基于信息间隙决策理论的高速零碳服务区微能网调度

王　亮[1],朱　昆[1],杨晓辉[2],李浩钧[2],胡泽成[2]

(1.中电建路桥集团有限公司,北京 100160;2.南昌大学信息工程学院,江西 南昌 330031)

摘　要:随着零碳理念的深入,高速公路服务区的建设有了更高的目标。零碳服务区中多以光伏为主要的发电系统,具有较大的波动性,故引入信息间隙决策理论以同时满足微网的稳定性和效益性要求。文中首先构建了高速零碳服务区微能网调度模型;其次,针对光伏出力的不确定性和车流量的不同对微能网的冲击,通过引入IGDT理论,得到不同风险下的不确定性微能网调度模型,优化调度方案;最后,以某高速公路服务区为例,进行分析,得到在不同风险下的高速零碳服务区的调度方案,验证了模型的可靠性和有效性。

关键词:高速零碳服务区;优化调度;信息间隙决策理论;风险决策

中图分类号:TM 744　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1006-348X(2025)01-0038-05

0　引言

交通运输领域是我国碳排放的重要来源之一,据估算,交通领域占全球温室气体排放量的15%左右,并保持持续增长。高速公路服务区作为为车主提供休息和补给的场所,在高速公路的建设中十分重要。结合交通基础设施,开发利用可再生能源是实现绿色低碳的必由之路[1-2]。

面对服务区对能源需求的增长及多样化,传统服务区中大量使用非可再生资源,造成资源浪费[3]。由于服务区一般地处偏远,可用面积大,适合铺设光伏设备,且可再生能源使服务区具备一定的自洽性[4]。文献[5]中提出的光伏分布式方案,有效地提高了高速公路能源体系中新能源的消纳比例,促进了高速公路向绿色转型的发展。文中构建了一个以光伏为主,配电网为辅的高速公路服务区微能网模型,增大光伏在服务区能源中的占比。

信息间隙决策理论(information gap decision theory,IGDT)主要用于处理决策过程中存在的不确定性因素,可以在未知概率分布的情况下量化系统的不确定性,并在保证系统鲁棒性的同时兼顾系统的经济性[6-7]。由于服务区中的充电负荷具有较大的波动性,故而本文在高速公路服务区中应用IGDT处理不确定问题。

文中构建了一个确定性的高速公路服务器微能网模型,对电动汽车(electric vehicle,EV)考虑分时电价,并以运行费用最小为目标函数对高速服务器微能网进行优化调度;分别从激进型和保守型两个方面构建IGDT调度模型。在不同的波动幅度下,对模型的调度方案进行决策;以某零碳智慧服务区作为算例,验证了该方法在服务区中应用的可行性与优越性。

1　高速公路服务区微能网结构

高速公路服务区微能网(highway service area micro-energy grid,HSAMEG)的结构图如图1所示,主要由以下几个部分组成:储能系统(energy storage system,ESS);建筑用能负荷,光伏系统(photovoltaic system,PVS),配电网(distribution grid,DG),能源耦合系统(energy coupling system,ECS)及电动汽车充电负荷。

收稿日期:2025-02-05

基金项目:中电建路桥集团有限公司科技项目(LQKY-JBGS-2023-05)。

作者简介:王亮(1985),男,硕士,高级工程师,主要从事高速公路设计、建设、运营管理。

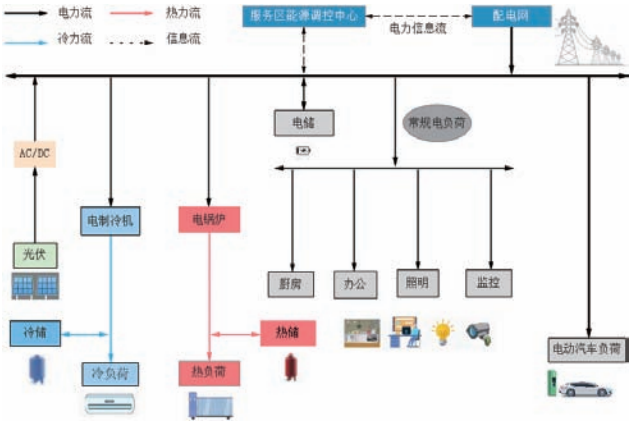

图1　高速公路服务区结构图

2　确定性的高速服务区微能网模型

基于上述HSAMEG，文中首先建立了确定性的高速公路服务区微能网模型。该模型不考虑不确定性问题，风光出力及负荷均按照预测曲线运行，其结果能够为后续IGDT模型提供参考。

