

光伏-锂电池混合能源管理系统设计与仿真

傅泽浩¹, 黑月凯², 张强^{1*}

1. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061; 2. 山东四季汽车服务有限公司, 山东 济南 250000

摘要:针对传统光伏能源汽车充电困难、续航里程短的问题,提出一种能够在复杂环境条件下实现自动化管理的光伏电池与锂电池混合能源管理系统。在 MATLAB-Simulink 中构建包含光伏电池模型和锂电池模型的混合能源系统模型,采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)算法优化太阳能的转化效率,利用比例积分(proportional integral, PI)控制器和双向直流(direct current, DC)/DC 变换电路实现锂电池的充放电自动转换功能,仿真分析不同辐照度下光伏电池发电功率对锂电池充电的影响,并在特定的环境条件下评估能量管理策略的响应能力。仿真结果表明:系统可以根据电动汽车的需求,在光照充足时对锂电池进行充电;光照微弱时,对锂电池进行放电。光伏 MPPT 算法提高了太阳能的利用率;在复杂环境条件下,该系统能够实现高效的能量管理,提高了系统的稳定性和鲁棒性。

关键词:光伏电池;锂电池;辐照度;荷电状态;电动汽车

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)01-0032-06

引用格式: 傅泽浩, 黑月凯, 张强. 光伏-锂电池混合能源管理系统设计与仿真[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(1): 32-37.

FU Zehao, HEI Yuekai, ZHANG Qiang. Design and simulation of a hybrid energy management system for a photovoltaic-lithium battery [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(1): 32-37.

0 引言

随着全球变暖以及能源短缺问题日益严重,光伏发电作为一种利用太阳能的高效清洁能源技术,受到广泛关注^[1-2]。光伏发电将太阳能直接转化为电能,有助于减少温室气体排放,节约能源,减少对化石燃料的依赖^[3-4]。将光伏发电技术应用于电动汽车的供电系统中,通过光伏电池实现对电动汽车的供电,在节约能源的同时,也解决了传统电动汽车充电困难,续航里程短的问题。

光伏发电在电动汽车应用中的优势与发展前景的研究较多。Lodi 等^[5]提出了一种在传统燃油车顶部安装光伏发电阵列的方法,评估了车顶光伏发电在实际驾驶条件下所能接收到的太阳辐射,结果表明:在真实条件下车顶光伏阵列平均可接收太阳辐射能量的 58%,使用容量为 75 A·h 的启动、点火和照明(starting lighting and ignition, SLI)电池的 vehicle 年发电量约为 41 kW·h。Mallon 等^[6]提出使用光伏发电组件增加公交车的行驶里程和电池寿命,并进行了现场试验,结果表明:当光伏电池安装在车辆的顶部和侧面时,每年可提供高达 8 881 kW·h 的电能。Oh 等^[7]以韩国首尔地区部分城镇为例,对公交车的太阳能潜力进行了估计分析,结果表明:每辆公交车的日平均发电量为 2.7 kW·h,并通过使用开发的移动传感器验证了试验结果。Van Der Kam 等^[8]对荷兰地区的光伏-电动汽车-电网的移动能源整合模式进行了研究,结合

收稿日期: 2024-11-28

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0792)

第一作者简介: 傅泽浩(1999—),男,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为多能系统能量管理, E-mail: fuzehao2077@163.com。

***通信作者简介:** 张强(1973—),男,山东青州人,工学博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为发动机燃烧及排放控制技术, E-mail: sdzhangqiang@sdu.edu.cn。

历史数据发现,荷兰 40 个地区的光伏电池和电动汽车的空间扩散模式存在着差异,这些差异对车辆到电网整合的可行性具有显著影响。Padmagirisan 等^[9]提出了一种光伏混合动力汽车的功率控制器,并进行了理论仿真和验证,结果表明:搭载该控制器的汽车在不同工况下都能保证电池的健康和安全。

