

# 考虑时间延迟的电动汽车充电站调度策略

黄晨浩, 张巍

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年1月30日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月28日

## 摘要

在电力市场环境下,充电站合理优化策略能降低电力成本,甚至通过售电获取收益。文中考虑了电动汽车成为柔性储荷资源的潜力,提出了电力市场和实时电力市场下充电站的调度策略。首先,建立了可调度潜力模型和实时可调度潜力评估模型。同时,考虑充电站与调度中心间的通信延迟,建立了时间延迟计算模型。然后,提出了考虑时间延迟的充电站调度模型策略。最后,基于一个IEEE 33节点配电系统进行了仿真,验证所提策略的有效性。仿真结果表明所提出的可调度潜力计算方法能够增强电动汽车集群参与调度的实时性。

## 关键词

电动汽车, 可调度资源, 时间延迟

# Scheduling Strategies for Home Energy Management Systems Considering Time Delays

Chenhao Huang, Wei Zhang

College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 21<sup>st</sup>, 2024; published: Mar. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Under the power market environment, a reasonable optimization strategy for charging stations can reduce the cost of electricity and even generate revenue through the sale of electricity. In this paper, the potential of electric vehicles to become a flexible load storage resource is considered, and the scheduling strategy of charging stations under power market and real-time power market is proposed. First, a dispatchable potential model and a real-time dispatchable potential assess-

ment model are developed. At the same time, a time delay calculation model is established by considering the communication delay between the charging station and the dispatching center. Then, a charging station scheduling modeling strategy considering time delay is proposed. Finally, simulations based on an IEEE 33-node distribution system are conducted to verify the effectiveness of the proposed strategy. The simulation results show that the proposed schedulable potential calculation method can enhance the real-time performance of EV cluster participation in scheduling.

## Keywords

Electric Vehicle, Dispatchable Resources, Timeliness

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

日益加剧的传统化石能源危机和环境污染问题促使政府采取重要措施推动可再生能源的发展,以推进能源改革并构建环境友好型社会[1]。在目前的情况下,电动汽车通常被视为常规负荷,这导致了储能能力的浪费[2]。动力电池是电动汽车所使用的一种可控制的能源,能够向电网反向馈电,因此可以作为分布式储能单元来使用。通过电动汽车的充电和放电行为,可以调节负荷需求,实现需求响应。因此,研究电动汽车集群可调度潜力的计算方法以及相应的市场投标策略具有重要的意义。

电动汽车的可调度潜力尚未明确定义。据文献[3]介绍,其提出了一种基于出行矩阵且考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法。该研究发现,电动汽车的充电负荷增加了配电网的负荷峰值,对配电网的安全运行产生了影响。另一方面,文献[4]通过开发时空模型来评估大规模插电式电动汽车对城市配电网的影响。该研究采用了智能交通研究中的 OD (Origin-Destination) 分析方法,对电动汽车的移动性进行了建模。此外,文献[5] [6]构建了 EVA 参与电力市场的商业框架,通过有充放电为系统提供灵活性服务,但该框架仅涉及单一灵活性资源。在文献[7]中,研究人员设计了一个考虑电力市场和电动汽车充电行为不确定性的随机优化模型,以确定电动汽车聚合商在未来市场中的最佳竞价策略。类似地,文献[8]提出了一种电动汽车代理商在现货电力市场中参与的最优竞价策略,旨在满足电动汽车的灵活用能需求的同时,将电动汽车的充电成本最小化。这一策略基于电动汽车的可控负荷和移动储能特性。文献[9] [10] [11]通过考虑电动汽车的充电行为、充电利润、建立惩罚模型的方式,以实现电动汽车有序充电,减少电动汽车无序充电对于电网的影响。

上述对于电动汽车调度时,需要代理商、聚合商等与上层电网或调度中心进行数据沟通,并向下层电动汽车或充电站进行数据采集,在此过程中将会产生通信延迟,这将影响电动汽车的可调度资源的实时性,当可调度资源实时性越低时,实际参与需求响应的可调度资源将远低于理想值。

