Transmission and Distribution Engineering and Technology 输配电工程与技术, 2024, 12(3), 44-51
Published Online September 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/tdet
https://doi.org/10.12677/tdet.2024.123005

组合光伏发电的高速公路的供电方案

冯　冲[1]，刘文鑫[2]，刘若旭[1]，刘维权[1]，张家安[2]

[1]河北高速公路集团有限公司京秦分公司，河北 秦皇岛
[2]河北工业大学电气工程学院，天津

收稿日期：2024年8月18日；录用日期：2024年9月7日；发布日期：2024年9月18日

摘　要

交通运输部“十四五”规划明确提出了安全、便捷、绿色、经济的交通体系发展规划，高速公路作为现代综合交通运输体系中的重要组成部分，对国民经济的发展作用不容忽视。随着高速公路里程以及电动交通运输工具的不断增加，传统高速公路供电方式已经难以满足现代高速公路的快速发展的需求。本文基于高速公路的传统供电方式和负荷特点，提出了一种新型的结合新能源发电的组合式供电技术方案，并进行了优化配置，为高速公路供电系统的升级换代提供了一种新的途径。

关键词

高速公路，组合供电，可再生清洁能源

Power Supply Scheme for Highways Combined with Photovoltaic Power Generation Sources

Chong Feng[1], Wenxin Liu[2], Ruoxu Liu[1], Weiquan Liu[1], Jia'an Zhang[2]

[1]Jingqin Branch of Heibei Expressway Group CO., LTD, Qinhuangdao Hebei
[2]School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin

Received: Aug. 18th, 2024; accepted: Sep. 7th, 2024; published: Sep. 18th, 2024

Abstract

The "14th Five-Year Plan" of the Ministry of Transport clearly puts forward the development plan of a safe, convenient, green and economical transportation system, and the role of expressways as an important part of the modern comprehensive transportation system cannot be ignored in the development of the national economy. With the increasing mileage of expressways and electric

文章引用: 冯冲, 刘文鑫, 刘若旭, 刘维权, 张家安. 组合光伏发电的高速公路的供电方案[J]. 输配电工程与技术, 2024, 12(3): 44-51. DOI: 10.12677/tdet.2024.123005

vehicles, it is difficult for traditional expressway power supply methods to meet the needs of the rapid development of modern expressways. Based on the traditional power supply mode and load characteristics of expressways, this paper proposes a new type of combined power supply technology scheme combined with new energy power generation, and optimizes the configuration, which provides a new way for the upgrading of expressway power supply system.

Keywords

Highways, Combined Power Supply, Renewable and Clean Energy

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

近年来，高速公路总里程逐年上升，截至 2021 年底，全国高速公路总里程达到 18.4 万公里[1]，同时电动汽车等新型用电设备催生的充电负荷也急剧上升，传统的带状式供电方式已经不能满足高速公路用电设备的快速发展以及高速公路安全、绿色、经济的需求，供电方式的智慧化升级改造工作势在必行[2]。

在“双碳”战略目标下，交通运输行业面临严峻的减排降碳压力。建立一个以清洁能源为主、高效利用能源的新型交通能源系统是至关重要的。目前，国内结合新能源的高速功率供电系统应用研究还比较少，但仍取得了不少进展。曹令通[3]的研究探讨了在高速公路监控摄像枪供电中采用风光互补电源系统的实用性，提供了具体的独供电系统技术方案。杜长东和李洪祥[4]等人针对高速公路小功率设备的供电需求，分析了太阳能和风能供电的案例，并提出了优化和推广太阳能风能供电系统的建议。尹凯雄[5]基于广肇高速公路外场视频监控系统的应用，对比了传统供电方式的局限，强调了风光互补供电方式的优势，并指出了在应用时需要关注的关键问题。这些研究都关注了将可再生能源应用于高速公路供电系统的实际应用和改进策略。