传统的光伏能源汽车能量管理系统采用光伏-电池-汽车的充电模式,光伏电池先给锂电池充电,然后由锂电池给电动汽车供电,系统通常需要多组锂电池协调光伏电池和电动汽车之间的能量转换,一部分锂电池用于接收太阳能,其余电池负责为电动汽车供电。当锂离子电池组充满电后,需要手动切换系统,调整锂电池组之间的供电和充电关系。此外,使用多个锂电池组也导致成本较高。针对上述问题,提出一种光伏电池和锂电池相结合的混合能源管理系统,实现复杂条件下的自动化、合理的能源管理。该系统可以根据电动汽车的需求,在光照充足时,光伏电池为锂离子电池和电动汽车供电;当光照不足时,系统智能地同时使用光伏电池和锂电池为电动汽车供电。

1 数学模型

本文中提出的混合能源管理系统如图 1 所示。光伏电池和锂电池通过直流母线进行耦合,为电动汽车负载进行供电。其中,最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)系统包括直流(direct current, DC)/DC 转换器和 MPPT 控制器两部分。本文中,选择升压转换器调整光伏电池的输出电压,执行 MPPT 操作。因为它具有电路简单、效率高、控制设计要求低等优点^[10]。电池管理系统包括 DC/DC 转换器和比例积分(proportional integral, PI)控制器两部分。DC/DC 转换器选择双向 DC/DC 电路控制电池的充放电过程。双向 DC/DC 电路能够实现电能两个方向上的高效转换,从而优化能量管理。

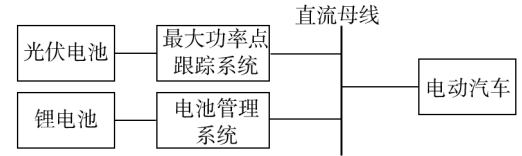


图1 混合能源管理系统框架

1.1 光伏模型

光伏电池能够把太阳能转换为电能,光伏电池的端电流和电压的关系式^[11-12]为:

$$I_{pv} = I_G - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{a U_t} \right) - 1 \right] - \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p}, \quad (1)$$

式中: I_G 、 I_{s1} 、 I_{pv} 分别为光生电流、反向饱和电流和光伏输出电流,A; a 为二极管理想因子; U_t 为二极管热电压,V; R_s 、 R_p 分别为二极管串联和并联的电阻, Ω ; U_{pv} 为光伏输出电压,V。

单个二极管光伏电池的等效电路如图 2 所示。不同辐照度下,光伏电池的输出特性如图 3 所示。

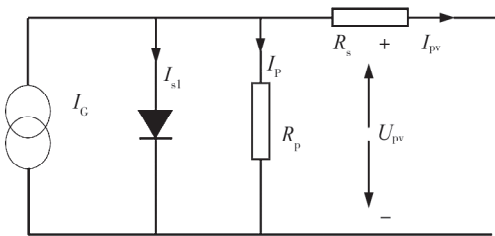


图2 光伏电池等效电路

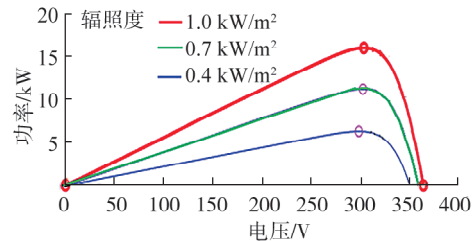


图3 光伏电池输出特性

由图 3 可知:光伏电池的输出功率与电压之间为非线性关系,随着输出电压增大,光伏电池的输出功率先增大后减小,存在一个光伏电池的最大功率点。

1.2 锂电池模型

锂电池是一种可充电的高能量密度电池,广泛应用于电子产品以及发电站的储能设备中。本文中提出的混合能源管理系统以锂电池作为系统的储能单元,终端电压和荷电状态(state of charge, SOC)是表征电池的两个重要参数。

锂电池终端电压^[13]

$$U_{\text{bat}} = U_0 + R_{\text{bat}} I_{\text{bat}} - \frac{U_k Q_{\text{bat}}}{Q_{\text{bat}} + \int I_{\text{bat}} dt} + U_a \exp\left(B_{\text{bat}} \int I_{\text{bat}} dt\right), \quad (2)$$