## 2. 考虑时间延迟的充电站需求响应调度框架

当大量电动汽车参与需求响应并通过无线网络和调度中心交换信息,数据流量将激增,给网络带宽管理带来巨大挑战[12] [13]。此外,电动汽车用户产生的数据流量会根据其设备使用情况而动态变化,从而影响信息上传和下载的及时性,进而影响调度方案的有效性。根据文献[14],云中心可以解决带宽密集型应用带来的挑战。云中心可以通过将基础设施(数据中心)分布在大范围内,有效满足动态带宽需求,提

高数据传输的及时性。另一方面, 长距离数据传输将消耗大量能源, 造成巨大的经济成本。

因此本文基于云边协同的调度框架, 边缘节点根据电动汽车用户参与需求响应心理决定可调度资源量, 云中心根据不同的边缘节点数据传输至云中心的时间延迟确定可调度资源的调度方案。具体调度框架如下图 1 所示。

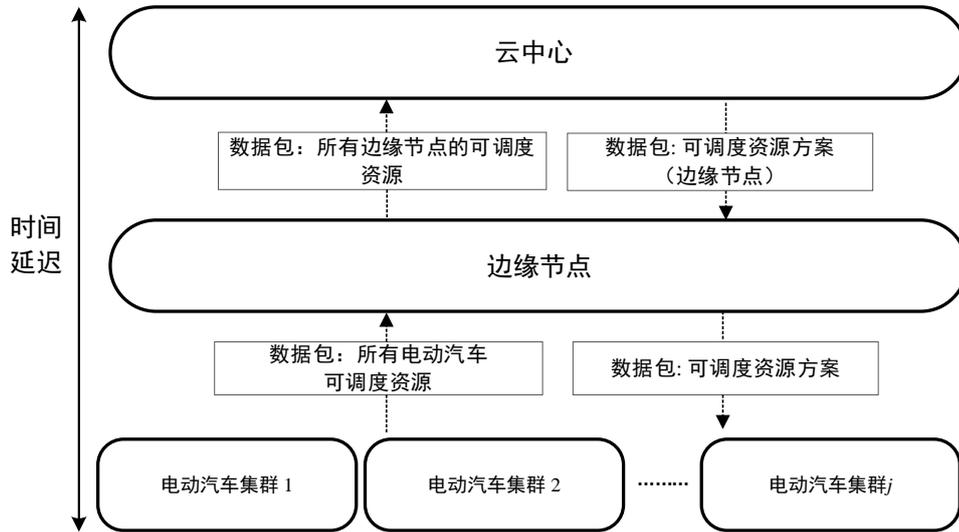


Figure 1. Load resource scheduling strategy considering time delay  
图 1. 考虑时间延迟的负荷资源调度策略

图 1 所示的调度策略中, 本文将边缘节点视为电动汽车运行商, 负责采集所管辖的电动汽车集群的充放电信息, 云中心视为调度中心, 负责处理边缘节点上传的电动汽车可调度资源, 生成调度计划, 并将调度计划下发至各边缘节点。具体步骤如下: 边缘节点将各电动汽车集群上传的可调度资源信息进行整合, 减少云中心的计算量, 并将整合后包含所有可调度信息的数据包上传至云中心, 进行整体的可调度资源调度。当云中心接受边缘节点上传的数据后, 计算生成各边缘节点所应提供的可调度资源方案后, 并下发至各边缘节点, 各边缘节点接受任务后, 对其所管辖的电动汽车集群下发调度指令。然而在调度过程中所有电动汽车用户都将上其可调度负荷的用电信息, 这将产生巨大的通信延迟, 对调度方案的实时性造成巨大的影响, 实际提供的可调度资源量将远低于理想值。因此本文将建立考虑时间延迟电动汽车充电站调度策略。