2.1　目标函数

该模型以HSAMEG的日利润最大为主要目标。日利润DP等于售电净利润DNP减去日成本，日成本则包括碳排放成本CEC，光伏运维成本$POMC$和买电成本EPC，其公式如下：

$$DP=\max(DNP-CEC-POMC-EPC) \tag{1}$$

$$\begin{cases} DNP=\sum_{t=1}^{T}E_{G,t}^{V}\times\pi_{V}^{G} \\ CEC=\sum_{t=1}^{T}E_{G,t}^{P}\times c_{G,t}^{P} \\ POMC=\sum_{t=1}^{T}P_{t}^{PV}\times\pi_{G,t}^{V} \\ EPC=\sum_{t=1}^{T}E_{G,t}^{P}\times\pi_{G,t}^{P} \end{cases} \tag{2}$$

式中：t为时间，且$t\in(0,24)$；$E_{G,t}^{V}$为t时刻对电动汽车用户的卖电量；π_{V}^{G}为微能网与电动汽车用户的合同电量定价；$E_{G,t}^{P}$为t时刻微能网向上级DG的买电量；$c_{G,t}^{P}$为t时刻微能网向DG买电的相关碳排价格；P_{t}^{PV}为t时刻PVS的发电量；$\pi_{G,t}^{V}$为t时刻服务区PVS的运维价格；$\pi_{G,t}^{P}$为t时刻微能网上级DG购电的分时电量定价。

2.2　约束条件

1）电制冷机

$$\begin{cases} P_{cool,t}^{c}=\eta_{cool}P_{ecool,t}^{c} \\ P_{ecool,t}^{c\,min}\le P_{ecool,t}^{c}\le P_{ecool}^{c\,max} \\ \Delta P_{ecool,t}^{c\,min}\le P_{ecool,t+1}^{c}-P_{ecool,t}^{c}\le\Delta P_{ecool}^{c\,max} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$P_{ecool,t}^{c}$为t时段输入电制冷机的电能；$P_{cool,t}^{c}$为t时段电制冷机输出的冷能；η_{cool}为电制冷机的能量转换系数；$P_{ecool}^{c\,max}$和$P_{ecool,t}^{c\,min}$分别为输入电制冷机的上下限；$\Delta P_{ecool,t}^{c\,min}\Delta P_{ecool}^{c\,max}$和分别为电制冷机的爬坡上下限。

2）电锅炉

$$\begin{cases} P_{b,t}^{r}=\eta_{eb}P_{eb,t}^{r} \\ P_{eb}^{r\,min}\le P_{eb,t}^{r}\le P_{eb}^{r\,max} \\ \Delta P_{ecool,t}^{r\,min}\le P_{eb,t+1}^{r}-P_{eb,t}^{r}\le\Delta P_{eb}^{r\,max} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$P_{eb,t}^{r}$为t时段输入电锅炉的电能；$P_{b,t}^{r}$为t时段电锅炉输出的热能；η_{eb}为电锅炉的能量转换系数；$P_{eb}^{r\,max}$和$P_{eb}^{r\,min}$分别为输入电锅炉的上下限；$\Delta P_{eb}^{r\,max}$和$\Delta P_{ecool,t}^{r\,min}$分别为电锅炉的爬坡上下限。