式中: R_{bat} 为电池内阻, Ω ; U_0 为电池开路电压, V ; I_{bat} 为电池充电电流, A ; U_k 为极化电压, V ; Q_{bat} 为电池容量, $A \cdot h$; U_a 为指数区域电压, V ; B_{bat} 为指数区域电池容量倒数, $(A \cdot h)^{-1}$ 。

锂电池荷电状态

$$S_{\text{oc}}(t) = S_{\text{oc},0} - \frac{1}{C_{\text{total}}} \int_0^t I(\tau) d\tau, \quad (3)$$

式中: $S_{\text{oc},0}$ 为初始时电池的荷电状态; C_{total} 为电池的总容量, $A \cdot h$; $I(\tau)$ 为 τ 时刻的电流, A 。

2 能量控制策略

2.1 光伏控制

MPPT 算法是一种用于光伏电池的控制算法,目的是实时调整光伏电池的工作电压,使其工作在最大功率点,从而使光伏电池的输出功率最大。本文中采用电导增量法^[14-15]对最大功率点进行跟踪。相对于扰动观察法^[16],电导增量法的跟踪精度更高、响应速度更快。

电导增量法下,光伏电池的输出功率

$$P = U_{\text{pv}} I_{\text{pv}}. \quad (4)$$

对式(4)求导可得:

$$\frac{dP}{dU_{\text{pv}}} = I_{\text{pv}} + U_{\text{pv}} \frac{dI_{\text{pv}}}{dU_{\text{pv}}}. \quad (5)$$

当功率对电压的导数为 0 时,由式(5)可得:

$$\frac{dI_{\text{pv}}}{dU_{\text{pv}}} = -\frac{I_{\text{pv}}}{U_{\text{pv}}}. \quad (6)$$

因此,当 $\frac{dI_{\text{pv}}}{dU_{\text{pv}}} > -\frac{I_{\text{pv}}}{U_{\text{pv}}}$ 时,光伏电池的工作点在最大功率点左侧,需要增大光伏电池的输出电压;当

$\frac{dI_{\text{pv}}}{dU_{\text{pv}}} < -\frac{I_{\text{pv}}}{U_{\text{pv}}}$ 时,光伏电池的工作点在最大功率点右侧,需要减小光伏电池的输出电压;当 $\frac{dI_{\text{pv}}}{dU_{\text{pv}}} = -\frac{I_{\text{pv}}}{U_{\text{pv}}}$ 时,光伏电池工作于最大功率点处,无需调整。

2.2 电池控制

为实现混合能源系统的能量管理,采用双向 DC/DC 电路实现电池的充电和放电的转换。当光照强烈时,光伏电池的输出功率大于负载所需,此时锂电池处于充电状态,将多余电量存储起来。当光照由强转弱时,锂电池由充电状态转为放电状态,与光伏电池一起为负载供电,控制电池的充放电电流,控制目标为负载电压。设计的电池 PI 控制器如图 4 所示。由图 4 可知:当前负载电压 U_L 与负载参考电压 U_R 的差用作 PI 控制器的输入,以获得所需的电池参考电流;同样,当前充电电流 I_R 和电池参考电流 I_{Bat} 的差用作 PI 控制器的输入,生成需要的占空比信号;最后,使用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)模块产生必要的 PWM 波形。

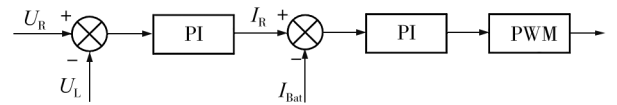


图 4 电池 PI 控制器

3 仿真分析

为了评估本文所搭建的混合能量管理系统,利用 MATLAB-Simulink 平台建立系统的仿真模型,模型

参数涵盖系统各个组件的主要性能指标和工作条件。光伏电池和锂电池主要参数如表1、2所示。

表1 光伏电池参数

最大功率点电压/V	开路电压/V	最大功率点电流/A	短路电流/A	最大功率/W	串联的电池数	并联的电池数
30.36	36.42	7.58	8.10	230.128 8	10	7