### 3. 模型建立

#### 3.1. 家庭能量管理系统模型建立

实时阶段电动汽车管理问题的目标函数如公式(1)所示。在本例中, 电动汽车视为储能装置, 运营商即边缘节点通过分布式充电桩采集用户的充电信息, 在满足用户出行需求的前提下, 将信息电动汽车的信息上传至云中心。每个节点内的电动汽车的目标是通过实时调度使其综合指标最小化, 目标函数有两部分构成, 目标函数的第一部分表示电动汽车在  $t$  时刻的购电成本, 第二部分表示电动汽车设备被调度对用户用电体验的影响。值得注意的是, 本文电动汽车的停止时间  $t_{end}$  和开始时间  $t_{start}$  是由用户决定的。

$$\min_{\pi_{j,t}} C_j = \eta_1 \sum_{t=1}^T \pi_{j,t} (P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{dis}) \Delta t + \eta_2 \sum_{z=1}^Z \frac{\sum_{t=1}^{\xi} \ell_{z,j,t}(t) T}{t_{end} - t_{start}} \quad (1)$$

其中,  $Z$  为节点内电动汽车用户集合,  $\eta_{1,2}$  为权重系数,  $\xi$  为调度时间节点数,  $P_{j,t}^{\text{ch}}$  为运营商  $j$  在  $t$  时刻充电量,  $P_{j,t}^{\text{dis}}$  为运营商  $j$  在  $t$  时刻放电量,  $\pi_{j,t}$  为运营商  $j$  在  $t$  时刻动态电价,  $\ell_{z,j}$  为受运营商  $j$  管辖的电动汽车  $z$  在  $t$  时刻的运行状态,  $t_{\text{start/end}}$  为用户设置的设备启停时间,  $T$  为整体调度时间段长度,  $\Delta t$  为调度间隔,  $\xi$  为调度节点数, 即  $T/\Delta t$ 。

电动汽车运营商在参与需求响应时应满足电量充放电约束, 如公式(2)所示。

$$P_{j,t} = P_{j,t-1} + \Delta P_{j,t} + \eta^{\text{ch}} P_{j,t}^{\text{ch}} \Delta t - \frac{\eta^{\text{ref}} P_{j,t}^{\text{dis}} \Delta t}{\eta^{\text{dis}}} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

其中,  $P_{j,t}$  为运营商  $j$  在  $t$  时刻的电量,  $\Delta P_{j,t}$  为运营商  $j$  在  $t$  时刻由于电动汽车参与充放电的电量变化量,  $\eta^{\text{ch}}$  为充电速率,  $\eta^{\text{ref}}$  为充放电补充系数,  $\eta^{\text{dis}}$  为放电速率。

电动汽车运营商在单位时间内的充放电上下限如公式(3), (4)所示。

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{ch}} \leq P_{j,t}^{\text{ch,max}} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{dis}} \leq P_{j,t}^{\text{dis,max}} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

其中,  $P_{j,t}^{\text{ch,max}}$  和  $P_{j,t}^{\text{dis,max}}$  为运营商  $j$  在  $t$  时刻充电和放电的上限。

汽车运营商的总电量约束, 如公式(5)所示。

$$P_{j,t}^{\text{min}} \leq P_{j,t} \leq P_{j,t}^{\text{max}} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

其中,  $P_{j,t}^{\text{min}}$  和  $P_{j,t}^{\text{max}}$  为运营商  $j$  在  $t$  时刻总电量的上下限。

由于电动汽车可以在运行过程中自由改变其开关状态, 不会对用户的使用产生重大影响, 因此调度过程中的运行状态如公式(6)所示。

$$\sum_{t=\Gamma+1}^{\Gamma+T} \ell_t^m \geq t_{\text{total}} \quad \Gamma \in [t_{\text{start}} - 1, t_{\text{end}} - t_{\text{total}}] \quad (6)$$

其中,  $\Gamma$  为 IL 设备的再次启动时间,  $t_{\text{total}}$  为用户设置的总充电时间。

电动汽车运营商在参与需求响应的过程中还应满足功率平衡和支路功率平衡的约束, 功率平衡公式如式(7)所示, 支路功率平衡如式(8)所示。

$$P_{ij,t} - \sum_{k \in \Omega_j} P_{jk,t} = P_{j,t}^{\text{Load}} + P_{j,t}^{\text{ch}} - P_{j,t}^{\text{dis}} \quad \forall j \in N_L, \forall t \in T \quad (7)$$