3）功率平衡约束

在HSAMEG运行的过程中，需要满足系统的功率平衡约束，平衡约束具体表达式为：

$$\begin{cases} E_{G,t}^{p}+P_{g,t}^{out}+P_{t}^{PV}=P_{g,t}^{in}+P_{ecool,t}^{c}+P_{leload,t}+E_{G,t}^{p}+P_{eb,t}^{r} \\ P_{b,t}^{r}+Q_{g,t}^{out}=Q_{g,t}^{in}+Q_{leload,t} \\ P_{cool,t}^{c}+C_{g,t}^{out}=C_{g,t}^{in}+C_{leload,t} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$P_{g,t}^{out}$和$P_{g,t}^{in}$分别为t时刻蓄电池放充电功率；$P_{leload,t}$为t时刻服务区内基础电负荷；$Q_{g,t}^{out}$和$Q_{g,t}^{in}$分别为t时刻储热罐充放热功率；$Q_{leload,t}$为t时刻服务区内供暖设备产生的热负荷；$C_{g,t}^{out}$和$C_{g,t}^{in}$分别为t时刻储冷罐充放冷功率；$C_{leload,t}$为t时刻$P_{ecool,t}^{c\,min}$服务区内制冷设备产生的冷负荷。

4）光伏出力约束。

$$0\le P_{t}^{PV}\le P^{PVmax} \tag{6}$$

式中：P^{PVmax}为光伏输出的功率上限。

5）储能运行约束。

电、热、冷等储能设备数学模型相似，因此文中只介绍电储能设备，具体如下：

$$\begin{cases} P_{ES,t}=P_{g,t}^{in}\eta_{ES}^{in}-P_{ES,t}^{out}/\eta_{ES}^{out} \\ S_{E,t}=S_{E,t-1}+P_{ES,t}/P_{ES}^{cap} \\ 0\le P_{g,t}^{in}\le B_{g,t}^{in}P_{ES}^{max} \\ 0\le P_{g,t}^{out}\le B_{g,t}^{out}P_{ES}^{max} \\ S_{E,1}=S_{E,T} \\ S_{E}^{min}\le S_{E,t}\le S_{E}^{max} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$P_{g,t}^{in}$和$P_{g,t}^{out}$分别为t时刻蓄电池的充、放功率；

P_{ES}^{max}为蓄电池的单次充放最大功率；$B_{g,t}^{out}$和$B_{g,t}^{in}$均为二进制变量，分别为蓄电池时刻充、放状态参数；$P_{ES,t}$为t时刻蓄电池的输出功率；η_{ES}^{in}和η_{ES}^{out}分别为蓄电池的充、放电效率；$S_{E,t}$为t时刻蓄电池的容量；P_{ES}^{cap}为蓄电池的额定容量；S_E^{max}和S_E^{min}分别为蓄电池容量的上下限。

3 基于IGDT的高速服务区微能网调度模型

确定性模型依据服务区冷热电负荷预测结果进行调度，使得利润达到最大。但是在实际情况中，高速服务区地处偏僻，受极端天气等各种因素影响较大，而且服务区EV充电的不规律性，基础负荷存在一定波动。实际结果往往与预测值存在较大偏差，导致经济效益受损。因此，在进行调度方案选择时，必须充分考虑各种负荷的不确定性。为应对这些不确定性，文中采用IGDT来处理负荷的不确定性。该方法通过考虑不确定量的最优与最坏的影响来制定决策方案，有效应对了不确定性，提升了调度模型的适应性和准确性。鉴于电力系统负荷所固有的高度不确定性及复杂性，文中选取分数不确定性模型作为分析工具，其数学表达形式表述如下：

$$G(\partial,\overline{\lambda}_t^{HSA})=\left\{\lambda_t^{HSA}:\left|\lambda_t^{HSA}-\overline{\lambda}_t^{HSA}\right|\geq\partial\overline{\lambda}_t^{HSA}\right\} \quad (8)$$

式中：$\overline{\lambda}_t^{HSA}$和$\partial$分别为$t$时刻，服务区内负荷预测值和波动幅度；$\lambda_t^{HSA}$为$t$时刻，负荷需求实际值。确定性高速服务区微能网调度模型通常是在∂=0时构建的。考虑到不确定性因素会对利润与调度策略造成影响，文中将调度模型划分为激进型模型和保守型模型。

