z，et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2016，8(5)：2332-2342.
[16] 崔全胜，白晓民，董伟杰，等. 用户侧综合能源系统规划运行联合优化[J]. 中国电机工程学报，2019，39(17)：4967-4981，5279.
[17] 卫志农，张思德，孙国强，等. 计及电转气的电–气互联综合能源系统削峰填谷研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(16)：4601-4609，885.
[18] 张津珲，王旭，蒋传文，等. 计及交通流量不确定性的多网耦合综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术，2019(9)：3081-3089.
[19] 曾鸣，彭丽霖，孙静惠，等. 兼容需求侧可调控资源的分布式能源系统经济优化运行及其求解算法[J]. 电网技术，2016，40(6)：1650-1656.
[20] LIU L，SUN H，LI C，et al. RE-UPS：an adaptive distributed energy storage system for dynamically managing solar energy in green datacenters[J]. the Journal of Supercomputing，2016，72(1)：295-316.
[21] SRIKANTAIAH S，KANSAL A，ZHAO F. Energy-aware consolidation for cloud computing [J]. Cluster Computing，2008，12(1)：10.
[22] LUO Y，ANDRESEN J M，CLARKE H，et al. A decision support system for waste heat recovery and energy efficiency improvement in data centres[J]. Applied Energy，2019，250：1217-1224.
[23] MIRHOSEININEJAD S，MOAZAMIGOODARZI H，BADAWY G H，et al. Joint data center cooling and workload management：a thermal-aware approach[J]. Future Generation Computer Systems，2020，104：174-186.
[24] ALQAWASMEH A M，PASRICHA S，MACIEJEWSKI A A，et al. Power and thermal-aware workload allocation in heterogeneous data centers[J]. IEEE Transactions on Computers，2015，64(2)：477-491.
[25] 郁善金.智能电网环境下基于价格的数据中心电力成本优化 [D]. 合肥：中国科学技术大学，2015.
[26] 杨挺，李洋，盆海波，等. 基于需求侧响应的数据中心联络线功率控制方法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(19)：5529-5540，830.
[27] 孟超，刘文亮，杨琪，等.“多站融合”背景下边缘数据中心运行优化研究[J]. 工程科学与技术，2020，52(4)：49-55.
[28] 蒋京鑫.数据中心的绿色化发展方向探讨[J].信息通信技术与政策，2020(6)：17-20.
[29] 郭丰.中国数据中心能效管理政策分析[J].中国信息化，2020(8)：8-10.
[30] 陆传赉. 排队论[M]. 第 2 版. 北京：北京邮电大学出版社，2009.
[31] 谷立静，周伏秋，孟辉. 我国数据中心能耗及能效水平研究 [J]. 中国能源，2010，32(11)：42-45, 29.
[32] 李剑飞. 分布式光通信网络环境下能耗技术研究[D]. 北京：北京邮电大学，2013.

# Operation optimization of integrated substation considering information load scheduling

YANG Qi[1]， MENG Chao[1*]， MEI Chao[2]， ZHAO Yingru[1]， GUO Yiyun[2]

(1.College of Energy， Xiamen University， Xiamen 361102， China;
2. State Grid Xiamen Electric Power Supply Company， Xiamen 361000， China)

厦门大学学报(自然科学版)

**Abstract:** As a new operation mode integrating multiple function stations, an integrated substation provides a new direction for planning and operating edge data centers and electric vehicle charging stations. In addition, as a typical integrated energy system, its operation optimization needs to be further studied. In order to address issues in collaborative optimization of each function station in the integrated substation, a fusion-station operation architecture including a data center, an energy storage power station, and an electric vehicle charging station was designed in this paper. Then a multi-station collaborative operation optimization model with the goal of minimizing the total annual cost was established. And an optimal operation strategy of the integrated substation was proposed. Through solving the optimization model, an optimal operation scheme of the integrated station was determined. The results demonstrate that the load curve of electric vehicle charging stations has obvious peak-valley characteristics and is consistent with the peak time of power consumption of the grid. Thus, the connection of electric vehicle charging stations with integrated substations will further aggravate the pressure of power supply. Via flexible scheduling of energy storage power stations and information loads, the transfer of power loads in time and space and from peak loads to valley loads can be realized, so as to promote smooth access of the electric vehicles to the grid and significantly reduce the operation cost. In addition, the daily net profit of the collaborative substation increases with the proportion of the low delay information load with a nearly linear relationship.

**Keywords:** integrated substation; information load scheduling; edge data center; energy storage power station; electric vehicle charging station

厦门大学学报（自然科学版）