其中,  $P_{ij,t}$  为  $t$  时刻节点  $(i, j)$  间的传输功率,  $P_{j,t}^{\text{Load}}$  为节点  $j$  在  $t$  时刻的固定负荷,  $\Omega_j$  为节点  $j$  除去节点  $i$  的关联节点。

$$-P_{ij,\text{max}} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij,\text{max}} \quad (8)$$

其中,  $P_{ij,\text{max}}$  为节点  $(i, j)$  间的传输功率上限, 其中正值为由节点  $i$  传输至节点  $j$ , 反之为负值。

公式(2)~(8)为电动汽车集群的约束条件, 接下来将以单一电动其次为例, 其充电方式为“充电 - 停止”、“停止 - 放电”的模式, 其功率约束如公式(9)~(11)所示。

$$S_{z,t+\Delta t} = S_{z,t} - P_{z,t} \quad (9)$$

$$\sum_{t=t_{z,s}}^{t_{z,d}} (-P_{z,t}) + S_{z,s} = S_{z,\text{max}} \quad (10)$$

$$P_{z,t} \in \{0, -P_{z,0}\} \quad (11)$$

其中,  $P_{z,t}$  和  $P_{z,0}$  为电动汽车  $z$  的充放电功率、额定充电功率,  $S_{z,s}$  为电动汽车  $z$  的当前荷电状态,  $S_{z,\text{max}}$

为电动汽车  $z$  的荷电状态上限,  $S_{z,t}$  为电动汽车  $z$  在  $t$  时刻的荷电状态。

### 3.2. 考虑时间延迟的调度策略模型

由于每个边缘节点和云中心的计算资源有限, 因此每个灵活资源调度任务在其管辖的边缘节点上执行时将产生计算延迟。另外在数据传输阶段, 由于云中心、边缘节点和电动汽车集群之间往往不在同一节点, 因此将产生传输延迟。

当可调度资源调度任务上传到所属的边缘节点  $j$  时, 如果 EN 当前剩余的计算资源满足当前任务计算所需的计算资源, 则在该边缘节点执行任务  $y$ , 整体时延如公式(12)所示。

$$T_t^{LE} = T_{BN \rightarrow LE,t}^{td} + T_{LE,t}^{cd}, \forall t \in T^{sch}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} cpu_{y,t} \leq cpu_{q,t} \\ mem_{y,t} \leq mem_{q,t}, \forall y \in Y, \forall j \in J, \forall t \in T \\ f_{j,t} > f_{\min,y,t} \\ T_t^{LE} < t_{\max,y,t} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $T^{LE}$  为任务在边缘节点计算完成所需的时间,  $T_{BN \rightarrow LE}^{td}$  为电动汽车集群至边缘节点的传输时间,  $T_{LE}^{cd}$  为边缘节点的计算延迟,  $f_q$  为边缘节点  $j$  的最大计算能力,  $mem_j$  为边缘节点  $j$  的可用存储资源,  $cpu_j$  为边缘节点  $j$  的剩余 CPU 资源,  $t_{\max}$  为最大允许延迟,  $f_{\min,y}$  为电动汽车集群  $y$  所需的最小计算能力。

公式(13)描述了从电动汽车到其所属边缘节点的传输延迟。传输路径选择电动汽车集群与边缘节点之间传输延迟最短的链路。

$$T_{BN \rightarrow LE,t}^{td} = \frac{data_{y,t}}{R_{j,y,t}}, \forall y \in Y, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (13)$$

其中,  $data_{y,t}$  为电动汽车集群  $y$  在  $t$  时刻的数据包大小,  $R_{j,y,t}$  为电动汽车集群  $y$  与边缘节点  $j$  在  $t$  时刻的传输速率。

传输速度由香农公式求得, 如公式(14)。

$$R_{j,y,t} = B_{next,j,y}^t \log_2 \left( 1 + \frac{P_l}{n_0 B_{next,j,y}^t} \right), \quad (14)$$

$$\forall y \in Y, \forall j \in J, \forall t \in T$$

其中,  $B_{next,j,y}^t$  为信道之间的带宽,  $p_l$  表示移动设备的发射功率,  $n_0$  表示噪声参数。

边缘节点的计算延迟如公式(15)所示。

$$T_{LE,t}^{cd} = \frac{w_{y,t}}{f_{j,t}}, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (15)$$

