

基于MOPSO高速公路风光互补系统多目标优化研究

刘姝莉

内蒙古科技大学土木工程学院, 中国·内蒙古 包头 014010

摘要: 本文的研究是围绕着高速公路能源系统迈向清洁能源发展的关键技术方法展开的, 提出一种基于并网型风光互补系统的多目标优化配置方法。其目标是在全生命周期成本最小化、碳排放量最少的前提下达到最大的可再生能源自给量, 并通过多目标粒子群优化算法求解, 通过对山东临沂到滕州高速公路为例的应用表明在光伏发电系统装机容量 7.2MW 和风电机组容量 0.8MW 的理想配置下能够实现 98% 以上的年平均自给率, 在整个生命周期期间年平均运营费用约为 280 万元, 一年可以减排大约 224 吨 CO_2 , 实现了经济效益最大, 环境污染程度最小以及能源利用率最高三者的和谐统一。对今后交通行业绿色化发展具有一定的参考价值和技术借鉴作用。

关键词: 高速公路; 风光互补; 多目标优化; MOPSO 算法

Research on multi-objective optimization of expressway wind-solar hybrid system based on MOPSO

Liu Shuli

School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, China Inner Mongolia Baotou 014010

Abstract: This study focuses on key technical methods for transitioning highway energy systems towards clean energy development, proposing a multi-objective optimization configuration method based on a grid-connected wind-solar hybrid system. The objectives are to maximize renewable energy self-sufficiency while minimizing life-cycle cost and carbon emissions. A multi-objective particle swarm optimization algorithm is used to solve the problem. A case study on the Linyi-Tengzhou expressway in Shandong Province shows that an ideal configuration—7.2 MW of photovoltaic capacity and 0.8 MW of wind turbine capacity—achieves an average annual self-sufficiency rate of over 98%. The average annual operating cost during the entire life cycle is about 2.8 million CNY, and the system reduces CO_2 emissions by approximately 224 tons per year. This configuration harmoniously achieves maximum economic benefit, minimal environmental impact, and highest energy utilization efficiency. The results provide a valuable reference and technical insight for the green development of the transportation industry in the future.

Keywords: Expressway; Wind-PV hybrid system; Multi-objective optimization; MOPSO algorithm

0 引言

基于“碳达峰”“碳中和”的国家政策方针指引下, 交通运输行业实现绿色低碳发展是重中之重的任务之一^[1], 而高速公路沿线的服务配套设施(包括收费站、隧道和服务区等)具有明显的高能耗属性并伴随着大量的温室气体的排放^[2], 利用区域内的风能和太阳能资源来建立风光互补发电体系可以有效的解决此类设施的能源供应问题同时带来可观良好的环境效应及发展潜力^[3-4], 对于促进交通基础设施的绿色发展有现实意义。

目前学界对于独立微电网及单一目标优化方面已经有了一些研究成果, 但是对于高速公路联网环境下的风光互补系统整合性的研究还不是很完善, 尤其是全寿命周期成本、碳排放量和可再生能源自给率之间多元协同优化还未

有成体系化的解决策略。基于这样的研究缺憾, 本文选择山东省临滕高速为例, 重点建立并网型风光互补系统多目标优化组合方案。把负荷预测技术、风能太阳能资源估算方法、多目标决策分析框架、高性能计算算法等多种重要因素结合起来研发出一个完整的综合分析平台为相关的工程项目提供持续发展的理论依据和参考。

1 高速公路负荷建模

本文的研究以高速公路上面影响比较大的能源消耗节点作为主要的研究对象, 即收费站, 隧道区段, 服务区、线路照明装置等重要地方, 在此基础上建立一个时序化的精确化负荷预测模型, 在各个子系统构建的运行特性模型的过程中充分考虑到车辆流量、光照度与气温变化等对能源需求量产生的影响方式。总体负荷计算就是把各个部分

的每个小时的数据加总起来进行准确地估计。具体的技术方案结构会在接下来的内容中展示出来。

1.1 收费站负荷建模

含车道与门架设备、广场与标识照明负荷,考虑 ETC 与 MTC 车道差异、车道开启数随流量自适应,照明负荷受外界照度与交通量影响。

1.2 隧道负荷建模

由照明负荷与通风负荷构成,照明负荷含基础照明与洞口过渡照明,受外界照度、交通速度与交通量影响;通风负荷以污染物控制与能见度控制为目标,排放强度与交通量、速度相关。

