

王大伟,许宏科,代亮,等.高速公路移动储能车调度策略[J].长安大学学报(自然科学版),2025,45(4):177-188.

WANG Da-wei, XU Hong-ke, DAI Liang, et al. Scheduling strategy for expressway mobile energy storage vehicles[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(4): 177-188.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.04.015

高速公路移动储能车调度策略

王大伟^{1,2},许宏科¹,代亮¹,李积伟¹

(1. 长安大学 电子与控制工程学院,陕西 西安 710064;
2. 洛阳师范学院 物理与电子信息学院,河南 洛阳 471934)

摘要:为解决高速公路沿线柔性负荷与可再生能源发电之间的电能供需不平衡问题,提出一种移动储能车调度策略。该策略利用高速公路管理中心可再生能源发出的电能,为移动储能车装载的储能电池组进行充电,随后调度这些移动储能车前往高速公路服务区,为柔性负荷提供绿色能源。考虑高速公路系统的交通及能源特性,建立移动储能车的时空-储能约束方程。为求解移动储能车的最优行驶路线以及合理的充放电策略,模型被构建为混合整数二次约束规划问题,旨在最大化移动储能车的供电净收益,同时兼顾高速公路行驶成本以及储能电池组的充放电损耗花费。在包含 4 个服务区、1 个管理中心以及 5 辆移动储能车的高速公路系统中,对所提出的调度策略进行了仿真验证。研究结果表明:所提出的调度策略有效实现了高速公路管理中心可再生能源发电的收集及再分配;相较于 2 个对比案例,该策略在可再生能源消纳方面表现最为优越,消纳总量达到了 3 167 kW·h,在满足服务区柔性负荷供电需求方面亦展现出了最佳性能,供电需求满足率达到 45%。研究结果为高速公路运营管理部门提供了科学依据和理论指导,有助于其解决用电需求与绿色供能之间的区域不平衡问题,进而推动高速公路交通与能源系统的融合发展。

关键词:交通工程;移动储能车;柔性负荷;可再生能源发电;高速公路

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2025)04-0177-12

Scheduling strategy for expressway mobile energy storage vehicles

WANG Da-wei^{1,2}, XU Hong-ke¹, DAI Liang¹, LI Ji-wei¹

(1. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. College of Physics & Electronic Information, Luoyang Normal University, Luoyang 471934, Henan, China)

Abstract: To address the supply and demand imbalance between flexible loads along expressways and renewable energy generation, a scheduling strategy for mobile energy storage vehicles (MESVs) was proposed. This strategy utilized the electricity generated from renewable energy at the expressway management center (EMC) to charge the storage battery packs of MESVs. These MESVs were then dispatched to expressway service areas (EMAs) to supply green energy to flexible loads. Considering the traffic and energy characteristics of the expressway system, the

收稿日期:2024-12-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2601401)

作者简介:王大伟(1989-),男,河南洛阳人,讲师,工学博士,E-mail:dwei1523900@163.com。

通信作者:代亮(1981-),男,陕西安康人,教授,工学博士,E-mail:ldai@chd.edu.cn。

spatiotemporal-storage constraint equations for MESVs were established. The model was formulated as a mixed-integer quadratic constraint programming problem to solve for the optimal route and charging/discharging strategies, aiming to maximize the net energy supply benefit while balancing costs from expressway driving and storage battery pack losses. The proposed scheduling strategy was validated in an expressway system that includes four ESAs, one EMC, and five MESVs. The results show that the strategy effectively achieves the collection and redistribution of renewable energy at the EMC. Compared with the two comparative cases, the proposed strategy demonstrates superior performance in renewable energy utilization, achieving a total consumption of 3 167 kW · h. It also shows the best performance in meeting the power supply demands of flexible loads in ESAs, with a demand satisfaction rate of 45%. The findings provide a scientific basis and theoretical guidance for expressway operation and management departments to address the regional imbalance between energy demand and green energy supply, contributing to the integrated development of expressway transportation and energy systems. 5 tabs, 13 figs, 25 refs.

Key words: traffic engineering; mobile energy storage vehicle; flexible load; renewable energy generation; expressway

0 引言

储能设备在交通系统及绿色低碳领域日益受到关注^[1-4]。越来越多可再生能源发电设施被布设在高速公路沿线^[5-8],其出力的时间不确定性为电能消纳带来了挑战。随着高速公路充电配套设施的持续完善,电动汽车、电动卡车及换电电池等柔性负荷的充电需求充满不确定性^[9-13],导致沿线电能供需时空失衡,加剧了弃风弃光现象。此外,原有的高速公路服务区(expressway service area, ESA)变压器额定容量难以满足峰值时刻的柔性负荷供电需求,不但影响了供电系统的可靠性及安全性,而且降低了产生柔性负荷的用户对高速公路运营商的服务满意度。例如,因变压器容量限制导致服务区不能为电动汽车用户提供快速充电服务,将影响这些用户在未来选择高速出行的意愿。移动储能车(mobile energy storage vehicle, MESV)是一辆装载储能电池组的卡车,具有较好的移动性和灵活性^[14-15]。MESV的灵活性能够使其在可再生能源发电富裕的时刻在高速公路补给点补充电能^[16]。同时,利用高速公路快速通行能力,MESV能迅速前往高速沿线不同位置^[17],为柔性负荷供电。因此,优化MESV的路径及充放电策略,是一种解决高速公路沿线供需不平衡问题的有效方法。

使用MESV的想法最早由电力研究所(electric power research institute, EPRI)于2008年提出。

该研究所在一个名为“可移动能源存储系统项目”的研究中将可移动存储设备用于管理电力负载增长并协助配电网的运行。Kwon等^[18]以减少电力及交通能量损失为目标,提出了一种优化移动储能设备路径及充放电时间的调度策略;该策略以时间为度量模拟时变的交通流特征,进而约束移动储能设备的位置和时间。Saboori等^[19]在配电网的场景下,提出了一种移动储能系统建模和运营优化方法;与固定式储能相比,该模型获得了更低的系统运行成本。考虑到运输系统中移动储能设备和维修人员的调度策略,Xu等^[20]提出了一种确定性配电系统关键负荷恢复策略框架,旨在最大限度减少移动储能设备和修理人员的总行程。Yao等^[21]提出了一种优化方法,该方法能够有效协调移动储能系统的车队调度、微电网资源管理和配电系统网络重构,并且以最大限度地降低系统总成本为目标。Abdeltawab等^[17]设计了一种用于移动储能设备的能源管理系统,旨在将从电网购买的电能成本降至最低;该能源管理系统不仅可以可将可再生能源发电转移到用电高峰时段,还可以提供本地化的无功功率支持。Qu等^[22]提出了一种基于移动储能系统和电力交易的柔性增强策略。该策略针对多微电网场景,利用移动储能系统的移动性,降低了多微电网的运行成本,并提高了负荷曲线的平滑性。此外,Kim等^[15]提出了两阶段优化模型,旨在通过移动储能系统和微电网提高配电系统的弹性。Mishra等^[23]提出了一种包括多微电网及MESV的框架,该框架在

极端天气或不可预见时间情况下,通过协同管理电网及MESV,增强供电系统的稳定性。移动储能的研究虽然已经取得了一定进展,然而仍存在一些不足。首先,现有文献主要针对城市道路背景下与供电系统耦合的移动储能问题,对于高速公路场景下的MESV调度问题缺乏研究;其次,文献中的交通模型仅考虑了MESV接入不同电网节点的时间关系,忽略了交通系统的空间特性,这对深入探究MESV移动性尤为重要。