本文首先讨论、分析了高速公路不同类别负荷的特点和需求，并在此基础上，基于国内高速公路传统供电技术方案，提出了一种光伏与市电互补的组合供电技术方案，旨在满足高速公路供电绿色、安全、经济的需求。

2. 高速公路传统供电方案

高速公路供电系统用电负荷按照用电等级可以分为三个负荷等级，隧道内的照明以及消防为一级负荷[6]，一级负荷不允许中断供电，所以需要由两个相互独立的电源单独供电，当发生任何一种故障时，两个电源的任何部分都应该保持完好，以免同时受到损坏害，以此保证电源的不间断；通风监控属于二级负荷，由两条回路组成，供电来自同一区域变电站中不同的变压器，以确保供电的安全可靠；收费站监控中心等用电设备为三级负荷[7]。不同的负荷等价下，供电的方式不同，目前，高速公路传统的供电方案有五种。

2.1. 低压 380 V 直接供电

如图 1 所示，低压 380 V 直接供电方案直接从变电站的低压配电柜获取 380 V 电压，通过低压电线传输到各个负载点，无需进行电压转换，因此系统结构简单，维护成本较低。这种供电方式经济实惠，适合供电需求相对较小、距离较近的区域，如高速公路沿线的服务区、小型工厂等。

然而，低压 380 V 直接供电的局限性在于供电距离有限，一般不超过 2 公里，这意味着它可能无法满足远距离区域的电力需求。此外，虽然耐压等级要求较低，但长期使用仍需确保电缆和供电设施的正常维护，以防止因老化或故障导致的供电问题。

综上所述，低压 380 V 直接供电方案在成本效益和便捷性上具有优势，但在供电范围和容量上有所限制。选择哪种供电方案，需要根据实际的用电需求、预算和地理位置来综合考虑[8]。

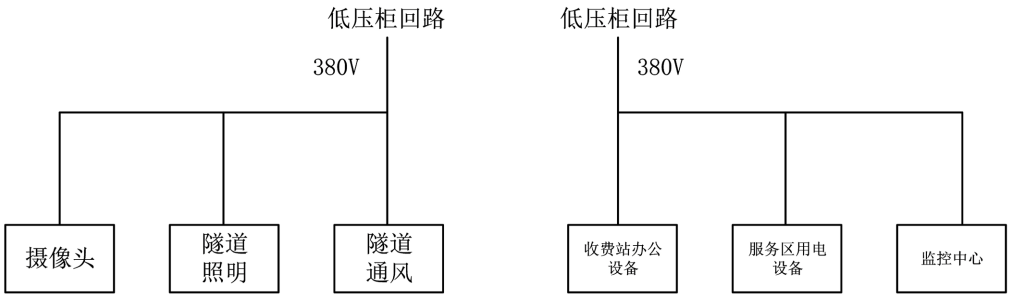

Figure 1. Diagram of low-voltage 380 V direct power supply system
图 1. 低压 380 V 直接供电系统图

2.2. 高压 10 kV 间接供电

如图 2 所示，高压 10 kV 间接供电方案是一种常见的工业电力供应方式。它通过变电站的高压柜，将电能提升至 10 Kv (部分情况下为 3 kV)，然后通过高压电缆传输到负荷中心。这种方案的优势在于供电距离远，供电能力强大。

然而，这种间接供电方式也存在一些特点。首先，由于涉及到电压等级的转换，系统设计和维护相对复杂，需要专业的电气知识和设备。其次，高压电缆和供电设备的耐压等级要求较高，以确保电力传输过程中的安全。此外，如果发生故障，故障排查和修复可能需要更多的时间和资源。