1.3 服务区负荷建模

含建筑与商业用能、交通与站外设备用能,建筑用能考虑室内照明、制冷冷藏、空调通风等(受照度、环境温度影响),站外设备含室外照明、标识及 VMS 设备(受照度与交通量影响)。

1.4 沿线照明及附属设施负荷建模

含道路照明与监控通信负荷,道路照明受照度、交通量与天气影响,监控通信为基础固定负荷叠加设备运行负荷。

系统全逐时总负荷为各场景负荷叠加:

$$L_t = P_t^{tol} + P_t^{tum} + P_t^{srv} + P_t^{lin} \quad (1)$$

其中, P_t^{tol} 为收费站负荷, P_t^{tum} 为隧道负荷, P_t^{srv} 为服务区负荷, P_t^{lin} 为沿线照明与附属设施负荷, L_t 为系统总负荷。

2 风光发电系统建模

2.1 风电系统出力建模

风电功率预报的主要步骤可以分为两个阶段:第一阶段是利用垂直内插法,把参考高度处测得的风速观测值转化为轮毂高度所对应的实时风速序列;第二阶段是基于大气压强以及绝对气温等多个气象指标基础上对初始风速数据加以校正、改进和完善,进而完成对于某个区域具体风电出力情况精确的数量化估算。

2.2 光伏系统出力建模

光伏出力建模分为三步:首先将水平面辐照度换算为组件面辐照度,其次结合环境温度计算电池工作温度,最后考虑污垢、遮挡、线损等等效损耗,得到光伏组件直流侧输出功率。

2.3 风光互补系统出力建模

风电光伏系统并网运行情况下,其总的发电量为风力发电发出的电和光伏发电量之和。由于并网接入环境所限定,

整个并网总出力应符合一定约束要求,不能大于规定的最大允许出力,否则超过部分会被迫切除。据此,风力发电和光伏发电的比例关系可用参数 α 来准确表示出来。

2.4 风光互补系统能量平衡模型

系统遵循自发自用、余电上网、缺电购入的并网策略,逐时能量平衡满足风光聚合出力 + 购电功率 - 售电功率 = 系统综合负荷,且购售电互斥、均有并网功率上限,净交换功率为负荷与风光聚合出力的差值,正差值为购电、负差值为售电。

3 多目标优化模型构建

3.1 目标函数

本研究设立三个相互关联且存在权衡关系的优化目标,以最小化形式统一求解。

3.1.1 全生命周期成本最小化

总成本含一次投资、年运行维护费、购售电结算费、设备更换费,扣减项目期末残值,考虑贴现率对未来费用的折算

3.1.2 全生命周期碳排放最小化

碳排放含建设制造阶段的隐含碳排放、运行阶段外购电的碳排放,售电产生的减排量可按系数抵扣运行碳排放。

3.1.3 可再生能源自给率最大化

自给率 $SSR = 1 - \text{年总购电量} / \text{年总综合电耗}$,以 $f_3 = 1 - SSR$ 最小化实现该目标最大化。

3.2 决策变量

本文的决策变量为风电装机容量 C_w 与光伏装机容量 C_p ,二者均有装机容量上限,取值范围为 $0 \leq C_w \leq C_{wmax}$ 、 $0 \leq C_p \leq C_{pmax}$ 。

3.3 约束条件

模型设置三大核心约束,保障系统运行的合理性与可行性。

3.3.1 能量平衡约束

$$G_w + t + G_p + t + P_t - \text{buy} - P_t - \text{sell} = L_t$$

3.3.2 功率、容量范围约束

风光出力不超过装机容量与可利用率的乘积,购、售电功率不超过各自并网上限,装机容量不超过技术上限。

3.3.3 购售电互斥约束

同一时段内系统无法同时购电与售电,即 $P_t \cdot \text{buy} \cdot P_t \cdot \text{sell} = 0$,且购、售电功率均非负。

4 案例研究

4.1 案例概况与数据

本文的研究是以山东省临滕高速为案例,山东临滕高

速全长约 140.77km, 在路上有多个收费站、服务区、隧道等典型的耗能节点, 在区域内风能和太阳能资源有一定开发潜力。考虑到项目的具体情况并结合有关统计数据, 本文选取的主要的技术经济指标有: 平均风速为 5.5m/s, 光伏板平均年发电量为 1520kWh/m², 供电每千瓦时电能的 CO₂ 排放量为 0.587t CO₂/MWh, 外购电费为 0.60 元 / kWh, 售电价格是 0.45 元 / kWh。各用电单元的实有负载特性也已准确计算得出, 最高买电功率可达 15MW, 最高卖电功率可达到 10MW。