目前,学者们对高速公路场景下MESV调度问题的研究较少^[24-25]。Niu等^[24]通过调度MESV实现了其与高速公路微电网的交互,提出了一种增强型协调式能量调度方案,以取代传统集中式能量调度模型;该方案利用分布式模型预测控制(distributed model predictive control, DMPC)方法,在保持能源供应和用户需求间平衡的前提下,最大限度地减少能源系统调度的成本。Ding等^[25]提出了一种基于深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)方法,以最大限度地提高移动储能系统的收入,同时考虑了电力市场价格的波动。然而,上述研究并未针对高速公路MESV的交通-能源特性进行建模,这对高速公路MESV的研究至关重要。同时,上述模型为单车场景或车队,对于高速公路,应该考虑多辆MESV的问题,进而挖掘其时空灵活性。高速公路具有如下交通-能源特性:①在不超限速的情况下,快速通行的交通特性,使得在高速公路上行驶的车辆具有相对确定的到达时间;②高速公路长距离的供电环境,对于超出供电点(如高速公路服务区)变压器额定功率的电力负荷需求,难以确保供电的可靠性。

为解决现有研究的局限性,本文基于高速公路交通-能源特性,并考虑高速公路管理中心(expressway management center, EMC)的可再生能源发电量和ESA柔性负荷情况,提出一种在高速公路上调度多辆MESV的策略,旨在最大化MESV售电净收入为目标,同时兼顾MESV的高速公路行驶成本及储能电池组充放电损耗花费。该策略利用高速公路管理中心的可再生能源为储能电池组充电,并调度其前往高速公路服务区为柔性负荷供电。将MESV的时空特性和储能特性整合到约束方程上,以表征其在高速公路上的时空与能量的耦合关系。此外,本文将模型构建为混合整数二次约束规划(mixed integer quadratic constraint programming, MIQCP),以求解出MESV的最佳路径、充电/放电

时间以及充电/放电功率。最后,将所提出策略在一个包含5个服务区、1个管理中心以及5辆MESV的交通系统中进行验证。

1 模型描述

1.1 系统框架概述

高速公路运营商管理着其沿线的供电及运转运维设备^[11],它能够调度高速公路上的MESV,并根据高速沿线的供需情况制定MESV的充放电策略。高速公路MESV的运营框架如图1所示,本文假设MESV可以在ESA和EMC中掉头,同时将高速公路2个方向的单行道分别称为左车道和右车道。此外,本文将高速公路分为若干距离相同的路段,如图1中的路段 j_1 和路段 j_1+1 。考虑到行驶成本及时间等因素,本文假设MESV只能在EMC周边一定的范围内行驶及充放电。因此,本文将ESA根据空间位置分为3类,即左侧边界ESA、右侧边界ESA和普通ESA。左侧边界ESA是MESV在左侧车道上行驶的最远位置。右侧边界ESA是MESV在右侧车道上行驶的最远位置。本文假设EMC是MESV在高速公路上唯一的电能供应点。EMC的建筑顶部和其他空闲区域安装了光伏电池(photovoltaics, PV)和风力涡轮机(wind turbine, WT)等可再生能源发电设备。根据前一天预测的不同时段可再生能源发电功率,高速公路运营商决定MESV的储能电池组充电功率和时段。如果EMC中的可再生能源无法满足储能电池组的充电需求,高速公路运营商将从电网中购买无法满足的电能。考虑到高速公路的大地理跨度,本文采用区域边际价格(locational marginal price, LMP)作为EMC的电网购电价格。此外,高速公路运营商根据超出ESA变压器额定功率的柔性负荷需求(如电动汽车充电),调度MESV向这些负荷提供电能。

1.2 变量及参数说明

本文所涉及的参数、集合及变量分别如表1~3所示。

1.3 目标函数

式(1)是目标函数 B ,旨在使调度MESV的净收益最大化,其考虑了MESV的售电收入及运维成本。式(1)的第1项表示MESV在ESA销售电能的总收入;式(1)的第2项表示第 a 个EMC中从电网购买电能的花费;式(1)的第3项表示MESV在ESA中储能电池组的放电损耗成本;式(1)的第

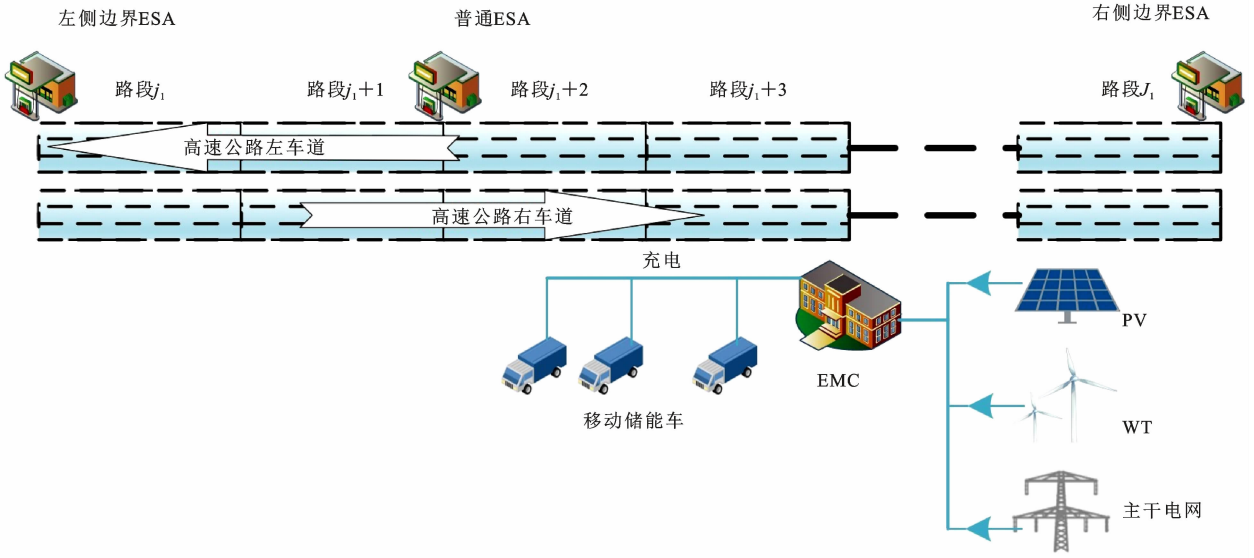


图 1 高速公路移动储能车运行框架示意

Fig. 1 Operation framework of expressway MESVs

表 1 参数说明

Table 1 Parameter description

参数	含义
q^D	每辆 MESV 的储能电池组的放电损耗花费
q^C	每辆 MESV 的储能电池组的充电损耗花费
E^{\max}	每辆 MESV 的储能电池组的额定容量
E^{\min}	每辆 MESV 的储能电池组的最低电量
P_{\max}^D	每辆 MESV 的储能电池组的最大放电功率
P_{\max}^C	每辆 MESV 的储能电池组的最大充电功率
P_{\min}^C	每辆 MESV 的储能电池组的最小充电功率
E^{end}	运营时段结束时,每辆 MESV 的储能电池组的最低电量
N^{limit}	在运营时段内,每辆 MESV 的最大放电次数
v	每辆 MESV 在每个 ESA 的售电价格
u	每辆 MESV 的每公里行驶成本
$E_{j,t}^{\text{demand}}$	在时间段 t ,第 j 个 ESA 中的柔性负荷供电需求
$E_{a,t}^{\text{demand}}$	在时间段 t ,第 a 个 EMC 中的柔性负荷供电需求
$P_{a,t}^{\text{renew}}$	在时间段 t ,第 a 个 EMC 可再生能源发电量
$B_{a,t}^g$	在时间段 t ,第 a 个 EMC 的电网的电价(电网电价根据 LMP)
T	时间段的个数,本文定义每个时间段为 0.5 h
K	MESV 的数量
S	高速公路路段的个数
J	ESA 的个数
A	EMC 的个数