边缘节点的计算能力会随着处理的任务节点上传的任务数量的增加而降低, 如公式(16)。

$$f'_{j,t} = f_{j,t} - f_{\min,y,t}, \forall y \in Y, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (16)$$

当边缘节点整合其管辖所有电动汽车集群内的可调度资源数据包后, 上传至云中心, 由于云中心计算能力远高于边缘节点, 如公式(17)~(19)所示。

$$T_t^{CD} = T_{EN \rightarrow CD,t}^{td} + T_{CD,t}^{cd},$$

$$EN \in Edge = \{Ed_1, Ed_2, \dots, Ed_j\}, \forall t \in T \quad (17)$$

$$\text{s.t. } T_t^{CD} < t_{\max,j,t}$$

其中,  $T_t^{CD}$  为  $t$  时刻云中心的总延迟,  $T_{EN \rightarrow CD,t}^{td}$  为  $t$  时刻边缘节点至云中心的传输延迟,  $T_{CD,t}^{cd}$  为  $t$  时刻云中心的计算延迟,  $t_{\max,j,t}$  为  $t$  时刻边缘节点任务的最大忍受延迟。

$$T_{Ed \rightarrow CD,t}^{td} = \frac{data_{q,t}}{R_{p,t}}, \forall j \in J, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (18)$$

$$T_{CD,t}^{cd} = \frac{w_{j,t}}{f_{p,t}}, \forall j \in J, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (19)$$

公式(18), (19)其原理与公式(13), (15)相似, 因此, 此处再在赘述。

根据公式(11)~(18)所示的时间延迟计算公式, 与公式(1)相结合, 更新目标函数如公式(20)所示。区别在于公式的第一部分实际的可调度资源应减除由数据传输过程产生的时间延迟导致的损失值。

$$\min C_j = \eta_1 \sum_{t=1}^T \pi_{j,t} (P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{dis}) (T^{sch} - T_t^{LE}) \Delta t + \eta_2 \sum_{z=1}^Z \frac{\sum_{t=1}^Z \ell_{z,j,t}(t) T}{t_{end} - t_{start}} \quad (20)$$

## 4. 算例分析

### 4.1. 参数设置

调度周期为 24 小时, 仿真步长为 15 分钟, 时间跨度为 08:00~次日 08:00。其电价如图 2 所示, 其中负荷高峰处于 06:00~08:00 和 12:00~14:00, 电价为 0.9 元/kWh; 负荷谷峰为 08:00~12:00, 电价为 0.1 元/kWh。目标函数的权重参数为 0.19、2。在 IEEE 33 节点中, 云中心、边缘节点以及电动汽车配置如表 1 所示, 其中云中心为节点 1, 有 3 个边缘节点, 受管辖节点各包含不同数量的电动汽车充电站, 对于电动汽车充电站数量为 0 的节点, 不参与需求响应。电动汽车充放电效率为 0.95, 充放电修正系数为 0.25, 充电功率为 6.61 kW/h, 初始电池容量为 15%, 最大电池容量为 90%, 额定电池容量为 30 kW, 每个充电站内电动汽车数量为 200~500。