总的来说，高压 10 kV 间接供电方案在提供高效电力的同时，也带来了更高的初期投资和运营成本，故经济性低于低压直接供电方案[9]。

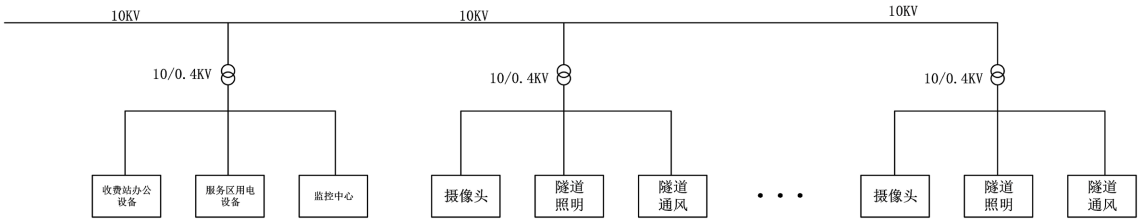

Figure 2. Diagram of high-voltage 10 kV indirect power supply system
图 2. 高压 10 kV 间接供电系统图

2.3. 升降压 660 V 供电

如图 3 所示，660 V 的升降压供电方案是一种适用于中等规模的工业供电方式。它首先通过低压配电柜将 380 V 电能升压至 660 V，然后通过电缆传输到负荷中心，再在负荷端降压至 380 V 供用户使用。这种方案的优势在于供电能力较强，供电距离适中，可以满足一些中等规模的供电需求。

然而，这种方案的经济性介于高压和低压之间，设备成本和维护成本相对较高。同时，由于涉及到电压的升压和降压，供电质量受线路负荷动态变化的影响较大。在长距离或负载分散的场景下，线路压

降可能导致末端电压不稳定，影响设备的正常运行和用户体验。因此，对于对供电质量要求高的应用，如精密设备或电子设备，可能需要额外的电压稳定措施。

总的来说，660 V 的升降压供电方案在一定程度上平衡了供电距离、能力与经济性，但对供电质量的控制和稳定性管理要求较高。在实际选择时，需要根据具体的应用需求、设备敏感度和预算来权衡[8]。

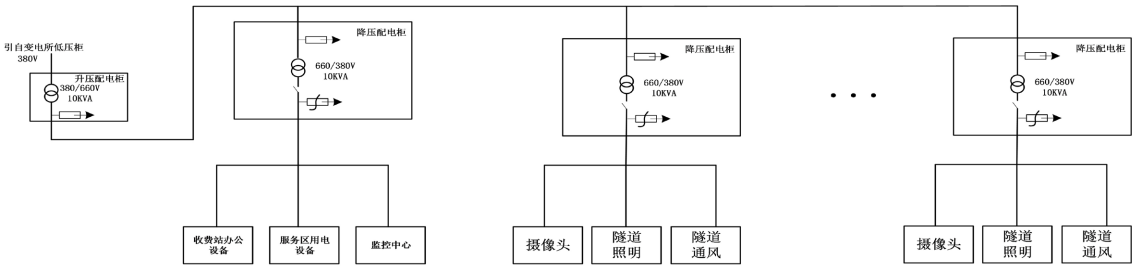

Figure 3. Step-up and down-voltage 660 V power supply system
图 3. 升降压 660 V 供电系统图

2.4. 风光互补供电

风光互补发电系统是一种创新的可再生能源解决方案，它整合了风能和太阳能的利用。核心组成部分包括风力发电机、太阳能光伏电池板、智能控制器、电池储能系统、逆变器，以及连接交流和直流负载的设备。如图 4 所示，这套系统巧妙地结合了风能和太阳能的发电优势，旨在提供稳定且环保的电力供应。简化来说，它就是利用风和阳光交替发电，以确保能源的持续供应。

然而，风光互补发电系统的应用范围相对有限，它主要适用于风速稳定且太阳能资源丰富的地区。具体来说，它要求年平均风速至少达到 3.5 米/秒，且年度太阳能辐射总量大于 5000 兆焦耳/平方米。这意味着在风力和日照条件较差的地方，这种系统可能无法达到最佳性能或经济效益。