3.1 基于激进型的IGDT调度模型

激进型的IGDT模型认为，服务区电冷热负荷的不确定性可以促使调度决策朝着更具有经济效益的方向发展。文中构建了基于激进型的IGDT高速公路服务区微能网调度模型，该数学模型如下：

$$\text{Object:}\max\partial$$
$$\text{s.t}\begin{cases}DP\geq DP^{jy}=DP_1(1+\delta_m)\\ \rho_t^{HSA}=\rho_t^{-HSA}(1-\partial)\\ \text{式(1)—(12)}\end{cases} \quad (9)$$

式中：δ_m为机遇偏差因子，其取值范围为[0,1)；DP^{jy}为机遇性收益阈值；DP_1为确定性HSAMEG调度模型的最优值；ρ_t^{HSA}为t时刻负荷实际需求值。所以当负荷需求的不确定性波动幅度最小时，负荷实际值最小，那么日利润能够达到最大。

3.2 基于保守型的IGDT调度模型

在保守型的调度策略框架下，HSAMEG在能够获得基本的经济效益的同时，极力确保系统的稳定性最优。文中构建了基于保守型的IGDT高速公路服务区微能网调度模型，该数学模型如下：

$$\text{Object:}\max\partial$$
$$\text{s.t}\begin{cases}DP\geq DP^{wd}=DP_1(1-\mu_m)\\ \rho_t^{HSA}=\rho_t^{-HSA}(1+\partial)\\ \text{式(1)—(12)}\end{cases} \quad (10)$$

式中：μ_m为稳定偏差因子，其取值范围为[0,1)；DP^{wd}为稳定性收益阈值。所以当负荷需求的不确定性波动幅度最大，且负荷实际需求最大时，仍能够保证系统稳定，合理的规避风险。

4 算例分析

文中以某高速公路服务区为例，对其进行调度算例，调度周期为24 h，单位调度时间长度为1 h，配电网售电价及EV购电价如表1所示，其中高峰时刻为10:00-17:00，平时时刻为5:00-9:00和18:00-20:00，低谷时刻为1:00-4:00和21:00-24:00，光伏及建筑冷热电负荷设备等参数数据均从该服务区获取。模型通过MATLAB调用YALMIP工具箱，利用CPLEX求解器进行求解。

表1 配电网售电价及电动汽车购电价

元/kW·h

时刻	高峰	平时	低谷
配电网售电价	0.68	0.5	0.3
EV购电价	1.25	0.82	0.54

4.1 高速公路服务区微能网调度结果与分析

图2为在确定性方案下系统的电平衡图。在确定性调度方案中，系统运行成本为12 613.92元，碳交易成本为10 390.99元，电动汽车充电收益为24 611.48元，所以最后系统获得了1 606.57元的利润。在11:00-14:00时，虽然电动汽车充电负荷达到高峰，但是此时刻的光伏出力达到最大值，故此时的微能网从配电网中购电量减小。

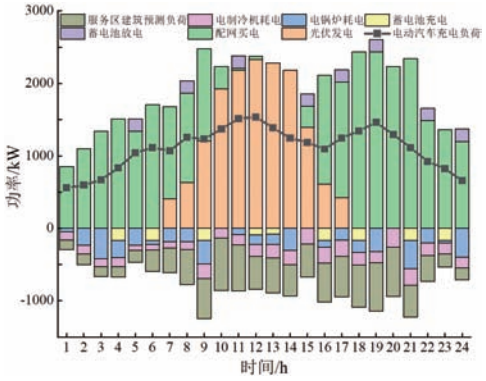

图2　确定型方案电平衡图

该服务区所在地区气温总体较高，冷负荷使用量较大，而热负荷在冷热负荷中占比较小且一天内波动不大。在DG高电价而EV低电价时期，微能网不仅买电较少还会优先利用蓄电池充放电和消纳光伏；而在DG低电价EV高电价时期，系统则相对买电较多但仍会优先消纳光伏。通常，微能网系统的电力采购主要为了优先满足外部电力负荷的需求；然而，为了提升系统经济效益，调度方案倾向于在DG电价较低时，通过实时电力市场购买电能，以满足负荷需求，并利用电动汽车高电价时段以实现最大利润。HSAMEG通过实施图2中所示的分时电价策略，不仅可以满足基础负荷需求，而且利用电价高峰期间的优势，获得较大的日利润。