表 2 集合说明

Table 2 Set description

集合	含义
Λ	时间段的集合
Γ	MESV 的集合
Δ	高速公路路段的集合
Θ	高速公路服务区的集合
Ω_L	与路段 s 相邻的左车道可通行路段的集合
Ω_R	与路段 s 相邻的右车道可通行路段的集合

表 3 变量说明

Table 3 Variable description

变量	含义
$X_{s,t,k}^R$	0-1 变量,表示第 k 个 MESV 是否选择在时间段 t 内在高速公路路段 s 的右车道上行驶
$X_{s,t,k}^L$	0-1 变量,表示第 k 个 MESV 是否选择在时间段 t 内在高速公路路段 s 的左车道上行驶
$Y_{j,t,k}^D$	0-1 变量,表示第 k 个 MESV 是否选择使储能电池组在时间段 t 内在第 j 个 ESA 中放电
$Y_{j,t,k}^H$	0-1 变量,表示第 k 个 MESV 是否选择在时间段 t 内在第 j 个 ESA 中停留
$Y_{a,t,k}^C$	0-1 变量,表示第 k 个 MESV 是否选择使储能电池组在时间段 t 内在第 a 个 EMC 中充电
$Y_{a,t,k}^D$	0-1 变量,表示第 k 个 MESV 是否选择使储能电池组在时间段 t 内在第 a 个 EMC 中放电
$Y_{a,t,k}^H$	0-1 变量,表示第 k 个 MESV 是否选择在时间段 t 内在第 a 个 EMC 中停留
$P_{a,t}$	在时间段 t ,第 a 个 EMC 从电网购买的电量
$P_{a,t,k}^C$	在时间段 t ,第 k 个 MESV 在第 a 个 EMC 中的充电功率
$P_{a,t,k}^D$	在时间段 t ,第 k 个 MESV 在第 a 个 EMC 中的放电功率
$P_{j,t,k}^D$	在时间段 t ,第 k 个 MESV 在第 j 个 ESA 中的放电功率
$E_{t,k}$	在时间段 t ,第 k 个 MESV 的储能电池组的电量

4 项表示 MESV 在高速公路上行驶的成本;式(1)的第 5 项表示第 a 个 EMC 中储能电池组的放电和充电损耗成本。式(1)可表示为

$$B = \max \sum_k \sum_j \sum_t v Y_{j,t,k}^D P_{j,t,k}^D - \sum_t P_{a,t}$$

$$B_i = \sum_k \sum_j \sum_t q^D Y_{j,t,k}^D P_{j,t,k}^D -$$

$$\sum_k^K \sum_s^S \sum_t^T u(X_{s,t,k}^R + X_{s,t,k}^L) - \sum_k^K \sum_t^T (q^D Y_{a,t,k}^D + q^C Y_{a,t,k}^C P_{a,t,k}^C) \quad (1)$$

1.4 相关约束

式(2)是对 MESV 时间状态唯一性的约束,表示在每个时间段,每辆 MESV 只能处于 1 种状态,即

$$\sum_j^J Y_{j,t,k}^D + \sum_j^J Y_{j,t,k}^H + \sum_s^S X_{s,t,k}^L + \sum_s^S X_{s,t,k}^R + Y_{a,t,k}^C + Y_{a,t,k}^D + Y_{a,t,k}^H = 1 \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma \quad (2)$$

式(3)是 MESV 在左边界 ESA 中的时空与能量状态转移约束。式(4)是 MESV 在右侧边界 ESA 中的时空和能量状态转移约束。式(5)是 MESV 在普通 ESA 中的时空和能量状态转移约束。式(3)~(5)可分别表示为

$$X_{S_L,t,k}^L + Y_{j_L,t,k}^D + Y_{j_L,t,k}^H = X_{S_L,t+1,k}^R + Y_{j_L,t+1,k}^D + Y_{j_L,t+1,k}^H \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma, S_L \in \Delta, j_L \in \Theta \quad (3)$$

$$X_{S_R,t,k}^R + Y_{j_R,t,k}^D + Y_{j_R,t,k}^H = X_{S_R,t+1,k}^L + Y_{j_R,t+1,k}^D + Y_{j_R,t+1,k}^H \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma, S_R \in \Delta, j_R \in \Theta \quad (4)$$

$$X_{s_1,t,k}^R + X_{s_2,t,k}^L + Y_{j,t,k}^D = X_{s_1,t+1,k}^L + X_{s_2,t+1,k}^R + Y_{j,t+1,k}^D + Y_{j,t+1,k}^H \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma, s_1, s_2 \in \Delta, j \in \Theta \quad (5)$$

式中: S_L 为与左边界 ESA 相邻的高速公路路段。 j_L 为左边界 ESA; S_R 为与右侧边界 ESA 相邻的高速公路路段; j_R 为右边界 ESA。 s_1 和 s_2 为与第 j 个 ESA 相邻的高速路段。

式(6)是 MESV 在第 a 个 EMC 中的时空和能量状态转移约束。式(7)保证了每辆 MESV 在运行时段结束后返回第 a 个 EMC。式(6)、(7)可分别表示为

$$X_{S_a,t,k}^L + Y_{a,t,k}^D + Y_{a,t,k}^H + Y_{a,t,k}^C = X_{S_a,t+1,k}^L + Y_{a,t+1,k}^D + Y_{a,t+1,k}^H + Y_{a,t+1,k}^C \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma, S_a \in \Delta \quad (6)$$

$$X_{S_a,T,k}^L + Y_{a,T,k}^D + Y_{a,T,k}^H + Y_{a,T,k}^C = 1 \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma \quad (7)$$

式中: S_a 为与第 a 个 EMC 相邻的高速公路路段。

式(8)是 MESV 的相邻高速公路路段的状态转移约束

$$X_{s,t,k}^L + X_{s,t,k}^R = \sum_{S_L \in \Omega_L} X_{S_L,t+1,k}^L + \sum_{S_R \in \Omega_R} X_{S_R,t+1,k}^R \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma, s \in \Delta \quad (8)$$

式(9)是 MESV 的储能电池组的电量变化约束

$$E_{t+1,k} = E_{t,k} + Y_{j,t,k}^D P_{j,t,k}^D + Y_{a,t,k}^D P_{a,t,k}^D + Y_{a,t,k}^C P_{a,t,k}^C \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma, j \in \Theta \quad (9)$$

式(10)是 MESV 的储能电池组的容量约束,式(11)是运营时段结束时 MESV 的储能电池组的容量约束,其中 T 表示运营结束时段。式(10)、(11)可分别表示为

$$E_{t,k}^{\min} \leq E_{t,k} \leq E_{t,k}^{\max} \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma \quad (10)$$

$$E_{T,k} \geq E_{T,k}^{\text{end}} \quad \forall t \in \Gamma, k \in \Gamma \quad (11)$$

式(12)是 MESV 的储能电池组在第 a 个 EMC 中的放电次数约束

$$\sum_t^T Y_{a,t,k}^D \leq N^{\text{limit}} \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma \quad (12)$$

式中: N^{limit} 为在运营时段内,每辆 MESV 的最大放电次数。

式(13)是 MESV 的储能电池组在第 j 个 ESA 中的能量供应约束。式(14)是 MESV 的储能电池组在第 a 个 EMC 中的能量平衡约束。式(13)、(14)可表示为

$$\sum_k^K Y_{j,t,k}^D P_{j,t,k}^D \leq E_{j,t}^{\text{demand}} \quad \forall t \in \Lambda, j \in \Theta \quad (13)$$

$$\sum_k^K Y_{a,t,k}^D P_{a,t,k}^D + P_t^{\text{renew}} + P_{a,t} \geq E_{a,t}^{\text{demand}} + \sum_k^K Y_{a,t,k}^C P_{a,t,k}^C \quad \forall t \in \Lambda \quad (14)$$

