doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202503004

光伏-储热耦合系统对机电一体化设备供能模式的研究

王　丽[1],金铸浩[2]

(1.安徽国防科技职业学院 电气技术学院,安徽 六安　237011;
2.安徽工程大学 国际工程师学院,安徽 芜湖　241000)

摘要:为应对机电设备高波动负载对电网稳定性的冲击,并解决光伏发电间歇性与直接消纳难题,本研究探索了光伏-储热耦合系统在机电一体化设备中的供能模式。通过构建热能缓冲与智能调控系统,实现了能源的梯级利用与高效调度,有效保障了设备运行的连续性。工业试点结果表明,该系统使能源自给率提升至76.3%,运行中断率降低85.3%,展现出良好的经济性与可靠性。

关键词:光伏-储热耦合系统;动态协同控制;机电一体化设备
中图分类号:TM615　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2025)03-0021-04

在全球能源转型加速推进的大背景下,工业领域正面临绿色供能与稳定运行的双重挑战。机电一体化设备作为现代制造业的核心支柱,其供能需求陷入尖锐矛盾。一方面,高精度电机、伺服系统等设备对电压和频率的稳定性要求极为严格。另一方面,冲压机、注塑机等设备的负载剧烈波动,持续对电网造成冲击。传统的纯光伏供电方案虽能降低碳排放,却受制于昼夜交替和天气变化,导致过剩电能难以就地消纳。而采用电池储能虽可平抑波动,但其高成本和短寿命的局限性,限制了在工业生产中的大规模应用[1]。相较上述方案,光伏-储热耦合系统展现出显著优势。该系统通过将富余光伏电能转化为热能存储,既有效克服了光伏的间歇性短板,又借助热能的稳定性和低成本优势,构建起缓冲屏障,为高波动负载场景提供了兼具经济性与稳定性的全新供能方案。

1　系统集成瓶颈与供能需求分析

1.1　机电设备供能痛点

在具体实践中,机电一体化设备高波动负载与精密控制需求之间存在矛盾。例如,在注塑机合模机构运行过程中,其工作周期内功率可在0.2 s内骤升300%以上,从50 kW瞬间飙升至200 kW。这种毫秒级负载变化导致电网节点电压波动超过±10%,进而引发保护继电器误动作。在实际运行过程中,工作人员在进行多台设备群控时会发生随机性的负载叠加现象,使得配电变压器绕组承受超20%的瞬时涡流损耗,从而加速设备内部绝缘老化[2]。

1.2　光伏直供局限性

随着光伏发电技术的日益成熟,它逐步成为机电设备实现低碳化运行的重要方式之一,然而,其内在的缺陷却严重阻碍了这一技术的广泛应用。一方面,光伏发电的间歇性供电特性容易引发设备运行中断的风险。光伏出力受辐照度影响,呈现出明显的锯齿状波动特点,对于需连续生产的镀膜生产线而言,仅10 s的电压跌落便会导致真空腔体破空,造成巨大的经济损失[3]。另一方面,光伏发电在夜间的零输出特性迫使设备不得不切换至电网,频繁的源荷切换引发的接触器电弧侵蚀,严重影响了关键部件的使用寿命[4]。

收稿日期:2025-08-02
基金项目:安徽省教育厅质量工程项目(2022jnds010;2024yljk076)。
作者简介:王丽(1983—),女,安徽泗县人,高级实验师,硕士,主要研究方向为智能控制、机电工程。
通信作者:金铸浩(1991—),男,安徽巢湖人,工程师,硕士,主要研究方向为机器学习、大数据处理和计算机视觉。

2 耦合系统应用落地措施

2.1 系统拓扑创新设计

面对机电设备高波动负载对电网的冲击以及光伏直供的间歇性缺陷,传统的能源方案缺乏一种既能快速响应负载瞬变、又能实现能量跨时空转移的缓冲媒介。然而,热能的物理特性恰好为解决这一问题提供了切入点。其储存成本仅为电池储能的1/5,且热惯性天然适配于电网波动的平抑。基于这一特性,光伏-储热耦合系统通过“电转热”与“热转电”的双向路径,有效应对上述挑战。