总结起来，风光互补发电系统是一种高效且环保的电力来源，但在实际部署时需要考虑当地的气候条件和资源状况。它在适宜的环境下能提供可靠的电力供应，但对地理环境有一定的要求[10]。

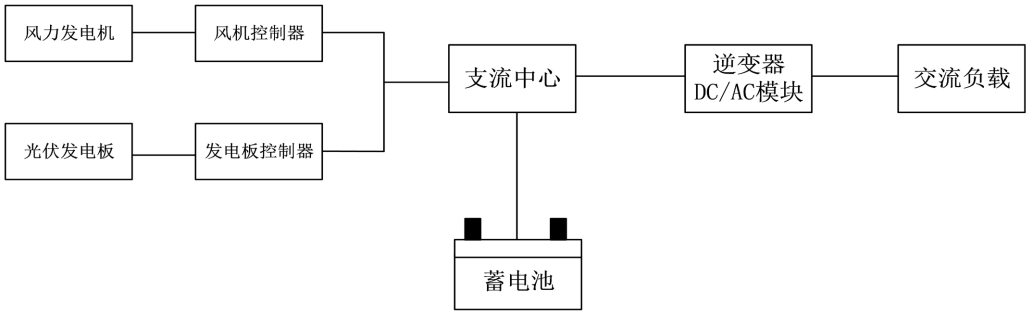

Figure 4. Diagram of wind-solar power supply system
图 4. 风光互补供电系统图

2.5. 分布式智慧节能供电

如图 5 所示，分布式智慧节能供电方案采用三相 380 V 输入，利用 IGBT 等大功率逆变技术，将电能转换为单相 220 V 输出。这种技术允许电力从上端电源柜通过电缆传输到较远的用电点，传输距离可达 4 至 30 公里，具有较大的覆盖范围。由于是单相供电，无需担心三相负载的平衡问题，简化了系统设计。

然而，这种供电方式并不适用于所有场景。它特别适合供电距离较长且需求分散的区域，如工业区、商业园区或住宅区，但不适用于距离较短且设备布局呈放射状的场合，因为这可能导致电缆和设备的密集部署，可能增加成本和维护复杂性。此外，对于短距离的设备，可能需要考虑其他更直接、高效的供电方式。

总的来说，分布式智慧节能供电方案在远程、分散的电力需求中表现出色，但在设计和选择时，需要根据具体的应用场景和设备布局来权衡其适用性和效率[11]。

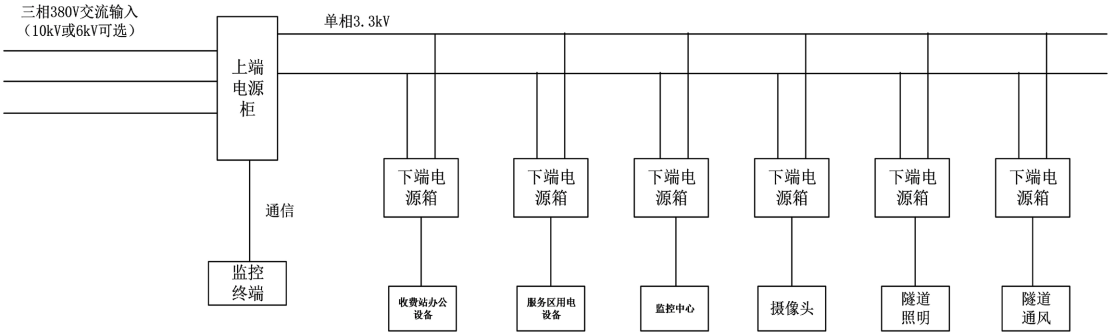

Figure 5. Diagram of a distributed smart energy-saving power supply system
图 5. 分布式智慧节能供电系统图