式中: P_t^{renew} 表示第 a 个 EMC 在时间段 t 可再生能源的发电量; $E_{a,t}^{\text{demand}}$ 表示在时间段 t 、第 a 个 EMC 中的柔性负荷供电需求。

式(15)是 MESV 的储能电池组在第 j 个 ESA 中的放电功率约束。式(16)、(17)是 MESV 的储能电池组在第 a 个 EMC 中的充电和放电功率约束。式(15)~(17)可分别表示为

$$0 \leq P_{j,t,k}^D \leq P_{\max}^D \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma, j \in \Theta \quad (15)$$

$$P_{\min}^C \leq P_{a,t,k}^C \leq P_{\max}^C \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma, j \in \Theta \quad (16)$$

$$0 \leq P_{a,t,k}^D \leq P_{\max}^D \quad \forall t \in \Lambda, k \in \Gamma, j \in \Theta \quad (17)$$

通过上述目标函数及约束条件,模型被构建为 MIQCP,可利用成熟的商业求解器进行求解,以求解出 MESV 的最佳路径、充电/放电时间以及相应的充电/放电功率。所提出模型旨在最大化调度移动储能车的净收益,构建交通-能源的时空约束,实

现将 EMC 未利用的可再生能源收集至 MESV 的储能电池组中,并调度 MESV 前往 ESA 为柔性负荷供电,从而增加可再生能源的消纳及满足柔性负荷电能需求。

2 案例研究

2.1 案例描述和参数设置

如图 2 所示,根据连霍高速义马至民权段的道路及沿线设施情况,本文抽象一个具有 4 个 ESA (ESA1~ESA4)和 1 个 EMC 的高速公路系统。每个 ESA 相距约 100 km,EMC 距离相邻的 ESA2 和 ESA3 约 100 km。右侧边界 ESA 和左侧边界 ESA 分别表示为蓝色节点和红色节点。本文定义系统中有 5 辆 MESV(MESV1~MESV5),初始时刻都停留在 EMC,且其只能在图 2 中黑线所示的高速

公路上行驶。此外,在 00:00~07:00 点 ESA 的用电需求较低,本文的模型忽略了对 MESV 在上述时段的建模。因此,模型中的运营时段从 07:00~24:00,并被分为 34 个时段。表 4 提供了基本参数设置,本文假设所有 MESV 都具有相同参数。本文假设高速公路是没有拥堵,MESV 的行驶速度为 100 km/h。本文假设 EMC 中安装了 PV 和 WT,装机容量约为 0.5 MW。参数设置见表 4。EMC 的可再生发电情况如图 3 所示,由于风速和太阳辐射随时间变化,每个时段的 EMC 可再生能源设备发电功率不同。ESA 和 EMC 的柔性负荷情况如图 4 所示。本文假设 MESV 只有在 ESA 中售电才能获得收益。本文提出模型在英特尔酷睿 i5 处理器和 8 GB 内存的电脑上使用 Python 3.8 和 Gurobi 求解。

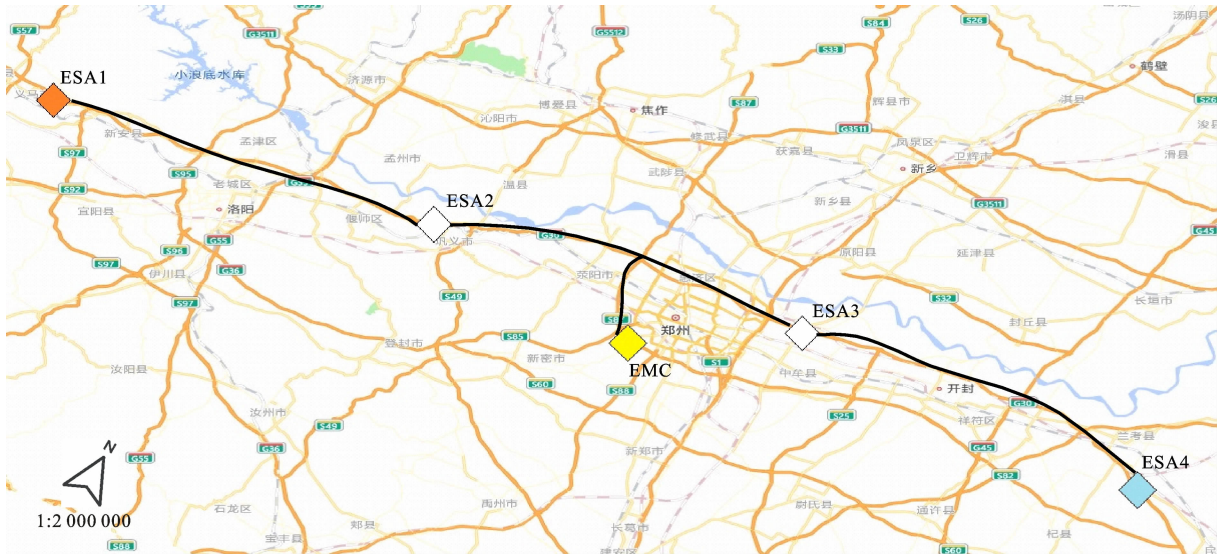


图 2 抽象高速公路系统

Fig. 2 Abstracted expressway system

表 4 参数设置

Table 4 Parameter setting

参数	数值
K/veh	5
$E^{\max}/(\text{MW} \cdot \text{h}^{-1})$	1
$E^{\min}/(\text{kW} \cdot \text{h}^{-1})$	100
$P_{\max}^C/(\text{kW} \cdot \text{h}^{-1})$	120
$P_{\min}^C/(\text{kW} \cdot \text{h}^{-1})$	30
$P_{\max}^D/(\text{kW} \cdot \text{h}^{-1})$	250
$E^{\min}/(\text{kW} \cdot \text{h}^{-1})$	300
$v/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	2.2
$q^C, q^D/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.2
$u/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	0.5

2.2 仿真结果

如图 5~9 所示,利用所提方法求解,本文获取了 5 辆 MESV 的路径和充电/放电仿真结果。5 辆 MESV 都在运营的初始时刻及终止时刻停留在 EMC,这表明仿真结果满足了模型对 MESV 初始时刻及终止时刻的空间约束。具体而言, MESV1 在 07:00 停留在 EMC,运营期间前往了 ESA3,并于 19:30 返回 EMC,且直至运营终止时刻都未再离开 EMC。MESV2 在 07:00 停留在 EMC 充电,在 16:00 离开 EMC 前往了 ESA4,22:00 返回 EMC。尽管 MESV4 在运营时段内分别前往了 ESA2 及 ESA3,但它最终也返回了 EMC。此外,所有 MESV 在 ESA 均未进行充电行为,这验证了仿真结果符合

