

基于智能感知的光伏系统蓄电池电流在线监控器创新设计与效能优化

余剑生

广东技术师范大学, 广东 广州 510665

DOI: 10.61369/TACS.2026040034

摘 要 : 针对光伏发电系统中蓄电池电流监测精度不足、实时性差、成本较高及数据挖掘不充分等问题, 设计一款基于智能感知的蓄电池电流在线监控器。硬件采用霍尔传感器、STM32F407VET6微控制器、RS485通信与多路稳压电源, 实现高精度非接触式电流采集与稳定传输; 软件采用模块化设计, 融合复合滤波、异常值剔除与CRC校验, 提升数据可靠性; 引入统计分析、趋势预测与支持向量机故障诊断, 实现数据深度利用与安全预警。实验表明, 监控器平均测量误差 $< 0.1\text{A}$, 响应时间 50ms , 在精度、实时性与性价比上优于同类产品, 可有效延长蓄电池寿命、提升系统运行效率。

关 键 词 : 光伏发电; 蓄电池; 电流监控; 智能感知; STM32; 故障诊断

Innovative Design and Efficiency Optimization of On-line Monitor for Battery Current of Photovoltaic System Based on Intelligent Sensing

Yu Jiansheng

Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou, Guangdong 510665

Abstract : Aiming at the problems of insufficient monitoring accuracy, poor real-time performance, high cost and inadequate data mining of battery current in photovoltaic power generation systems, an online battery current monitor based on intelligent perception is designed. The hardware adopts Hall sensor, STM32F407VET6 microcontroller, RS485 communication and multi-channel regulated power supply to realize high-precision non-contact current collection and stable transmission; the software adopts modular design, integrating composite filtering, outlier elimination and CRC verification to improve data reliability; statistical analysis, trend prediction and support vector machine fault diagnosis are introduced to realize in-depth data utilization and safety early warning. Experiments show that the monitor has an average measurement error of $< 0.1\text{A}$ and a response time of 50ms , which is superior to similar products in accuracy, real-time performance and cost performance, and can effectively extend the service life of the battery and improve the system operation efficiency.

Keywords : photovoltaic power generation; storage battery; current monitoring; intelligent perception; STM32; fault diagnosis

引言

随着全球能源结构转型与环保要求不断提升, 太阳能作为清洁、储量丰富的可再生能源, 已成为应对能源危机与环境问题的重要方向。光伏发电凭借运行稳定、维护简便等优势得到广泛应用, 但太阳能固有的间歇性与不稳定性, 必须依靠蓄电池实现能量存储与供需平衡。蓄电池在光照充足时储存富余电能, 在夜间或阴天释放电力, 是保障光伏系统连续可靠供电的核心储能部件。

蓄电池电流是表征充放电状态、健康水平与剩余容量的关键参数, 精准在线监控至关重要。电流异常会直接引发蓄电池过热、极板损伤、充放电效率下降等问题, 严重缩短使用寿命, 甚至导致系统停机。实时监测电流可优化充放电策略、预判故障、降低运维成本, 对提升光伏系统整体可靠性与经济性具有重要工程价值。

一、光伏系统及蓄电池电流监控原理

(一) 光伏系统工作原理

光伏发电系统依托光生伏特效应实现光电转换, 主要由光伏

组件、控制器、蓄电池、逆变器及负载构成闭环运行系统。光伏组件采用硅基半导体材料, 在光照作用下产生电子-空穴对, 在内建电场驱动下定向移动形成直流电流, 完成太阳能到电能的转换。逆变器将直流电转换为符合负载与电网要求的交流电, 通过

调制与滤波抑制谐波，提升供电质量。

蓄电池作为核心储能单元，在光伏输出功率大于负载需求时存储富余电能，在夜间或光照不足时释放能量，保障供电连续。控制器实时监测电压、电流、功率等关键参数，执行充放电保护、状态切换与功率调节，避免过充、过放、过载等风险，维持系统稳定高效运行。整体能量流程表现为：光照充足时，光伏组件发电直供负载并为蓄电池充电；光照不足时，蓄电池放电支撑负载，形成全天候稳定供电闭环。

（二）蓄电池在光伏系统中的作用

蓄电池是平抑光伏间歇性、保障系统稳定运行的核心部件，主要承担三大功能。第一，时序储能与能量转移，通过“峰储谷放”解决昼夜、阴晴导致的发电波动，是独立光伏系统、偏远地区供电的关键保障。第二，功率动态调节，快速响应负载突变与光照波动，在负载突增或光伏输出骤降时补充功率，在发电过剩时吸收多余能量，平滑系统功率波动，降低设备冲击。第三，电能质量优化，缓冲电压电流扰动，抑制谐波与尖峰干扰，提升供电纯净度，延长后端设备寿命。