综上所述，目前传统的高速公路供电方案各有优缺点，表 1 列出了各种供电方案的优劣势。

Table 1. Comparison of the advantages and disadvantages of traditional highway power supply schemes
表 1. 高速公路传统供电方案优缺点对比表

	低压 380 V 直接供电	高压 10 kV 间接供电	升降压 660 V 供电	风光互补供电	分布式智慧节能供电
绝缘等级	低	高	低	低	中
功率因数	低	低	低	低	高
供电距离	4 km 左右	14 km 左右	10 km 左右	就近设置新能源发电装置	30 km
供电功率	小	大	小	小	大
电源质量	差	差	差	差	高
三相电源	能提供	能提供	能提供	加入逆变器能提供	不能提供
清洁能源利用率	低	低	低	高	高

3. 引入新能源的高速公路组合供电方式

从时间尺度分析，高速公路负荷可以分为短期、中期和长期三个阶段。短期负荷主要受季节性因素和特殊事件影响，如节假日、旅游高峰期，此时车辆流量显著增加，对电力需求产生临时性的冲击。这种负荷波动大，对电力供应的稳定性提出了挑战。中期负荷通常指的是日常交通流量，受工作日和周末的交替影响，呈现出一定的规律性。它相对稳定，但可能随着交通规划和人口流动的变化而有所调整。长期负荷则考虑的是高速公路的长期发展趋势，包括基础设施的升级、车辆保有量的增长、电动汽车的普及等因素，这些都会对电力需求产生持续的影响。但是由于现代电动汽车的发展，电动汽车的数量急剧增加，电动汽车的充电需求增大了高速公路的用电负荷，而由电动汽车的车流量具有明显的时间特征，考虑到电动汽车通常白天整体用电负荷大，夜间负荷较小的特点，本文提出并初步设计了一种光伏发电

和市电相结合的组合式供电模式。

3.1. 组合供电方式的系统结构

据高速公路的用电特性以及光伏发电特性，市电 + 太阳能光伏分布式供电的组合方案如图 6 所示。每间隔 100 km 左右，在道路两旁安装太阳能光伏发电板以及蓄电池。每 100 km 预计可开发的光伏规模约为 50 MW，在白天日照充分时，太阳能光伏直接给高速公路供电系统供电，同时剩余发电量给蓄电池充电；当阴天或者持续阴雨天时，光伏发电量不足于供给高速公路的用电时，由三电源切换器将光伏直接供电切换到蓄电池供电，由蓄电池给高速公路机电设备进行供电；在蓄电池电量不足情况下，由三电源切换器将蓄电池供电切换到公共市电，由市电对高速公路的用电设备进行供电。此供电方案即保证了高速公路供电的可靠性，且促进了新能源的消纳，实现了高速公路的减碳。