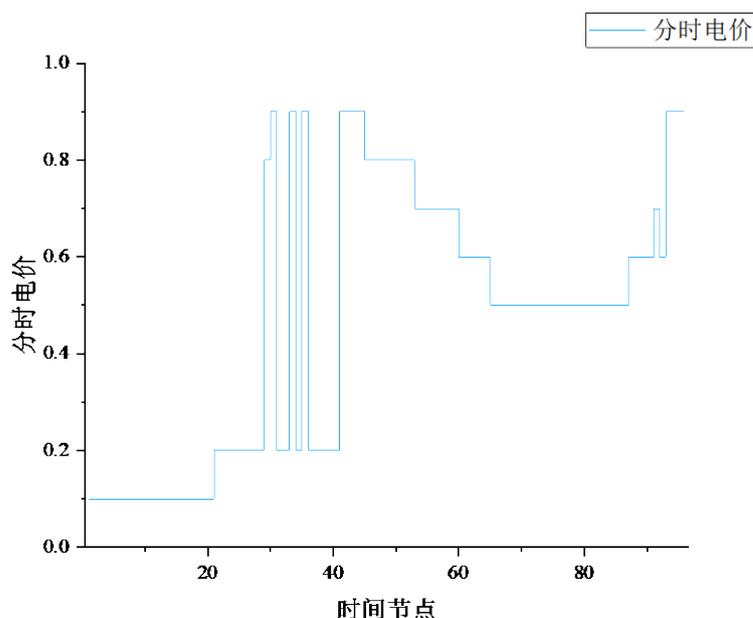


Figure 2. Time-of-Use tariff map

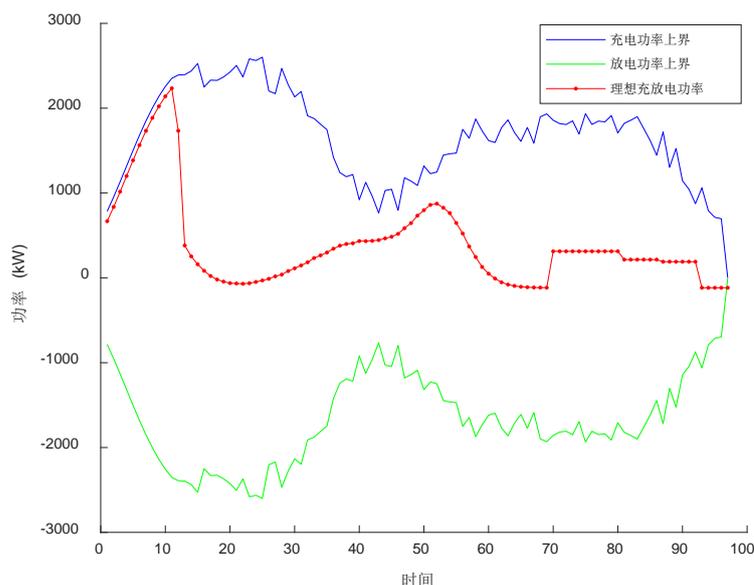
图 2. 分时电价图

**Table 1.** Cloud edge frame and charging station configuration sheet  
**表 1.** 云边框架及充电站配置表

管辖节点	边缘节点	电动汽车充电站数量
2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 25, 26	3	0, 0, 0, 2, 4, 0, 1, 0, 2, 3, 4, 1, 0, 2, 2, 0
12, 13, 21, 22, 23, 24, 27, 30	21	1, 0, 2, 0, 4, 2, 3, 0
8, 9, 28, 29, 19, 31, 32, 33	31	0, 2, 4, 0, 0, 1, 1, 0

### 4.2. 仿真分析

本节选取节点 5 中的 2 号电动汽车充电站为例进行分析。图 3 为理想状态下的电动汽车充电站调度后的充放电功率，单一充电站可提供的可调度资源是根据当前时间段内电动汽车数量决定的，可调度的资源为充放电上下限所包络的区间。



**Figure 3.** Ideal electric vehicle charging station charging and discharging power  
**图 3.** 理想状态下电动汽车充电站充放电功率

上述可调度资源计算处于理想状态下的调度结果，即无延迟情况下，但在实际调度过程中，可调度资源量越高的同时，意味着同一时间段上传的并发数据包的数量也同时激增，将对原有的通信资源造成极大挑战，产生时间延迟，而时间延迟越高则意味着可调度资源的损失值也越高。如图 4 所示，调度期间内节点 5 中的 2 号电动汽车充电站的通信资源对照图可知，当通信资源实际值高于需求量时，其产生的通信延迟将低于实际值低于需求量时的通信资源。时间延迟越低，可调度资源量也就越高，因此，在可调度资源方案决策生成时应考虑时间延迟。