4.2　高速公路微能网调度结果分析

在高速公路服务区运营中，不仅EV负荷的实时波动对运营策略产生影响，而且极端天气也会对微能网稳定性产生一定冲击。本研究定义了电热冷负荷波动的幅度为不确定度，并通过设定偏差因子的范围，来探讨不同风险态度下的决策方案。

表2列出了在不同偏差因子下，高速公路微能网服务区在采用风险探索和风险厌恶两种风险应对方案时的负荷不确定度和日利润情况。这两种策略分别基于稳态模型和机遇模型进行决策优化。

表2　计算结果表

风险调度方案	δ_m/μ_m	∂	日利润/元
风险探索方案	0	0	1 606 .57
	0.02	0.013	1 620.21
	0.04	0.049	1 635.88
	0.06	0.108	1 646.52
	0.08	0.196	1 661.97
	0.1	0.202	1 675.65
风险厌恶方案	0	0	1 606.57
	0.02	0.028	1 585.97
	0.04	0.034	1 570.41
	0.06	0.056	1 552.3
	0.08	0.078	1 534.77
	0.1	0.105	1 516.02

以稳态/机遇偏差因子$\delta_m=\mu_m$ = 0.04为例，当系统调度选择保守型方案，负荷需求在正向0.034及以下范围内波动时，在该偏差系数下系统的调度日利润不低于1 570.41元。在实时负荷需求在负向0.108及以上范围内波动时，基于IGDT的高速公路服务区微能网调度日利润可以达到1 646.52元。

在激进模型如图3所示，参数δ_m与∂呈现出正相关性，而与系统日收益同样展现出正相关性。这是因为随着稳态偏差因子在一定范围内不断增大，负荷不确定度也在增大，即EV不确定性负荷在标准值正向范围内波动越大，HSAMEG卖电收益也越多，虽然此时买电成本较确定性情况较多，但增幅小于收益，因此，总体来说系统负荷不确定性的增加可以给服务区收益带来正面影响，即负荷偏差系数∂越大，负荷不确定性带来的潜在利润也越多。

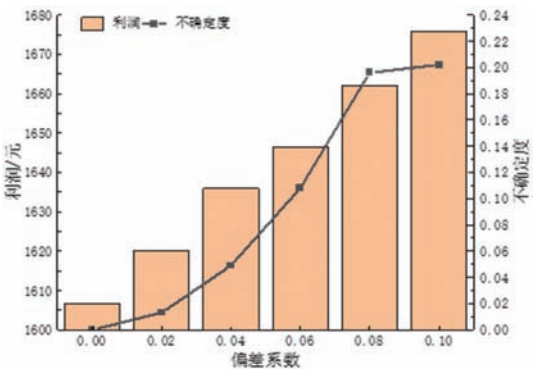

图3　风险探索方案下日利润和不确定度

与之相反，如图4所示，在稳态性分析框架下，参数μ_m与∂呈现出正相关性，而与系统日收益展现出负相关性。这是因为随着机遇偏差因子在一定范围内不断增大，负荷不确定度也在增大，HSAMEG卖电收益也越少，虽然此时买电成本较确定性情况较少，但减幅小于收益，因此，在该特定偏差方向上的不确定性将对系统的日收益产生不利影响。