4.2 碳排放总量测算

临滕高速路的年平均耗电量大约为 11.2 亿千瓦时 (GWh), 其中隧道照明及通风设施耗电量较大。经过模拟分析得出 6MW 光伏系统和 0.6MW 风力发电系统联合供电方式可以带来每年发电量约为 9.57 亿千瓦时, 使清洁能源自行供给率达到了 85.5% 左右。在月度分布方面, 夏天和秋天的利用率为 100% 以上, 可见风电与光伏资源的时间上的相互补充对于保证电能稳定供应意义重大。

4.3 模型求解

本文的研究对象是基于 6.0MW 光伏电站以及 0.6MW 风力发电站联合起来的复合型分布式电源系统, 利用了多目标粒子群优化算法 (MOPSO) 来进行系统的配置优化设计, 在算法结构里加入了一个惩罚因子, 同时配合边界修正方法, 得到了一组非支配解集, 也就是所谓的 Pareto 最优解集。

研究表明, 在风光互补发电项目的扩展上, 再生能源可自主供给能力和系统运行期碳排放都表现出良好的发展趋势。初期年度总投资呈下降趋势, 但在系统达到一定大小之后又会出现上升的情况。这主要是因为过度投资造成的前期资本加大还有电网接入容量不足造成的导致产生了边际效应递减的现象。各方案比较下, “光伏 7.2 兆瓦 + 风电 0.8 兆瓦” 的组合方式 (记作方案 D) 位于帕累托前沿曲线上的 “膝点” 附近, 被认为是最佳方案。此方案一年内预计可以获得大约 11.67GWh 的绿色电力, 基本实现了自给自足的目标。并且整个生命周期内的平均每年维护成本只有 280 万元左右, 每年能够削减的二氧化碳排放量大约有 224 吨。而极限装机方案尽管也可以达到 100% 自给, 但由于投资太大, 一年的成本又涨回来了, 综合收益并不是很好。

5 结语

本文的研究以高速公路并网型风光互补系统多目标优化设计为研究主题, 针对其主要矛盾展开研究, 在此基础

上创建精细负荷预测模型以及风光资源时序模拟平台, 应用多目标规划理论与改进的 MOPSO (混合粒子群优化算法), 对系统在其整个生命周期过程中所涉及到的经济性、环境适应性、能源自给率等等重要指标进行全方位考察及整体优化。

依据对临滕高速公路的实际调查发现, 在经济性、环境保护性能以及能源自给程度等方面存在着较大的矛盾性和取舍问题。经过全面分析得出结论认为, 7.2MW 光伏电站搭配 0.8MW 风电站的配套方式具有最好的匹配效果, 不仅可以达到将近百分之百的一年中能源自给率, 而且还可以使整个项目生命周期的平均维护成本控制在大约 280 万元左右, 同时大幅度减少每年的二氧化碳排放量约为 224 吨, 从而提高项目的经济效益, 促进了绿色环保事业的发展, 提高了能源供给安全指数, 做到经济、环保、安全三方面的协调发展。

本研究构建的优化框架与求解方法, 为高速公路清洁能源系统的规划与建设提供了科学的理论依据和可行的技术路径, 也为同类交通基础设施的能源低碳转型提供了参考。

参考文献:

- [1] 中国发展网. “双碳” 目标下交通运输如何当好 “开路先锋” [EB/OL]. (2022-07-02).
- [2] 张灿, 张明震. 中国新型公路交通能源综合系统发展对策研究[J]. 中国能源建设, 2024, 6:1-12.
- [3] 姚磊, 李超, 王鹏. 高速公路服务区风光储能系统容量配置优化[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(4):95-104.
- [4] 林航, 王凯, 郑晓宇. 风光互补发电系统生命周期成本与碳排放优化分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 95-104.
- [5] 宋洪磊, 张潇, 赵东旭. 基于改进 NSGA-II 的风光储系统多目标优化研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(9): 1251-1258.
- [6] 赵振宇, 李淑雅, 王子健. 基于源荷匹配的风光互补系统优化配置研究[J]. 电网技术, 2021, 45(4):1220-1230.
- [7] 付豪, 崔培强, 唐茜等. 高速公路风光储能系统源荷匹配及容量配置优化[J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2024, 56(2):32-41.

作者简介: 刘姝莉 (1999.08-), 女, 汉族, 山东菏泽人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 从事高速公路风光互补系统多目标优化研究。