2.1.1 光热-光伏并联输入架构

该架构通过电能分级通道,实现了对于光伏能源的按质分配。光伏直供优先保障设备实时需求。通过双向DC/DC变换器,将光伏阵列输出电压稳定在设备直流母线需求范围[5]。当辐照充足时,最大功率点跟踪控制器优先调度电能直供负载,通过实时调节光伏阵列的工作电压/电流,使其始终运行在最大功率输出点。为更直观地比较不同最大功率点跟踪(maximum power point tracking,MPPT)算法的性能表现,列出了3种典型算法的响应速度、精度误差及适用场景。其中,扰动观察法在普通光伏系统中可实现0.2~0.5 s的响应速度,而人工神经网络算法则能在<0.05 s内完成功率点追踪,特别适合高精度机电设备供能系统,如表1所示。

这种直流直供模式规避了传统并网方案中的AC/DC转换损耗,适合伺服驱动器等直流负载占主导的产线。当光伏出力超过负载需求,能源管理系统触发过剩电能分流策略[6]。通过IGBT斩波电路将富余直流电转换为可控电流,驱动电阻式加热器或相变材料储热单元。

2.1.2 热电解耦供能模式

为解决光伏昼夜供电失衡难题,研究团队引入了热电解耦供能模式,将热能作为中间载体。具体实践中,采用日间储热梯级蓄能策略,储热系统采用三级温度分区设计,如表2所示。

日间,光伏富余电力优先用于加热高温区。当高温储热罐达到设定的380 ℃后,电能自动切换至中温相变材料储热模块(phase change material,PCM)进行充电。这种分级蓄能策略不仅提升了系统的整体热力学效率,还预留了20%容量冗余,以有效平抑太阳能辐照波动。此外,研究团队还购入了斯特林发动机在夜间进行释能发电。与传统的蒸汽轮机相比,斯特林发动机的活塞组件仅需外部热源与冷却系统之间达到150 ℃温差即可自启动,与中低温储热单元的温度工况匹配。同时,通过0°~90°的气相位调节,斯特林发动机可在30%~100%的负荷区间内保持35%以上的热电转换效率。具体实践中,PCM熔化阶段保持恒功率输入,避免局部过热,而在凝固阶段则切换为恒温差释热,维持热流稳定。当负载突然发生波动时,在10 ms内切换供能路径。如果光伏功率骤降,储热单元立即启动电阻加热补偿;如果负载突减,则通过泄放电阻消耗瞬态能量,从而维持系统稳定。

表1 最大功率点跟踪控制器不同算法适用场景

Table 1 Application scenarios of different algorithms for maximum power point tracking controllers

算法类型	响应速度/s	精度误差/%	适用场景
扰动观察法(P&O)	0.2~0.5	<2	普通光伏系统
电导增量法(INC)	0.1~0.3	<1	辐照快速波动场景
人工神经网络	<0.05	<0.5	高精度机电设备供能系统

表2 光伏-储热耦合系统三级梯阶储热设计参数表

Table 2 Design parameter table for three-stage thermal storage of photovoltaic-thermal storage coupling system

温度分区	温度范围/℃	储热介质	热能来源	核心功能
高温区	300~400	60%$NaNO_3$+40%KNO_3	光伏富余电力直接加热	存储高品位热能,驱动热机发电
中温区	180~250	复合PCM模块	光伏富余电力次级分配	中品位热能缓冲,辅助发电
低温区	80~150	导热油/金属相变材料	机电设备余热回收	低品位热能利用,减少光伏需求

2.2　动态协同控制策略

2.2.1　基于设备负载预测的智能调度

在完成光伏-储热耦合系统的拓扑设计后，为应对机电设备负载剧烈波动与光伏出力的不确定性，研究团队开发了一套融合长短期记忆网络预测与实时优化的智能控制策略，以取代传统的定时控制。该策略利用长短期记忆网络模型深度挖掘历史运行数据，并融入季节工况、工作日/节假日等时序标签进行负荷预测；基于预测结果，能源管理系统执行滚动优化：当预判负载将在 5 min 内骤升时，立即触发相变材料熔化放热流程，使斯特林发动机预热至 150 ℃待机状态[4]；若预测负载持续走低，则系统自动切换至梯度降温模式（速率 3 ℃/min）以减少热能空耗。为克服预测误差带来的控制偏差，系统设立了 3 重容错机制：首先，通过实时监测模块在校差超限时触发应急放热补偿；其次，在连续 3 次预测误差超过 8% 时启动在线学习算法，对长短期记忆网络（long short-term memory，LSTM）模型进行参数微调；最后，在执行级采用温度-功率双闭环控制，结合模糊比例—积分—微分调节器（proportional-integral-derivative controller，PID），即使在热源温度波动±10 ℃的情况下，也能在 50 ms 内稳定功率输出，并将系统整体响应延迟控制在 50 ms 以内，从而有效解决了传统控制的滞后问题。