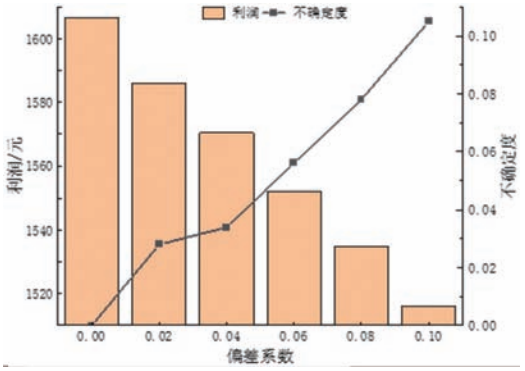

图4　风险厌恶方案下日利润和不确定度

4.3 高速公路微能网碳排放结果分析

HSAMEG在不同调度方案下碳排放量的变动情况如图5所示。

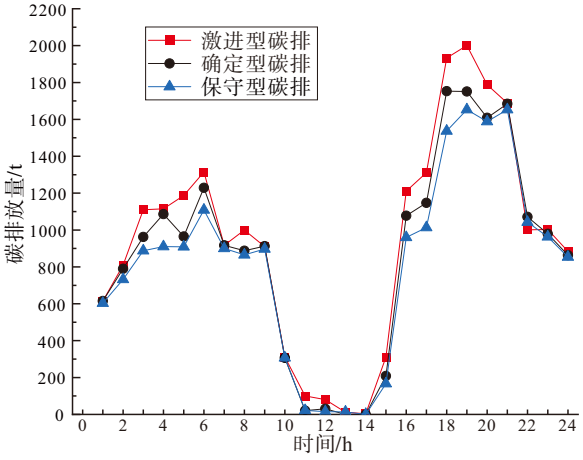

图5 不同方案下碳排放图

以参数组合μ_m和δ_m等于0.04为例，在保守型方案下，HSAMEG的碳排总量较低，且在负荷需求或电价发生波动时，碳排放量相对于确定性方案波动较为平稳，这是因为在该策略下，各种负荷在标准值以下波动，即保守型负荷小于标准值，因此买电普遍低于确定型方案，碳排也基本低于确定型。保守型调度方案减少了园区与上级DG买电和下级EV卖电，优先消纳光伏，优化能量内循环，因此牺牲了一定程度的经济效益，但保证了电力供应的稳定性和系统的低碳性；而在风险探索方案下，HSAMEG的碳排量最大，碳排波动也最大。具体来说，由于在激进策略下各种负荷均在标准值以上波动，即激进型负荷大于标准值，受限于微能网系统的处理容量，系统只能买电满足负荷需求的不确定性，使得DG买电排放的二氧化碳量显著高于确定型。激进型调度方案增加了园区与外界的能量交换，牺牲了一定程度的稳定性和低碳性但保证了经济效益。这揭示了基于IGDT方法的应用，系统能够根据不同的风险偏好，灵活调整并选择最适宜的调度方案。

5 结语

文中在对高速公路服务区确定型优化调度的基础上，通过引入IGDT算法来处理电动汽车充电负荷带来的不确定性，分别建立了激进型和保守型2种不确定性调度模型，并对具体算例进行了分析验证。激进型服务区的碳排放量虽然略微上升，但是可以保证服务区的利益最大化；保守型服务区能够最大程度地保证服务区的稳定。通过IGDT策略对高速公路服务区进行调度，在保证系统稳定性和低碳性的同时，保证一定的经济效益。

参考文献：

[1] 新华社.习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL].人民日报，(2020-09-22)[2021-03-17].

[2] 王新，李鹏，阎西康，等.基于碳排放测算的高速公路服务区低碳建设策略[J].交通节能与环保，2022，18(5)：97-103.

[3] 李杰，高爽，袁博兴，等.采用融合遗传算法的高速公路服务区综合能源系统优化调度研究[J].西安交通大学学报，2024，58(5)：200-211.

[4] 贾利民，师瑞峰，吉莉，等.我国道路交通与能源融合发展战略研究[J].中国工程科学，2022，24(3)：163-172.

[5] 王芸.开放式服务区在高速公路中的设计探讨[J].交通世界2022(21)：4-6.

[6] BEN-HAIM Y.Uncertainty，probability and information-gaps [J].Reliability Engineering & System Safety，2004，85(1/2/3)：249-266.

[7] 李东东，尤杨，周波.基于信息间隙决策理论的售电公司参与多市场的优化决策[J].电网技术，2022，46(12)：4778-4788.