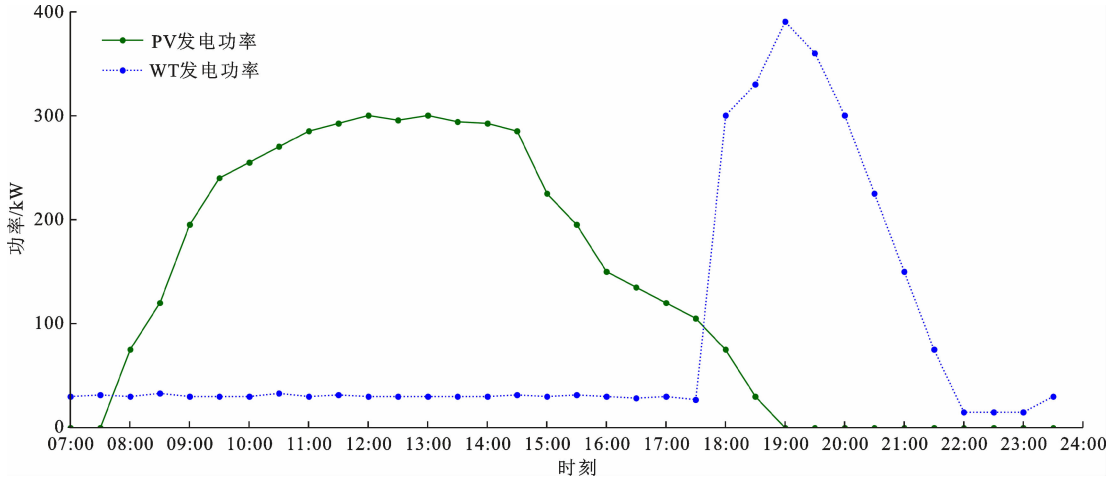


图 3 EMC 可再生能源发电功率

Fig. 3 Renewable energy generation capacities of EMC

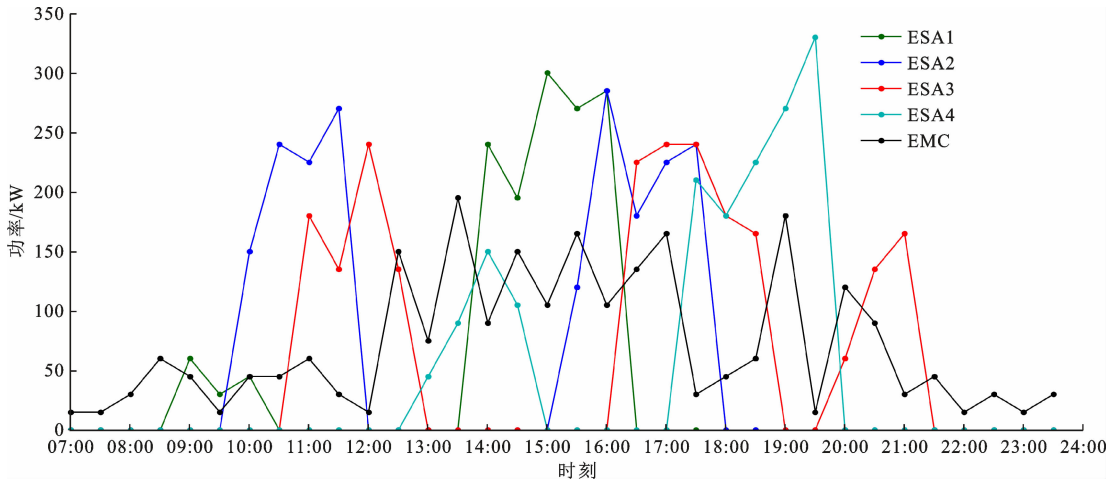


图 4 EMC 与 ESA 的柔性负荷

Fig. 4 Flexible loads of EMC and ESA

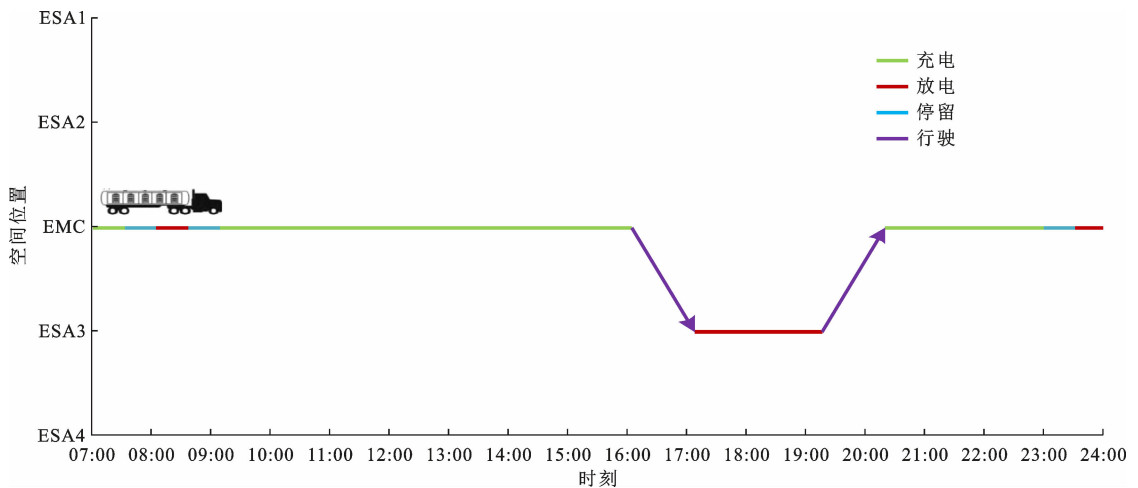


图 5 MESV1 行驶路径及充放电结果

Fig. 5 Driving path and charging/discharging results for MESV1

模型的能量供应约束。例如, MESV2 在 18:00 到达 ESA4, 并于晚上 20:00 离开, 期间仅在 ESA2 进

行了放电。MESV4 在 ESA2 仅进行了放电操作, 而在 18:30~21:30, 它在 ESA3 进行了放电和停

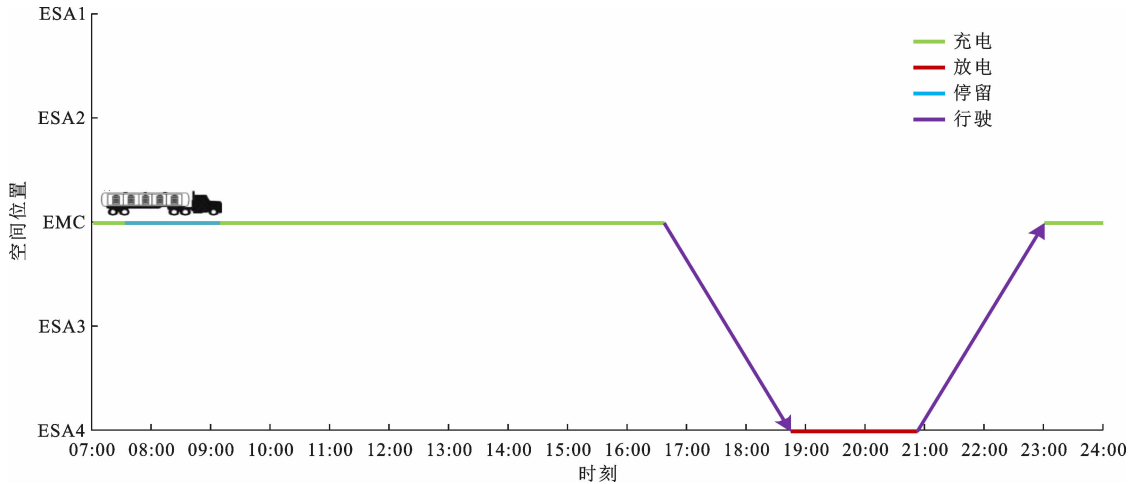


图6 MESV2 行驶路径及充放电结果

Fig. 6 Driving path and charging/discharging results for MESV2

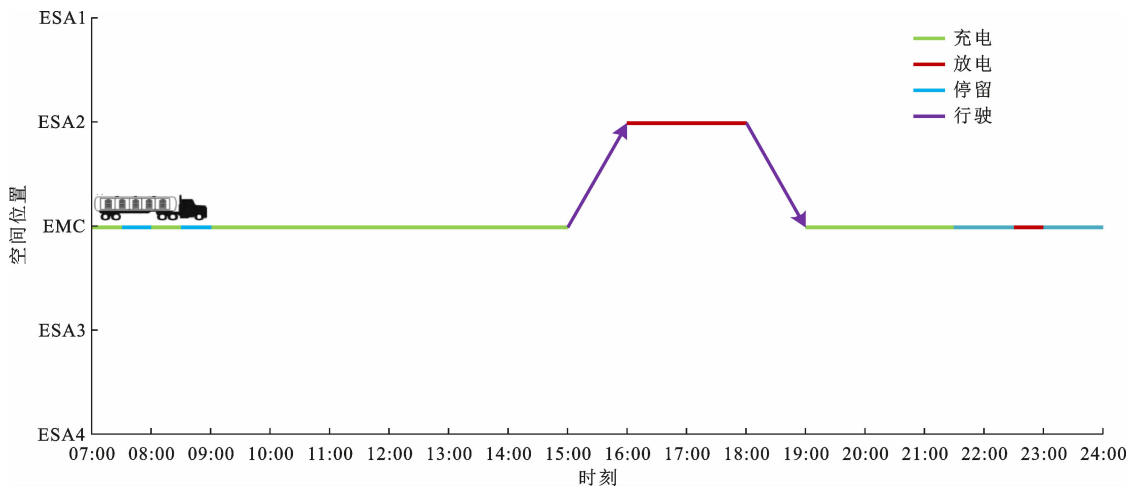


图7 MESV3 行驶路径及充放电结果

Fig. 7 Driving path and charging/discharging results for MESV3

留,但并未充电。同样地,MESV5 在 15:00~16:30,在 ESA1 进行了放电。

如图 9 所示,由于 ESA1 在 15:00~16:30 用电需求最高,因此 MESV5 在该时段为 ESA1 的柔性负荷供电。如图 6 所示,由于 ESA4 在 18:00~20:00 有更高的用电需求,因此 MESV5 在该时段为 ESA4 的柔性负荷供电。此外,在 19:00~20:00, MESV4 停留在 ESA3,等待用电需求高峰的到来。因此,在能量和时空约束下,所提方法调度 MESV 在柔性负荷较大的时段供电,这体现了本文所提出的调度策略对 MESV 时空灵活特征的应用。如图 7、8 所示,由于 EMC 距离 ESA2 较近,从 EMC 调度 MESV 前往 ESA2 的行驶成本较低, MESV4 在 10:00~11:00 为 ESA2 的柔性负荷供电,而 MESV3 在 16:00~18:00 为 ESA2 的柔性负荷供电。与 ESA2 类似, MESV1 和 MESV4 在 16:30~