表2 锂电池参数

标称电压/V	额定容量/(A·h)	完全充电电压/V	内阻/ Ω
180	50	209	0.036

使用直流负载代替电动汽车,在负载功率恒定的情况下,研究不同辐照度下光伏电池发电功率对锂电池充放电的影响,并通过模拟特定的环境条件评估提出的能量管理策略。

锂电池初始SOC为40%,仿真时间为5 s。不同辐照度对锂电池充放电的影响如图5所示。由图5可知: SOC随时间的变化曲线近似为一条斜线;在辐照度为 1 kW/m^2 时,锂电池处于充电状态,光伏电池能显著提高锂电池的电量,5 s内锂电池SOC增大了0.113百分点;随着辐照度下降,锂电池SOC的上升速度有所降低。当辐照度降至 0.5 kW/m^2 时,锂电池SOC开始下降,此时锂电池处于放电状态,与光伏电池一起为直流负载供电。当辐照度降至 0.4 kW/m^2 时,在5 s内,锂电池SOC下降了0.025百分点。

在模拟测试中,考虑自然环境中光照的间歇性和不稳定性,引入辐照度波动曲线,如图6所示。该曲线展示了在一段时间内辐照度的变化情况,反映了自然环境中光照的不确定性的特征。由图6可知:该段时间内辐照度变化较大,初始辐照度为 0.6 kW/m^2 ;经过 $0.5\sim 1.0\text{ s}$,辐照度逐渐上升至 1.0 kW/m^2 ;经过 $1.0\sim 3.0\text{ s}$,模拟云层遮阴的情况,辐照度下降较大;4 s后变化缓慢。

使用Signal Builder模块将图6中的太阳辐照度变化绘制为输入信号传输到光伏电池模型中,设定环境温度恒定为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,直流负载功率为 8 kW 。在图6所示环境条件下,光伏电池的输出电压和电流曲线如图7所示。由图7可知:由于辐照度在短时间内经历了快速变化,光伏电池的输出特性出现了波动;随着辐照度增强或者减弱,光伏电池的输出电压和电流出现了震荡,这种波动对光伏电池的输出存在一定的影响;当辐照度由低到高迅速上升时,光伏电池的输出电流随之上升;当辐照度迅速下降时,光伏电池的输出电流随之下降;相对输出电流,输出电压的变化不明显。光伏电池输出特性的这种变化趋势说明:在辐照度发生变化时,光伏电池的最大功率点处的电压变化较小,电流变化较大。