根据上述分析，我们进一步分析 IEEE 33 节点下的时间延迟。表 2 为 IEEE 33 各节点的布设方案在调度期间内的总时间延迟，其中节点如 3、21、31 节点设置为边缘节点用于收集电动汽车集群上传的可调度资源信息，当该节点内存在电动汽车充电站时，其通信延迟可以忽略不计，其中节点间最小延迟为 25.2 秒，最大延迟为 163.1 秒，越高的时间延迟对于可调度资源，其损失值也将越高，如图 5 所示。在图 5 中，在实际调度中由于时间延迟的存在，其实际可提供的调度资源远低于理想状态下的充放电功率，其损失值最大为 11 时刻的 254.4 kW，最小为 93 时刻的 192.4 kW。

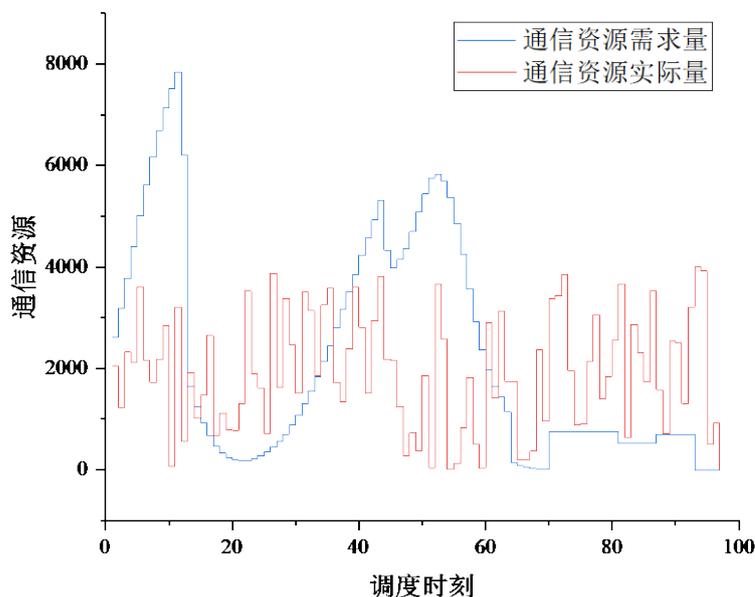


Figure 4. Requirements for communications resources  
图 4. 通信资源需求图

Table 2. Edge nodes and service nodes without schemes and their delays

表 2. 边缘节点和电动汽车集群设置方案及其总延迟

管辖节点	边缘节点	时间延迟
2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 25, 26	3	0, 0, 0, 25.2, 236.7, 0, 121.5, 0, 65.5, 73.3, 163.1, 67.5, 0, 71.6, 53.3, 0
12, 13, 21, 22, 23, 24, 27, 30	21	34.9, 0, 53.9, 0, 139.1, 67.5, 85.1, 0
8, 9, 28, 29, 19, 31, 32, 33	31	0, 71.6, 121.5, 0, 0, 33.6, 42.8, 0

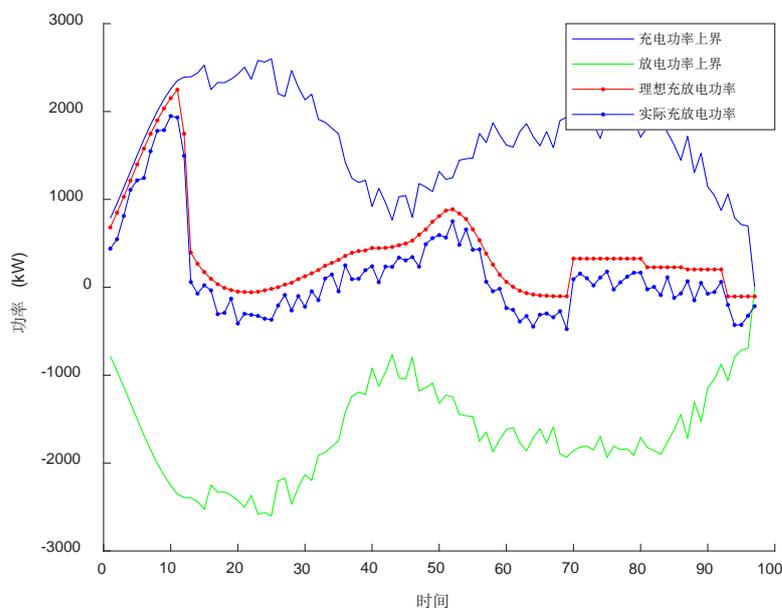


Figure 5. Actual values of schedulable resources considering time delay  
图 5. 考虑时间延迟的可调度资源实际值