21:30 被调度至 ESA3 放电。本文所提出的策略调度更多的 MESV 来满足距离 EMC 较近的 ESA 柔性负荷需求,这说明该策略通过减少调度成本,提高了 MESV 调度的净收益。

图 10 为了 EMC 中的可再生能源发电和电力负荷的概况。其中,EMC 的负荷包括柔性负荷及 5 辆 MESV 储能电池组的充电负荷。图 11 为各时间段 EMC 中的 LMP 和从电网购电情况。首先, MESV 的储能电池组的充电负荷大多集中在可再生能源发电连续且充足的时段。如图 10 的仿真结果所示, MESV1 的充电时间为 09:00~15:00, MESV2 的充电时间为 09:00~15:00, MESV3 的充电时间为 09:00~14:30, MESV4 的充电时段为 09:00~14:30, MESV5 为 18:30~21:00, 这些结果支持了上述结论。其中,5 辆 MESV 都集中在 12:00~12:30 充电,这是由于上述时段内可再生能源

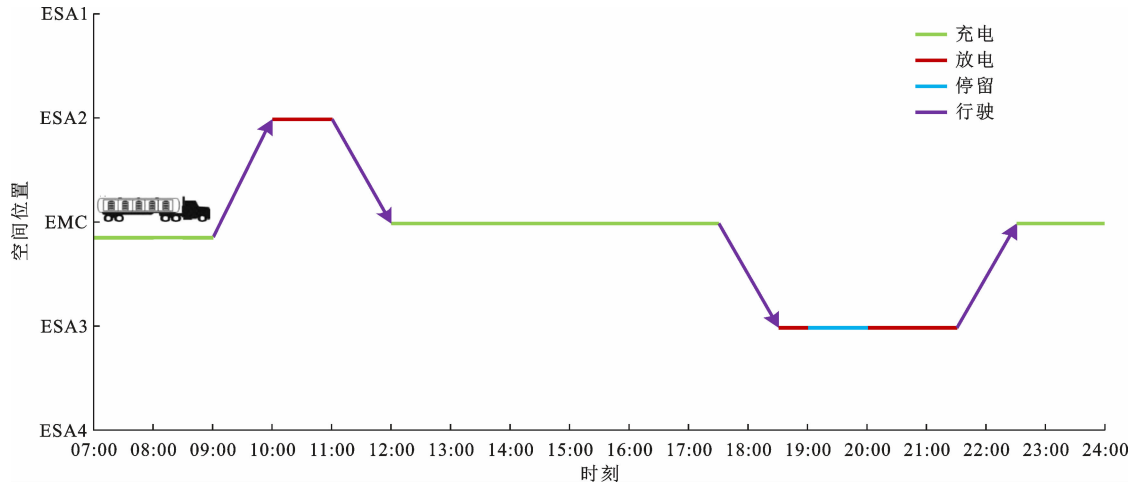


图 8 MESV4 行驶路径及充放电结果

Fig. 8 Driving path and charging/discharging results for MESV4

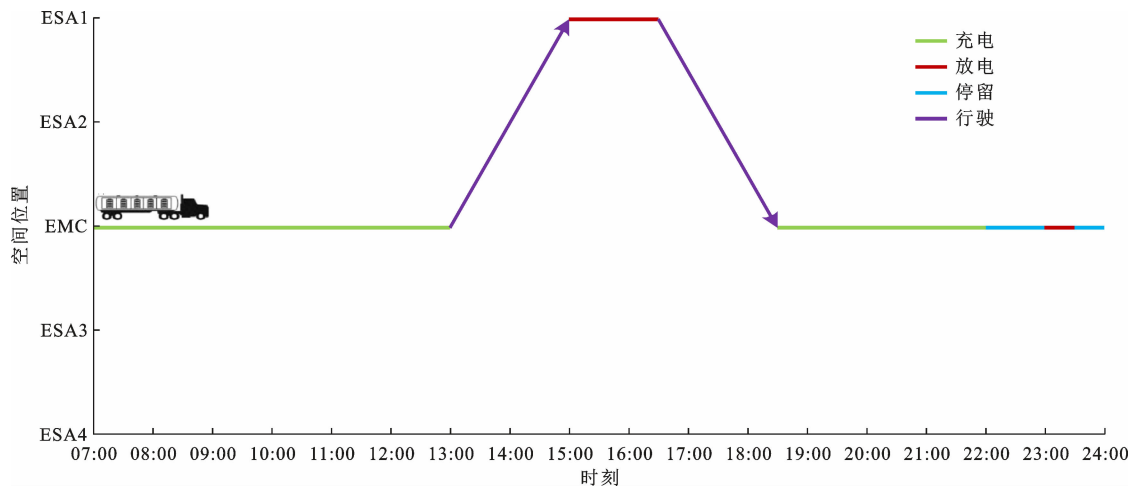


图 9 MESV5 行驶路径及充放电结果

Fig. 9 Driving path and charging/discharging results for MESV5

发电量较多,EMC 的柔性负荷较低。综上所述,所提方法促进了 EMC 可再生能源发电的就地消纳。其次,为了降低购电成本,对于可再生能源发电功率不能满足负荷需求的时段,调度策略倾向于在 LMP 较低的时段购买电力。例如,07:00~07:30 是在 07:00~10:00 LMP 的最低点,此时有 5 辆 MESV 充电。在 23:30~24:00,EMC 可以从电网购买电价较低的电能,因此,2 辆 MESV 被安排在此时段充电。