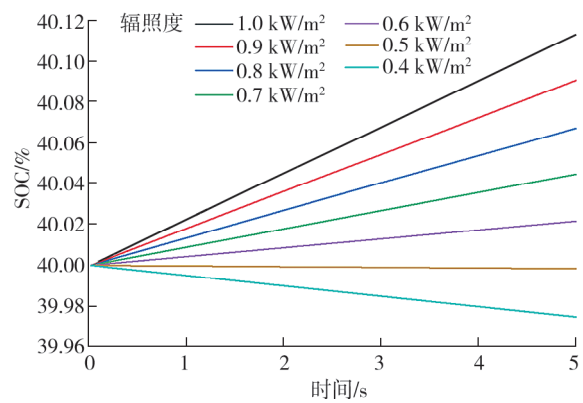


图5 辐照度对锂电池充电的影响

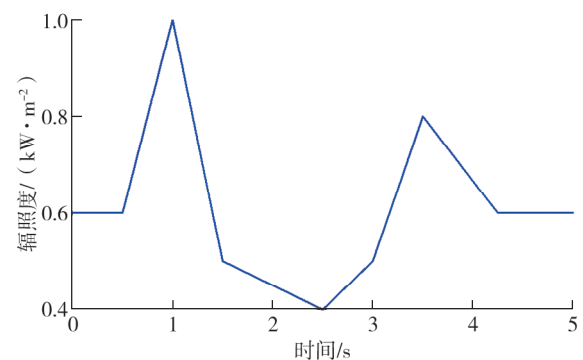


图6 辐照度变化曲线

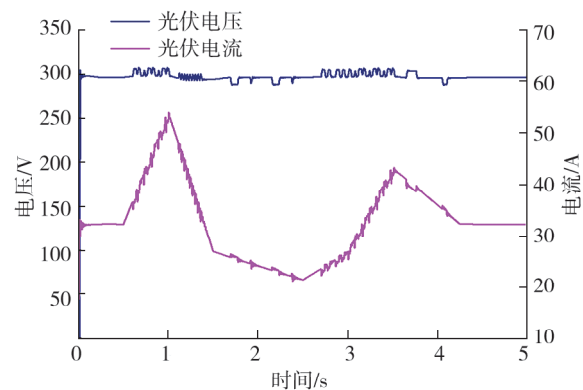


图7 光伏电池输出电压和电流

光伏电池的实际输出功率与参考功率(理想条件下光伏电池所能发出的最大功率)的比较如图 8 所示。由图 8a)可知:在快速变化的环境条件下,光伏电池的输出功率与辐照度(图 6)呈现相同的变化趋势,这种趋势与光伏电池的输出电压电流变化趋势相吻合,实际输出功率曲线能够长时间接近参考功率曲线甚至与参考功率曲线重合。由图 8b)可知:虽然光伏电池的实际输出功率与参考功率之间存在一定的差异,但差异并不明显,分析这种差异与环境条件的多变性和 MPPT 算法的稳定性有关;实际输出功率与参考功率的最大功率损失为 150 W 左右,随后光伏电池迅速地追踪到新的最大功率点。这种快速的响应能力不仅验证了电导增量法在动态环境下的高效性,也证明了系统在稳定性和实时性方面的优越表现。

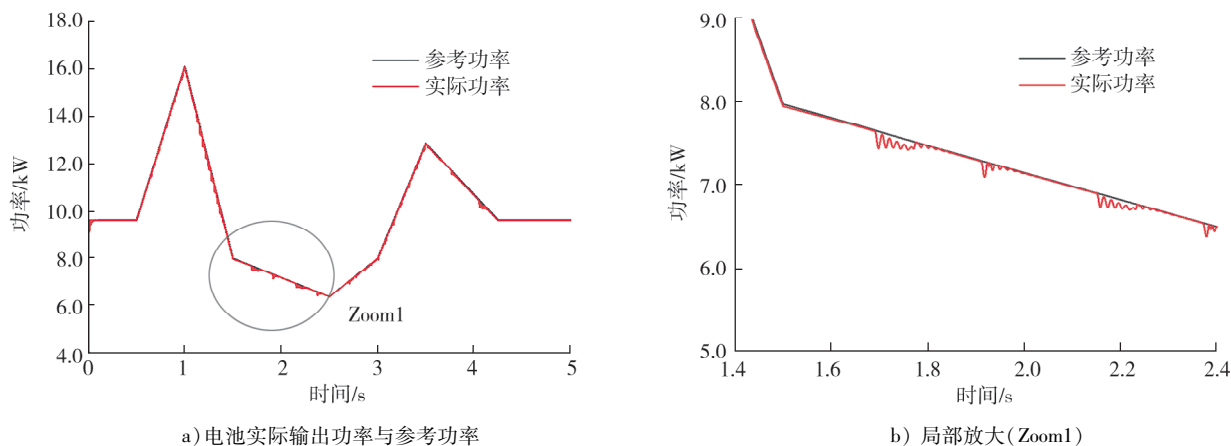


图 8 光伏电池实际输出功率和参考功率对比

锂电池的 SOC 变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知:1)在初始阶段,由于光照强烈,光伏电池输出功率大于负载所需功率,此时,锂电池处于充电状态;在此过程中,锂电池的 SOC 逐渐上升,储存的电能量增加。2)1.5 s 后由于云层遮挡,光伏电池发电功率大幅下降,所发电量已经无法满足负载所需,此时,锂电池由充电模式自动转换为放电模式,与光伏电池共同承担负载所需功率,确保系统能够稳定工作;锂电池的 SOC 开始下降,储存的电能量减少。3)第 3 秒时,由于光伏发电功率增加,所发电量超过负载所需功率,锂电池自动转为充电模式, SOC 上升。锂电池 SOC 变化曲线验证了本文中构建的混合能量管理系统的有效性,显示了系统在面对外部环境变化时的高速响应能力和灵活的能量管理策略。