2.2.2　多能源质量协同治理

为应对高精密加工等场景下对电能质量的严苛要求，本研究设计了一套多源协同的电压补偿机制。尽管智能调度策略优化了系统的能量管理效率，但传统储能设备因响应速度超过 100 ms，难以抑制毫秒级的电压暂降与波动。基于此，本研究深度挖掘储热-发电系统的热机电惯性，构建了如表 3 所示的三级协同防御架构。该架构的第一梯队（0 ~ 50 ms）由储热单元构成，当检测到直流母线电压低于 700 V 时，系统在 20 ms 内开启熔融盐储罐的电磁阀，驱动发电机组以 200% 过载电流发电，将电压恢复至 0.92 pu 以上；第二梯队（50 ~ 500 ms）由光伏逆变器接续，通过功率因数自 0.9（滞后）向 0.8（超前）的动态调节，提供不低于 30% 额定容量的无功支撑；第三梯队（超过 500 ms）由电网切换装置执行，在 100 ms 内完成至备用电网的切换。整个协同过程由基于现场可编程门阵列（field-programmable gate array，FPGA）的高速控制器统一调度，形成覆盖毫秒至秒级的多时间尺度电压治理能力。

2.3　设备级耦合技术

在光伏-储热耦合系统中，机电设备排放的废热蕴含着巨大的回收潜力，但传统回收方案因接口兼容性差、能效低等缺陷制约，难以大规模应用。需要注意的是，废热回收与前文所述的富余电力转换热能储备存在本质区别：前者属被动式热能利用，旨在通过模块化接口与梯级导热技术，将散失的 300 ~ 500 ℃废气与余热转化为系统增益；后者为主动式热能储备。二者构成互补，形成“主动-被动”双循环热能管理体系。为实现被动回收，本研究采用全温域三阶模块化接口：针对 300 ~ 450 ℃高温段，采用镍基高温合金法兰适配器并集成旋流除尘结构；针对 150 ~ 250 ℃中温段，设计双金属密封余热收集环；针对 80 ~ 120 ℃低温段，使用快换式油冷板接头[5]。该研究中 120 ~ 150 ℃与 250 ~ 300 ℃为过渡温区，其热能品位较低或可通过相邻模块的冗余设计覆盖，故未设置专用接口以简化系统。在此基础上，构建温差驱动型热管阵列，实现余热精准分级导入：高温废气直通熔融盐储罐，中温热流预热相变材料模块，低温油热循环至保温层进行热损补偿。

3　实验设计及效益评估

该研究中，为了验证耦合系统在能源自给率、运行稳定性、经济性三方面的性能，研究团队设计了一套完整的实验，对标传统光伏+锂电池储能方案，如表 4 所示。

表 3　多源协同电压补偿三级响应机制

Table 3　Three-level response mechanism for multi-source collaborative voltage compensation

响应梯队	时间窗口/ms	执行主体	控制动作	关键指标
第一梯队	0 ~ 50	储热单元	释放旋转备用热能全功率发电	响应延迟≤20 ms
第二梯队	50 ~ 500	光伏逆变器	调节功率因数：0.9 滞后→0.8 超前	无功功率支撑量≥30% 额定容量
第三梯队	>500	电网切换装置	自动切换至备用电网输入	切换动作时间≤100 ms

表4　实验环境
Table 4　Experimental environment

参数	实验组(光伏-储热耦合)	对照组(光伏+锂电池)
测试场地	汽车零部件冲压车间	同车间相邻区域
负载设备	250 T伺服冲压机,峰值功率220 kW	同型号设备
光伏装机容量	150 kW	150 kW
储能配置	熔融盐储热罐,储热容量3.2 MWh	磷酸铁锂电池(1.2 MWh)

实验正式启动前,研究人员先进行为期7 d的基线监测,全面记录冲压机原始能耗曲线与电网依赖程度,并统计电压暂降引发的生产中断事件,建立初始性能基准。在系统部署阶段,实验组安装了150 kW光伏阵列配套的熔融盐储热罐,同时在设备关键热源点加装标准化余热回收接口。而对照组则部署同等容量的150 kW光伏+1.2 MWh磷酸铁锂电池储能系统。部署完成后,通过编程模拟3种典型生产工况。其中,工况A为连续生产模式,从早8:00—晚8:00稳定运行。工况B为间歇生产模式,随机启停模拟订单波动。工况C为夜班生产模式,从晚8:00—早6:00运行,动态验证系统适应能力。最后进入极端测试环节,主动模拟电网故障以及连续阴雨环境,全程记录能源自给率、运行稳定性、经济性3项指标,如表5所示。