蓄电池的工作状态直接由充放电过程决定。充电电流过大会引发温升、极板硫化、析气等问题，严重衰减寿命；充电不足则容量无法充分利用，供电能力下降。放电电流过大、深度放电会加速老化，频繁充放电循环也会加剧性能衰减。因此，对蓄电池充放电进行精细化控制，是提升系统可靠性、延长整体使用寿命的关键。

（三）蓄电池电流监控的重要性

蓄电池电流是反映充放电状态、健康水平与容量变化的核心特征量，实时高精度监控具有多重工程价值。首先，保障系统连续运行，电流监测为 MPPT 最大功率跟踪提供关键反馈，控制器依据实时电流、电压调整工作点，使光伏组件保持最高转换效率，提升整体发电量。长期电流数据可用于建立状态模型，通过电流异常可快速识别控制器故障、线路断路、负载短路等问题，及时处理可避免系统停机与蓄电池损坏。其次，显著延长蓄电池寿命，合理控制充放电电流可避免过充、过放与大电流损伤，相关数据表明，科学的电流监测与管控可使蓄电池寿命延长 20% - 30%，大幅降低运维与更换成本。

（四）现有监控技术分析

蓄电池电流监控核心由传感采集、信号处理、数据通信三部分构成，现有技术路线各有侧重，难以全面适配光伏系统的多维度需求。传感层面，霍尔电流传感器采用非接触磁电转换方式，具备电气隔离、线性度优、响应迅速且交直流通用的特点，适配光伏高压场景，但成本较高，易受温度影响出现漂移。分流器依托欧姆定律测量，结构简单、成本低廉且精度适中，却需串入主回路，存在功率损耗，大电流工况下发热明显，影响测量稳定性与设备寿命。

信号处理分为模拟与数字两类：模拟处理实时性强、电路简便，但精度不足、抗干扰弱且参数固定，无法适应复杂电磁环境；数字处理通过 ADC 转换结合微控制器算法完成滤波校准，精度高、灵活性强、抗干扰佳，可实现谐波分析等高级功能，但对

硬件要求更高，成本与功耗也相对提升。

二、监控器的系统设计与效能优化分析

（一）监控器硬件系统设计

监控器硬件采用模块化架构，核心包含电流采集、数据处理、通信及电源四大模块，各模块协同运作，实现光伏系统蓄电池电流的实时精准在线监控。整体架构以数据处理模块为核心，统筹各模块数据交互与功能落地，保障系统稳定运行。

电流采集模块作为数据输入核心，选用霍尔传感器，相较于分流器的接触式测量，其基于霍尔效应的非接触式测量，具备精度高、线性度优、隔离性强的优势，可规避光伏高压大电流环境的电气干扰，保障测量安全。为解决其温度敏感问题，选用带温度补偿功能的霍尔传感器，确保不同环境温度下的测量精度；同时设计信号调理电路，通过运算放大器构成的同相放大电路，将传感器 0 ~ 100mV 微弱信号放大至 0 ~ 3V，适配数据处理模块 ADC 输入范围，搭配二阶低通滤波电路滤除 100Hz 以上高频噪声，提升信号质量。

数据处理模块选用 STM32F407VET6 微控制器，其 168MHz 主频与 12 位集成 ADC 可快速完成信号数字化转换与实时分析，丰富外设便于模块交互；搭配 8MHz HSE 晶振（经 PLL 倍频至 168MHz）、32.768kHz LSE 晶振，以及按键与上电复位结合的复位电路、电源滤波电路，保障微控制器稳定工作。RS485 通信模块通过 MAX485 电平转换芯片实现 TTL 与差分电平转换，6N137 光耦隔离电路提升抗干扰能力，满足远程数据传输需求。电源模块通过 LM2596 芯片将 24V 输入转换为 5V，为传感器及调理电路供电，再经 AMS1117-3.3LDO 芯片转换为 3.3V 供微控制器使用，搭配滤波电容与稳压二极管，确保供电稳定。

（二）监控器软件系统设计

监控器软件采用模块化设计思想，以数据交互为核心，分为数据采集、数据处理、通信及用户界面四大程序模块，具备良好的可扩展性与维护性，实现光伏系统蓄电池电流的全流程监控。软件整体架构通过消息队列实现各模块数据交互，确保数据传输的一致性与及时性。数据采集程序负责与硬件交互，配置微控制器 ADC 模块，设置合理采样参数，实时采集经信号调理后的电流信号并完成模数转换，为后续处理提供原始数据。数据处理程序是软件核心，对采集的原始数据进行滤波、校准及异常值处理，补偿传感器误差，计算蓄电池充放电状态、剩余容量等关键参数，为监控决策提供支撑。通信程序遵循 RS485 通信协议，将处理后的有效数据打包成特定格式数据包，通过通信接口发送至上位机，同时接收上位机指令，实现监控器参数远程设置与远程控制。用户界面程序提供直观友好的操作界面，以图形化方式实时展示电流数据、历史曲线，支持历史数据按时间范围查询，设置异常报警功能，当电流超出正常范围时及时发出提示，便于用户快速响应。各模块分工明确、协同配合，模块化设计不仅降低了开发难度，也为后续功能升级与维护提供了便利，确保软件系统与硬件模块高效联动。