本文通过 2 个对比案例,进一步阐明了所提调度策略的优势。本文将所提调度策略作为基础案例。对比案例 1 考虑了每天固定时间段内调度移动储能车(MESV)为柔性负荷供电的情况。对比案例 2 仅考虑了柔性负荷需求情况,未兼顾可再生能源发电。对比案例中 MESV 的参数与基础案例相同。在对比案例中,假设所有 MESV 的充电时段为 07:

00~11:00, MESV 在 ESA 的放电时段为 14:00~19:00。图 12 为 EMC 的可再生能源消纳情况,结果表明基础案例消纳的可再生能源最多,达到了 3 167 kW·h。基础案例中在综合考虑 EMC 可再生能源发电功率和 ESA 柔性负荷之间的时空分布的情况下,优化 MESV 的路径及充放电方案,以实现调度 EMC 富裕可再生能源为柔性负荷供电。

表 5 为 MESV 在 ESA 的供电情况。与案例 1 相比,基础案例在每个 ESA 的柔性负荷供电量都实现了增加,尤其是 ESA2,共增加了 317.5 kW·h,成为增幅最大的 ESA,增幅次之的是 ESA3,这得益于模型考虑了 MESV 行驶过程的花费,因此更倾向于将 MESV 调度至距离 EMC 较近的 ESA 进行放电。此外,案例 2 在每个 ESA 的柔性负荷供电量都高于案例 1,表明案例 2 的策略考虑了柔性负荷供应需求。

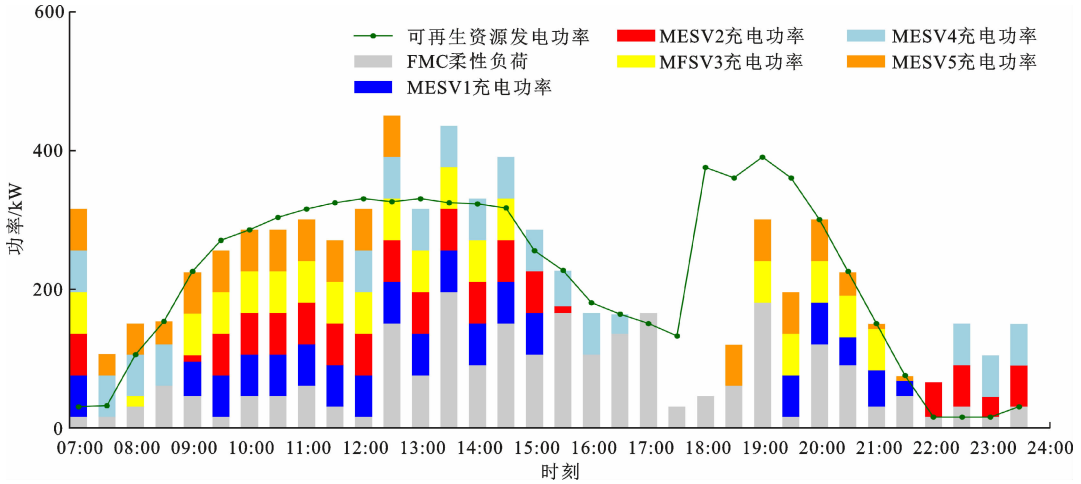


图 10 EMC的可再生能源发电功率及柔性负荷概况

Fig. 10 Renewable energy generation capacity and flexible load profiles of EMC

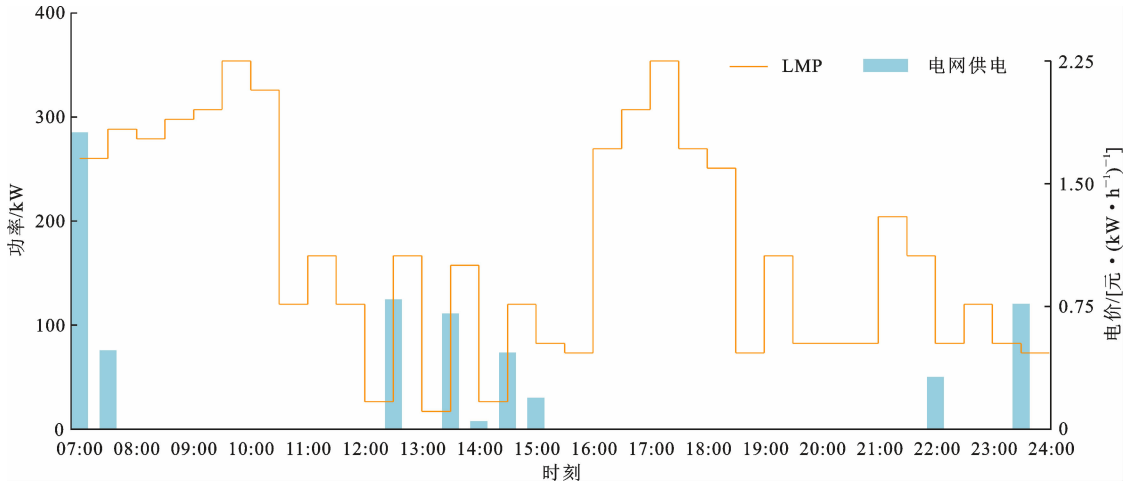


图 11 EMC的LMP及电网供电概况

Fig. 11 LMP and grid-supplied electricity profiles of EMC

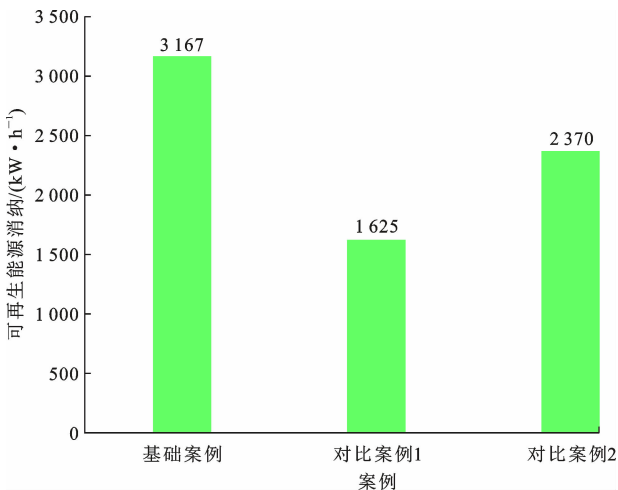


图 12 EMC的可再生能源消纳概况

Fig. 12 Renewable generation consumption profiles of EMC

图 13 为了 4 个 ESA 的柔性负荷供电需求总满足率,基础案例的满足率最高,达到了45%。这表

表 5 MESV 供电情况案例结果对比

Table 5 Case results comparison for

项目	MESV supplying profiles		
	基础案例	对比案例 1	对比案例 2
EMC 可再生能源消纳	3 167.0	1 625.0	2 370.0
MESV 为 ESA1 供电量	375.0	300.0	380.0
MESV 为 ESA2 供电量	617.5	300.0	321.0
MESV 为 ESA3 供电量	704.5	525.0	680.0
MESV 为 ESA4 供电量	450.0	300.0	439.5