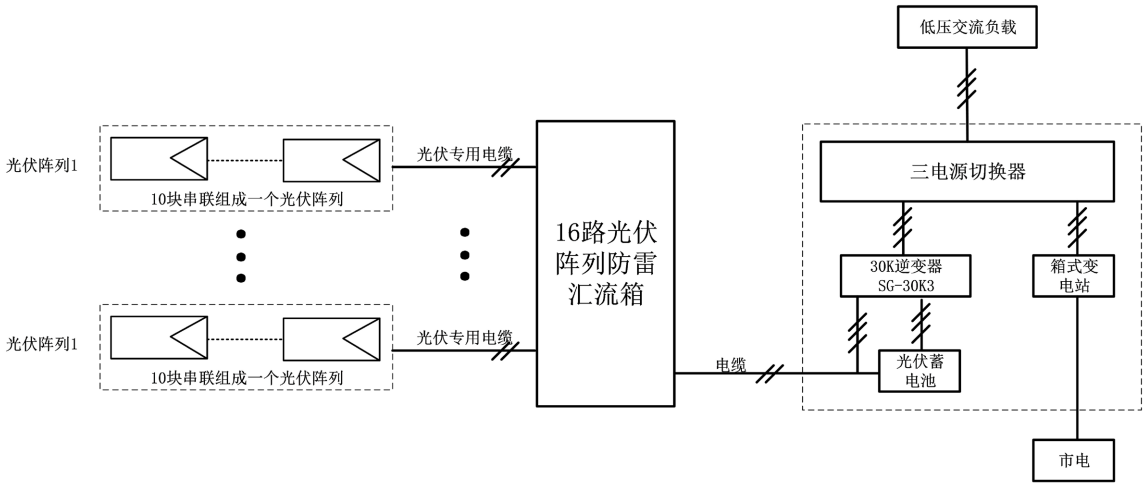

Figure 6. Block diagram of mains + solar photovoltaic power supply system
图 6. 市电 + 太阳能光伏供电系统结构框图

3.2. 光伏供电系统容量优化配置

如图 6 所示，市电 + 太阳能供电系统主要包括光伏电源、储能电池及变流器设备，为保证其性价比，需要综合考虑经济效益和环境效益。一方面要降低建设成本和运行成本；另一方面，要尽可能的提高光伏发电占供电的能力比例。其系统配置属于多目标寻优问题，需要建立目标函数和相应的约束函数求解获得。

3.2.1. 目标函数

基于引入光伏的高速公路供电系统结构，建立各单元成本的数学模型和容量优化配置的目标函数。

在满足高速公路各级负荷用电需求的情况下，设计优化目标如下：系统总投资、运行成本最小；光伏发电的利用电量占总电量的比例(The Percentage of the Utilized PV energy, PUPT)最大。目标函数如式(1)所示。

$$\begin{cases} \min C_{\Sigma=} \min\left(C_{PV}+C_{B}+C_{C_PV}+C_{C_BA}+C_{C_G}+C_{G}\right) \\ \max PUPT = \max \dfrac{\int_{0}^{8760}\left(P_{PS}(t)-P_{G}(t)\right)dt}{\int_{0}^{8760}P_{EV}(t)\,dt}\times 100\% \end{cases} \tag{1}$$

式中，C_{Σ} 为系统总成本；$C_{PV},C_B,C_{C_PV},C_{C_BA},C_{C_G},C_G$ 分别为光伏电池总成本、储能电池总成本、光伏变流模块总成本、储能变流模块总成本、并网变流模块总成本及从市电的购电费用。$P_{PS}(t),P_G(t)$ 为 t 时刻高速公路的总消耗功率以及从电网吸收的功率。

3.2.2. 约束条件

对某一段高速公路来说，高速公路的用电需求和年日照规律是一定的。因此，光伏供电系统的决策变量为：光伏组件倾角 θ、储能电池数量 N_B、储能变流模块数量 N_{C_BA}，约束条件如下：

$$\begin{cases} 0 \le \theta \le 90^{\circ} \\ 0 \le N_{PV} < N_{PV.\max} \\ 0 \le N_{C_BA} < N_{C_BA.\max} \end{cases} \tag{2}$$

式中，$N_{PV.\max}$、$N_{C_BA.\max}$ 由实际情况确定，储能电池及相关 DC/DC 模块数量需根据充电需求划定合理的上下限，以减小最优解的搜索空间。

3.2.3. 模型的求解

优化模型的求解需要计算光伏充电站的系统投资、运行成本和光伏发电利用率。以建站成本、光伏发电利用率为优化目标，对组成光伏充电站的各单元进行容量优化配置，具有多目标、非线性、多约束的特点，所以带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)算法予以求解。