（三）数据采集与处理算法设计

为确保采集数据的准确性、实时性与可靠性，设计科学合理的数据采集与处理算法，兼顾数据连续性与抗干扰能力。数据采集采用定时采集与触发采集相结合的方式，通过微控制器定时器中断设置100ms定时采样间隔，实现电流数据的周期性采集，保障数据连续性；当检测到蓄电池充放电状态变化或接收到上位机采集指令时，触发即时采样，精准捕捉关键节点的电流数据。同时采用10次采样取平均值的方法，有效降低随机噪声对采集数据的影响，提升测量精度。数据处理采用复合滤波与异常值处理相结合的算法：复合滤波先通过中值滤波对连续5个采样数据排序取中间值，去除脉冲干扰，再通过滑动平均滤波对最新N个数据求算术平均，平滑数据曲线，减少随机噪声影响；异常值处理采用 3σ 准则，基于正态分布特性，将超出 $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ 区间的数据判定为异常值，通过相邻正常数据插值替代，避免异常值影响数据分析结果。通过上述算法设计，有效提升了数据质量，为光伏系统蓄电池电流监控的准确性提供了可靠保障，确保系统能够精准反馈蓄电池运行状态。

（四）系统效能优化设计

针对光伏系统监控器户外长期运行的能耗、运算效率及成本痛点，结合软硬件特性，开展多维度效能优化设计，提升系统综合性能与工程价值，契合光伏电站节能降耗趋势。

硬件上，采用低功耗策略，选用低静态电流霍尔传感器及STM32F407VET6低功耗模式，通过GPIO端口唤醒机制，在电流稳定、无数据传输时段触发休眠，降低待机功耗；优化PCB布局，遵循信号完整性原则，缩短敏感信号路径，增设接地铜箔与电磁屏蔽层抑制EMI，选用贴片元器件缩减体积、降低损耗，提升集成度与稳定性。

软件上，基于指令级优化，精简数据处理冗余步骤，用查表法替代复杂浮点运算，降低CPU占用率；优化复合滤波算法迭代逻辑，动态调整滤波窗口长度，在保证滤波效果的同时减少运算量、提升响应速度；引入LZ77无损压缩算法及优化通信协议

帧结构，减少RS485通信数据量与传输周期，降低传输功耗与误码率。

三、实验验证与结果分析

为验证光伏系统蓄电池电流在线监控器的性能，搭建了由光伏系统、本次设计的监控器及各类测试设备组成的实验平台。光伏系统含太阳能板、MPPT逆变器、铅酸蓄电池和控制器，模拟实际光伏发电场景；测试设备包括高精度电流传感器（精度0.1%）、示波器、万用表等，用于校准和验证监控结果。实验设计多工况测试，涵盖不同光照强度、负载类型及环境温度，模拟实际运行场景；数据采集点选在蓄电池正负极等关键位置，采集频率10Hz，持续测试一个月以获取充足数据。实验结果显示，监控器能准确跟踪蓄电池充放电电流变化，波动小且与标准传感器测量值基本一致。误差分析表明，各工况下平均误差均小于0.1A，最大误差不超过0.2A；实时性测试中，监控器平均响应时间为50ms，均满足设计要求，验证了监控器的准确性和可靠性。

四、结论

本研究成功开发光伏系统蓄电池电流在线监控器，完成软硬件全流程开发。硬件以STM32F407VET6为核心构建模块化架构，采用高隔离霍尔传感器采集电流并配套调理电路；软件模块化设计，结合采集策略、复合滤波及 3σ 算法保障数据质量，通过RS485通信与人机界面实现远程监控管理。

未来将从三方面推进优化：一是优化硬件配置，融入抗干扰技术并选用更高精度的传感器，增强系统在极端环境下的适配能力；二是将AI技术与大数据算法相结合，搭建实时分析预测体系，实现监控决策的智能化升级；三是尝试应用5G、LoRa等新型通信方式，完善分布式监控架构，促进监控器与光伏系统设备的深度协同，进一步提升光伏系统的运行效能与可靠性。

参考文献

- [1] 张承瑞, 李建明, 王浩. 光伏储能系统蓄电池电流高精度监控技术研究[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 145-152.
- [2] 刘军, 陈丽, 赵阳. 基于STM32的蓄电池电流在线监测系统设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(8): 132-136.
- [3] 王艳, 李刚, 张磊. 霍尔传感器在光伏蓄电池电流测量中的应用优化[J]. 传感器技术学报, 2023, 36(5): 789-794.