对表5的数据分析表明,光伏-储热耦合系统在多项核心指标上均显著优于传统光伏+锂电池方案。实验组的能源自给率提升至76.3%,运行中断率降低至0.27次/周(降幅85.3%),尤其在对电能质量至关重要的电压暂降补偿成功率上达到98.5%。经济效益方面,系统度电成本与年维护成本分别降至0.41元/kWh和8.2万元,降幅显著。这表明该系统同步实现了能源自主性、运行稳定性和经济性的综合提升。然而,研究也揭示出系统在长期运行中存在局限性,如高温熔融盐材料的析晶问题以及协同控制算法对非稳态工况的适应性不足。因此,后续研究应聚焦于开发新型储热材料(如钙钛矿/氧化物)并探索氢-热复合储能等架构,以进一步提升系统的长期可靠性与跨季节调节能力。

表5　核心性能指标对比
Table 5　Comparison of core performance indicators

指标	实验组(光伏-储热)	对照组(光伏+锂电池)	提升/下降幅度
能源自给率	76.3%	48.1%	↑58.6%
运行中断率	0.27次/周	1.84次/周	↓85.3%
电压暂降补偿成功率	98.5%	89.2%	↑10.4%
度电成本	0.41元/kWh	0.68元/kWh	↓39.7%
维护成本	8.2万元/a	16.5万元/a	↓50.3%

4　结论

本研究证实,光伏-储热耦合系统通过设备级热能回收、热电解耦供能及毫秒级协同控制三重创新,有效缓解了机电设备高稳定性供能与光伏间歇性的矛盾。实证数据印证,该系统能将能源自给率提升至76.3%,中断率降低85.3%,全生命周期度电成本(0.41元/kWh)较锂电池方案降低39.7%,为工业供能的低碳经济转型提供了可行路径。

参考文献：

[1] 袁明. 光伏发电与机电一体化融合下的能量转换效率提升关键技术探究[J]. 工程机械文摘，2025(3)：25-27，31.
[2] 潘婷，王俐英，丁红坚，等. 区域电力系统复合储能发电系统容量优化[J]. 太阳能学报，2024，45(10)：752-763.
[3] 李晓峰，杨祺，姜铭琨，等. 基于ISSA-P&O算法的光储发电系统MPPT控制技术[J]. 可再生能源，2025，43(3)：400-407.
[4] 张成凤. 火电-储热耦合系统深度调峰性能研究[D]. 北京：华北电力大学，2024.
[5] HOU Y C，ZHAO C，XUE C，et al. Coordinated control method of photovoltaic energy storage charging integrated charging station [C]//Third International Conference on Mechanical，Electronics，and Electrical and Automation Control (METMS 2023). February 17-19，2023. Hangzhou，China. SPIE，2023：148.
[6] 张哲，赵聪，王戈. 光伏系统虚拟同步发电机控制策略研究[J]. 光源与照明，2025(6)：128-130.

Research on the Energy Supply Mode of Photovoltaic-thermal Storage Coupled System for Mechatronics Equipment

WANG Li[1]，JIN Zhuhao[2]

(1. School of Electrical Technology，Anhui Vocational College of Defense Technology，Lu′an Anhui　237011，China；
2. Institute of International Engineers，Anhui Polytechnic University，Wuhu Anhui　241000，China)

Abstract：To address the impact of high-fluctuation loads from electromechanical equipment on grid stability，and to solve the problem of intermittent and direct consumption of photovoltaic power generation，this study explores the power supply mode of photovoltaic-thermal storage coupling system in mechatronics equipment. By constructing a thermal energy buffering and intelligent control system，the cascade utilization and efficient scheduling of energy have been achieved，effectively ensuring the continuity of equipment operation. The results of the industrial pilot show that the system has increased the energy self-sufficiency rate to 76.3% and reduced the operation interruption rate by 85.3%，demonstrating good economy and reliability.

Keywords：photovoltaic-thermal storage coupling system；dynamic collaborative control；mechatronics equipment

（责任编辑：邵　茗）

启　　事

本刊已入编《中国学术期刊（光盘版）》、“中国期刊网”、“万方数据——数字化期刊群”、《中国科技期刊数据库》、《美国化学文摘》。对此不同意者，请在来稿时说明。