1) 设定种群数量 Np、终止迭代次数 C、交叉率与交叉算子参数、变异率与变算子参数，设置决策变量的上下限值。

2) 种群初始化

根据步骤 1)中设定的各项初始值，在决策变量的设定范围内随机生成 Np 个解，形成初始种群。

3) 快速非支配排序

(a)计算种群 Pi 中个体 i ($i=1,2,\cdots,Np$)的参数 ni (支配个体 i 的个体数)和 Si (被个体 i 支配的个体集合)；

(b) 找出 $ni=0$ 的个体，保存于集合 $F1$ 中；

(c) 对 $F1$ 中的每个个体 i，遍历其所支配的个体集合 Si 中的每个个体 j，执行 $nj=nj-1$，若 $nj=0$，保存个体 j 于集合 H 中；

(d) 记 $F1$ 中得到的个体为第一个非支配层的个体，以 H 为当前集合，重复上述操作，对整个种群进行分层。

4) 计算虚拟适应度(dummy fitness)

为保持个体多样性，防止个体在局部堆积，需要计算个体的拥挤距离。个体 i 的拥挤距离定义为二维欧式空间距离，该计算方法可使个体在目标空间较均匀地分布。

选择

5) 经过上述操作后，个体 i 有两个属性，即非支配排序 Ranki 和拥挤距离 dj。采用轮赛制选择算子，即随机选择 2 个个体 i 和 j，当 Ranki < Rankj 或 Ranki > Rankj 或 di > dj 时，认为个体 i 优于个体 j。

6) 交叉和变异

采用 SBX (simulated binary crossover)交叉算子和正态变异算子进行计算，二者相互配合可使遗传算法具有良好的全局和局部搜索性能，形成子代种群 Qt。

7) 精英策略

(a) 将父代种群 Pt 和子代种群 Qt 合并为统一种群，$Rt=Pt\cup Qt$；

(b) 对 Rt 进行快速非支配排序，计算每一个个体的局部拥挤距离，按等级高低逐一选取，直至数量达到 Np，形成新父代种群 $Pt+1$；

8) 重复 3)~7)直到满足迭代终止条件，得到多目标优化问题的 Pareto 最优解集。

4. 结语

本文对传统的供电方案进行分析比较，同时针对高速公路的负荷用电特性，提出并设计了市电 + 太阳能光伏分布式的供电方案并进行了优化配置，该技术方案充分利用了光伏发电的优点，由此产生的研究结论如下：综合考虑了经济效益和环境效益。一方面要降低建设成本和运行成本；另一方面，要尽可能的提高光伏发电占供电的能力比例，提出了多目标容量优化配置方法，并采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解。有利于高速公路供电系统的绿色、经济运行，为高速公路供电系统的升级换代提供了一种有效解决方案。

参考文献

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 我国公路总里程 10 年增长 112 万公里[EB/OL]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202311/content_6916796.htm, 2023-11-24.

[2] 罗陵. 湖南省高速公路全网供电改造方案探讨[J]. 中国交通信息化, 2021(11): 127-132.

[3] 曹令通. 风光互补供电系统在监控摄像机电源中的应用[J]. 科技资讯, 2007(30): 43.

[4] 杜长东, 李洪祥. 风光供电系统在高速公路中的应用[J]. 公路交通技术, 2008, 12(6): 134-137.

[5] 尹凯雄. 浅谈风光互补供电方式在高速公路外场视频监控系统中的应用[J]. 科协论坛, 2010(7): 31-32.

[6] 高龙, 马宇超, 张佳慧. 高速公路远程供配电系统综述[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(2): 114-116.

[7] 中国航空工业规划设计研究院工业与民用配电设计手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2005: 57-60.

[8] 李明霞. 高速公路供电方案的研究探讨[J]. 山西交通科技, 2022(3): 127-130.

[9] 张立平. 远距离供电系统在滁马高速的应用[J]. 中国交通信息化, 2016(12): 126-130.

[10] 蒋新花. 智能远程供电系统在南友高速公路的应用[J]. 西部交通科技, 2018(2): 159-162.

[11] 赵强. 智慧供电系统在高速公路机电工程中的应用[J]. 工程建设与设计, 2022(21): 120-123.