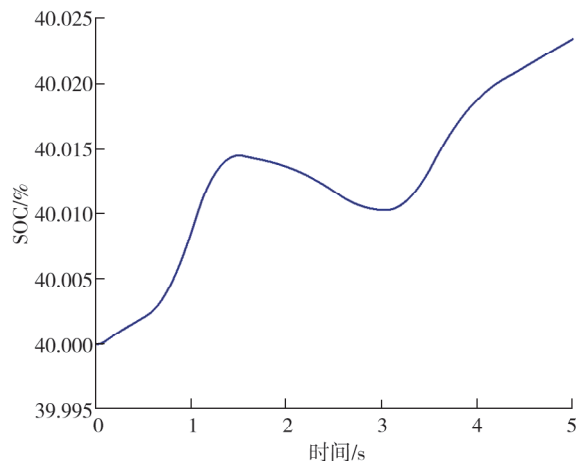


图 9 锂电池 SOC 变化曲线

4 结论

针对传统光伏能源汽车能量管理系统普遍存在的光伏能量利用率低、操作复杂、成本高的缺点,本文提出了一种光伏电池与锂离子电池相结合的混合能源管理系统,能够在复杂的环境条件下合理地分配能量。

1)系统能够在光伏功率急剧变化的环境条件下,迅速切换锂电池的工作模式,从充电到放电再到充电,这种无缝切换证明了系统设计的高效性和鲁棒性。

2)光伏电池与锂离子电池相结合的混合能源管理系统具有对外部环境变化的适应性,无论是短暂的电力供应波动还是长期的能源使用需求,系统都能通过灵活的能量管理策略及时调整,保证电动汽车的充电需求。

参考文献:

- [1] ZHANG S H, PAN J Y, LIN B R, et al. Evaluating rooftop PV's impact on power supply-demand discrepancies in grid decarbonization[J]. Nexus, 2024, 1(4): 100041.
- [2] IWABUCHI K, WATARI D, ZHAO D, et al. Enhancing grid stability in PV systems: a novel ramp rate control method utilizing PV cooling technology[J]. Applied Energy, 2025, 378: 124737.
- [3] SUBERI H K, ASIF M, NADEEM T B. Rooftop solar PV in Bhutan: a systemic analysis of feed-in-tariff program[J]. Energy for Sustainable Development, 2024, 83: 101591.
- [4] FAROUK N, BABIKER S, ALQSAIR U F. Boosting electricity generation associated with Saudi Arabi buildings using PCM and PV cells on walls and roof leading to a sustainable building[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 64: 105444.
- [5] LODI C, SEITSONEN A, PAFFUMI E, et al. Reducing CO₂ emissions of conventional fuel cars by vehicle photovoltaic roofs[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 59: 313–24.
- [6] MALLON K R, ASSADIAN F, FU B. Analysis of on-board photovoltaics for a battery electric bus and their impact on battery lifespan[J]. Energies, 2017, 10(7): 943.
- [7] OH M, KIM S-M, PARK H-D. Estimation of photovoltaic potential of solar bus in an urban area: case study in Gwanak, Seoul, Korea[J]. Renewable Energy, 2020, 160: 1335–1348.
- [8] VAN DER KAM M J, MEELEN A A H, VAN SARK W G J H M, et al. Diffusion of solar photovoltaic systems and electric vehicles among Dutch consumers: implications for the energy transition[J]. Energy Research & Social Science, 2018, 46: 68–85.
- [9] PADMAGIRISAN P, SANKARANARAYANAN V. Powertrain control of a solar photovoltaic-battery powered hybrid electric vehicle[J]. Zrontiers in Energy, 2019, 13(2): 296–306.
- [10] CHELLAKHI A, EL BEID S, ABOUELMHAJJOUB Y, et al. An enhanced incremental conductance MPPT approach for PV power optimization: a simulation and experimental study[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2024, 49(12): 16045–16064.
- [11] ALI A I M, MOUSA H H H, MOHAMED H R A, et al. An enhanced P&O MPPT algorithm with concise search area for grid-tied PV systems[J]. IEEE Access, 2023, 11: 79408–79421.
- [12] EL MARGHICHI M, DANGOURY S. Electrical parameters identification for three diode photovoltaic based on the manta ray foraging optimization with dynamic fitness distance balance[J]. Optik, 2024, 296: 171548.
- [13] 邢科. 基于模型预测的光储直流微电网系统鲁棒控制研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
- [14] 罗金鑫. 光伏发电系统 MPPT 算法优化研究[D]. 长春:吉林建筑大学,2020.
- [15] 周杰. 光伏发电系统中的 MPPT 控制和孤岛检测技术研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2024.
- [16] ALI A I M, MOHAMED H R A. Improved P&O MPPT algorithm with efficient open-circuit voltage estimation for two-stage grid-integrated PV system under realistic solar radiation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 137: 107805.