明所提出的策略有利于提高调度 MESV 为柔性负荷供电的总利润,增加产生柔性负荷的用户(如电动汽车充电用户)对高速公路运营商的服务满意度。

3 结 语

(1)本文提出一种在高速公路交通系统背景下的 MESV 调度策略。同时,优化模型考虑了来自

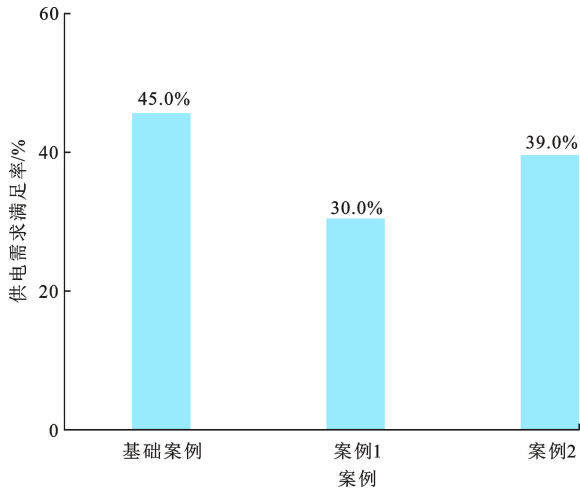


图 13 四个服务区的总柔性负荷供电需求满足率

Fig. 13 Total satisfaction rates of flexible load power supply demands in four ESAs

EMC的可再生能源发电的供能侧与ESA的柔性负荷用电需求侧之间的时空耦合关系。MESV的时空和能量约束模型被构建为MIQCP,该模型以电能售卖的净收入最大化为目标函数。基于优化结果,高速公路运营商能够确定每辆MESV的最佳路径、充电/放电时间以及充电/放电功率。案例研究验证了所提出策略的有效性,相较于2组对比案例,所提策略的可再生能源发电消纳量最高,达到了3167 kW·h。此外,4个ESA的柔性负荷供电需求满足率显著提高,共计45%。上述结果表明,通过综合考虑高速公路的交通-能源特性以及MESV的时空灵活性,本文所提策略能够实现更高效的能源调度和更合理的运营管理。此外,所提策略促进了可再生能源的就地消纳,并增加了产生柔性负荷的用户(如电动汽车充电用户)对高速公路运营商的服务满意度,有利于该用户群体继续选择高速公路出行,使得高速公路交通和能源系统互利互惠,共同发展。

(2)本文研究存在不足:模型中没有考虑ESA柔性负荷的不确定性,也没有对柔性负荷进行调度。后续研究将考虑不同柔性负荷的特点,构建特征集合,利用鲁棒优化等方法,协同调度MESV及柔性负荷,进一步增加高速公路可再生能源的利用率和供电稳定性。

参考文献:

References:

[1] SONG J, HE G, WANG J, et al. Shaping future low-carbon energy and transportation systems;

Digital technologies and applications [J]. Energy, 2022, 1(3): 285-305.

[2] LUO C, HUANG Y F, GUPTA V. Stochastic dynamic pricing for EV charging stations with renewable integration and energy storage [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1494-1505.

[3] ABDELTAWAB H, MOHAMED Y A R I. Mobile energy storage sizing and allocation for multi-services in power distribution systems [J]. IEEE Access, 2019, 7: 176613-176623.

[4] WANG Y, QIU D, STRBAC G. Multi-agent deep reinforcement learning for resilience-driven routing and scheduling of mobile energy storage systems [J]. Applied Energy, 2022, 310: 118575.

[5] YU J, LU J. Slope stability analysis of expressway subgrade with photovoltaic facilities [C]//IEEE. Proceedings of the 8th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering: Deep Space Intelligent Development and Utilization Forum (ICHCE). New York: IEEE, 2023: 588-593.

[6] QIN X, SHEN Y, SHAO S. The application study in solar energy technology for highway service area: A case study of West Lushan highway low-carbon service area in China [J]. International Journal of Photoenergy, 2015, 2015: 1-8.

[7] 王 彪,赵微微,林少军,等.基于改进的多目标量子遗传算法的高速服务区综合能源管理[J].电网技术, 2022,46(5):1742-1751.

WANG Biao, ZHAO Wei-wei, LIN Shao-jun, et al. Integrated energy management of highway service area based on improved multi-objective quantum genetic algorithm [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1742-1751.

[8] 王宁玲,杨超云,王家奇,等.基于能源枢纽建模的高速公路综合能源系统多目标运行优化研究[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),2023:1-12[2023-11-09]. <https://link.cnki.net/urlid/13.1212.TM.20231108.1111.004>.

WANG Ning-ling, YANG Chao-yun, WANG Jia-qi, et al. Research on multi-objective operation optimization of highway integrated energy system based on energy hub [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023: 1-12 [2023-11-09]. <https://link.cnki.net/urlid/13.1212.TM.20231108.1111.004>.

[9] HOU L Y, YAN J, WANG C, et al. A simultaneous multi-round auction design for scheduling multiple

- charges of battery electric vehicles on highways[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 8024-8036.
- [10] LV S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Power and traffic nexus: From perspective of power transmission network and electrified highway network[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(2): 566-577.
- [11] DING Z, ZHANG Y, TAN W, et al. Pricing based charging navigation scheme for highway transportation to enhance renewable generation integration [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 59: 108-117.
- [12] ZHANG T Y, YAO E J, YANG Y, et al. Deployment optimization of battery swapping stations accounting for taxis' dynamic energy demand[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 116: 103617.
- [13] ZHANG T Y, YANG Y, ZHU Y T, et al. Deploying public charging stations for battery electric vehicles on the expressway network based on dynamic charging demand [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022, 8(2): 2531-2548.
- [14] YAN J, LAI F X, LIU Y Q, et al. Multi-stage transport and logistic optimization for the mobilized and distributed battery[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 196: 261-276.
- [15] KIM J, DVORKIN Y. Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 4996-5006.
- [16] ZHANG L, YU S, ZHANG B, et al. Outage management of hybrid AC/DC distribution systems: Co-optimize service restoration with repair crew and mobile energy storage system dispatch[J]. *Applied Energy*, 2023, 335: 120422.
- [17] ABDELTAWAB H H, MOHAMED Y. Mobile energy storage scheduling and operation in active distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(9): 6828-6840.
- [18] KWON S Y, PARK J Y, KIM Y J. Optimal V2G and route scheduling of mobile energy storage devices using a linear transit model to reduce electricity and transportation energy losses[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(1): 34-47.
- [19] SABOORI H, JADID S. Mobile and self-powered battery energy storage system in distribution networks: Modeling, operation optimization, and comparison with stationary counterpart[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 42: 103068.
- [20] XU Y, WANG Y, HE J H, et al. Resilience-oriented distribution system restoration considering mobile emergency resource dispatch in transportation system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 73899-73912.
- [21] YAO S H, WANG P, LIU X C, et al. Rolling optimization of mobile energy storage fleets for resilient service restoration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1030-1043.
- [22] QU Z L, CHEN J J, PENG K, et al. Enhancing stochastic multi-microgrid operational flexibility with mobile energy storage system and power transaction[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 71: 102962.
- [23] MISHRA D K, GHADI M J, LI L, et al. Active distribution system resilience quantification and enhancement through multi-microgrid and mobile energy storage [J]. *Applied Energy*, 2022, 311: 118665.
- [24] NIU M B, WANG H C, LI J, et al. Coordinated energy dispatch of highway microgrids with mobile storage system based on DMPC optimization[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 217: 109119.
- [25] DING Y, QU G, CHEN X, et al. Deep reinforcement learning-based spatiotemporal decision of utility-scale highway portable energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 60(1): 1-10.