由上述分析可知, 需求响应阶段, 可调度资源的实际调度受到该节点上传至调度中心进行整体调度的时间延迟影响。

## 5. 总结

本文考虑时间延迟对电动汽车在实际调度过程中的影响, 并通过 IEEE 33 节点进行仿真。仿真结果表明, 在参与需求响应的节点中, 可调度资源损失值最大为 254.4 kW, 最小损失值为 192.4 kW。因此调度期间内, 应考虑时间延迟对于负荷需求侧的影响, 将因时间延迟而减少的可调度资源损失值考虑进调度策略中, 避免因时延延迟而造成需求响应资源不足, 充分利用负荷侧的可调度资源潜力。

## 参考文献

- [1] 闫梦阳, 李华强, 王俊翔, 等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 163-175.
- [2] Vagropoulos, S.I., Balaskas, G.A. and Bakirtzis, A.G. (2017) An Investigation of Plug-in Electric Vehicle Charging Impact on Power Systems Scheduling and Energy Costs. *IEEE Transactions on Power Systems*, **32**, 1902-1912. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2609933>
- [3] 张琳娟, 许长清, 王利利, 等. 基于 OD 矩阵的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 82-91.
- [4] Mu, Y., Wu, J., Jenkins, N., et al. (2014) A Spatial-Temporal Model for Grid Impact Analysis of Plug-in Electric Vehicles. *Applied Energy*, **114**, 456-465. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.006>
- [5] Afentoulis, K.D., Bampos, Z.N., Vagropoulos, S.L., et al. (2022) Smart Charging Business Model Framework for Electric Vehicle Aggregators. *Applied Energy*, **328**, Article ID: 120179. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120179>
- [6] 郑远硕, 李峰, 董九玲, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充放电时空灵活性优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 88-97.
- [7] Zheng, Y., Yu, H., Shao, Z., et al. (2020) Day-Ahead Bidding Strategy for Electric Vehicle Aggregator Enabling Multiple Agent Modes in Uncertain Electricity Markets. *Applied Energy*, **280**, Article ID: 115977. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115977>
- [8] 宫鑫, 林涛, 苏秉华. 电动汽车代理在电力市场的最优竞标策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2596-2602.
- [9] Sterchele, P., Kersten, K., Palzer, A., et al. (2020) Assessment of Flexible Electric Vehicle Charging in a Sector Coupling Energy System Model—Modelling Approach and Case Study. *Applied Energy*, **258**, Article ID: 114101. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114101>
- [10] Alinejad, M., Rezaei, O., Kazemi, A., et al. (2021) An optimal Management for Charging and Discharging of Electric Vehicles in an Intelligent Parking Lot Considering Vehicle Owner's Random Behaviors. *Journal of Energy Storage*, **35**, Article ID: 102245. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102245>
- [11] Subramanian, V. and Das, T.K. (2019) A Two-Layer Model for Dynamic Pricing of Electricity and Optimal Charging of Electric Vehicles under Price Spikes. *Energy*, **167**, 1266-1277. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.171>
- [12] Dai, X., Wang, X. and Liu, N. (2017) Optimal Scheduling of Data-Intensive Applications in Cloud-Based Video Distribution Services. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, **27**, 73-83. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2016.2565918>
- [13] Liu, X., Li, Z., Xu, P. and Li, J. (2021) Joint Optimization for Bandwidth Utilization and Delay Based on Particle Swarm Optimization. *IEEE Access*, **9**, 92125-92133. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3091693>
- [14] Ou, Q., Wang, Y., Song, W., et al. (2021) Research on Network Performance Optimization Technology Based on Cloud-Edge Collaborative Architecture. 2021 *IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*, Nanchang, 26-28 March 2021, 274-278. <https://doi.org/10.1109/ICBAIE52039.2021.9389869>