Design and simulation of a hybrid energy management system for a photovoltaic-lithium battery

FU Zehao¹, HEI Yuekai², ZHANG Qiang^{1*}

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Siji Automobile Service Co., Ltd., Jinan 250000, China

Abstract: A hybrid energy management system combining photovoltaic cells and lithium batteries is proposed to address the problems of difficult charging and short range of traditional photovoltaic energy vehicles. This system

(下转第 44 页)

- [13] 黄庆宏,侯小刚. PG-PL 型调速器动态过程的数值分析[J]. 机械制造与自动化, 2004 (6):112-116.
- [14] 陈坚. 船用发电柴油机调速器的数学建模和仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3):937-942.
- [15] 李云松. 电液调速器性能仿真及分析技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.

Dynamic characteristics mathematical modeling of electro-hydraulic compound governor of fuel system for diesel engines

QU Zhilin¹, ZHAO Yongchao², YANG Jun¹, BAI Yun^{3*}

1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China; 2. Weichai Heavy Machinery Co., Ltd., Weifang 261108, China;

3. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China

Abstract: To improve the speed stability and working efficiency of diesel engines during load changes, a mathematical modeling study is conducted on the dynamic characteristics of an electro-hydraulic compound governor for a certain diesel engine fuel system. The composition and working principle of the electro-hydraulic compound governor for fuel system of a diesel engine are analyzed. It is divided into the mechanical speed regulating module, the pneumatic speed regulating module, the power output cylinder module, the buffer piston and the nozzle flapper valve module. According to the specific stress conditions of each part, the mathematical models of the key components of the five major module are established respectively. The transfer function block diagram of the transmission part, the speed control system Y_1 and the speed control system Y_2 of the electro-hydraulic compound governor are obtained by the mathematical model, which provide a theoretical reference for the performance analysis and design of the electro-hydraulic compound governor.

Keywords: diesel engines; fuel system; electro-hydraulic compound governor; mathematical modeling; block diagram

(责任编辑:臧发业)

.....

(上接第 37 页)

aims to achieve automated management under complex environmental conditions. In MATLAB-Simulink, a hybrid energy system model integrating a photovoltaic model and a lithium battery model are developed. The maximum power point tracking (MPPT) algorithm is employed to enhance the conversion efficiency of solar energy, while the proportional integral controller and the bi-directional DC/DC controller are utilized to optimize the conversion efficiency of solar energy. The effect of the photovoltaic power on the charging of the lithium battery under different irradiance is simulated and analyzed, and the responsiveness of the energy management strategy under specific environmental conditions is evaluated. The simulation results show that the system can charge the lithium battery when there is sufficient light, and discharge the lithium battery when there is weak light, according to the demand of electric vehicles. MPPT algorithm improves the utilization rate of solar energy under complex environmental conditions, the system is able to realize efficient energy management and improve the stability and robustness of the system.

Keywords: photovoltaic cell; lithium battery; irradiance; SOC; electric vehicle

(责任编辑:刘丽君)