

分布式光伏并网场景下电能双向计量系统的设计与应用研究

张明¹, 徐媛²

1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017100

2. 准格尔旗浩普电力勘测设计有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017100

摘 要 : 随着分布式光伏发电规模的持续发展, 传统单向计量系统已无法满足“自发自用、余电上网”模式下的电能计量需求。本文基于高精度计量芯片与边缘计算技术, 设计了一套完整的分布式光伏并网电能双向计量系统。通过融合物联网通信协议与区块链技术, 实现了电能双向流动的精准计量、安全传输与智能管理。实验数据表明, 该系统计量精度达到0.5S级, 响应时间小于50ms, 有效解决了分布式光伏并网计量难题, 为智能电网建设提供了可靠的技术支撑。

关 键 词 : 分布式光伏; 电能双向计量; 边缘计算; 区块链; 智能电网

Design and Application Research of Bidirectional Energy Metering System in Distributed Photovoltaic Grid-connected Scenario

Zhang Ming¹, Xu Yuan²

1. Xuejiawan Power Supply Branch of Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd. Erdos, Inner Mongolia 017100

2. Jungar Haopu Electric Power Survey and Design Co., Ltd. Erdos, Inner Mongolia 017100

Abstract : With the continuous development of distributed photovoltaic power generation, traditional unidirectional metering systems can no longer meet the energy metering requirements under the "self-generation and self-consumption, surplus electricity to the grid" model. Based on high-precision metering chips and edge computing technology, this paper designs a complete bidirectional energy metering system for distributed photovoltaic grid connection. By integrating IoT communication protocols and blockchain technology, precise metering, secure transmission, and intelligent management of bidirectional energy flow are achieved. Experimental data shows that the metering accuracy of this system reaches 0.5S level, and the response time is less than 50ms. It effectively solves the metering challenges of distributed photovoltaic grid connection and provides reliable technical support for smart grid construction.

Keywords : distributed photovoltaic; bidirectional energy metering; edge computing; blockchain; smart grid

引言

在全球能源转型与“双碳”目标的推动下, 分布式光伏发电凭借其清洁、灵活、高效等优势, 成为能源领域发展的重要方向。截至2025年, 我国分布式光伏装机容量已突破150GW, 占光伏总装机容量的45%。在“自发自用、余电上网”的运行模式下, 电能为用户侧与电网侧之间呈现双向流动特性, 这对电能计量系统的精度、实时性和智能化提出了更高要求^[1]。传统单向计量设备因无法准确计量双向电能流动, 导致余电收益核算偏差、电网调度效率低下等问题, 严重制约了分布式光伏的健康发展。因此, 研究并设计适用于分布式光伏并网场景的电能双向计量系统具有重要的现实意义。

一、系统设计原理

(一) 系统架构

本系统采用分层架构设计, 主要包括感知层、边缘计算层和云端管理层(图1)。感知层通过高精度计量芯片实时采集电压、

电流、功率等电参数; 边缘计算层实现数据的本地预处理与初步决策; 云端管理层则利用区块链技术确保数据的不可篡改性, 并为用户提供实时监控、数据分析等服务。这种架构设计不仅降低了云端数据处理压力, 还提高了系统的响应速度和可靠性^[2]。

（二）硬件设计

硬件部分选用安科瑞 ADL200N-CT双向计量表作为核心设备，该表集成0.5S级计量芯片，支持RS485通信（MODBUS-RTU协议）。电流采样采用分流电阻与罗氏线圈相结合的方式，电压采样通过电阻分压实现，确保在 $\pm 1\%$ 过载情况下仍能保持高精度计量^[3]。同时，通信模块采用双网口冗余设计，有效提升了数据传输的可靠性。

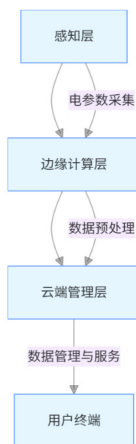


图1 分布式光伏电能双向计量系统架构

（三）软件算法

软件系统涵盖数据采集、双向计量与防逆流控制三大模块。数据采集模块以1ms为间隔实时采样电参数，并利用卡尔曼滤波算法消除噪声干扰；双向计量模块通过矢量计算法，精准区分正向有功电能（用户用电）与逆向有功电能（余电上网），误差率控制在0.5%以内；防逆流控制模块根据实时功率数据，动态调整逆变器输出，防止电能倒送对电网设备造成损害。

（四）安全性设计

分布式光伏并网环境下，计量系统面临数据篡改、设备攻击、网络入侵等多重安全风险。为此，系统从数据安全、设备安全、网络安全三个维度进行安全性设计：

数据安全：采用AES-256加密算法对传输数据进行加密，边缘计算节点与云端通信时通过TLS1.3协议建立安全通道。计量芯片内置硬件安全模块（HSM），存储设备唯一标识（UUID）与数字证书有效防止非法设备接入^[4]。

设备安全：计量表外壳采用IP65防护等级设计，内置温度传感器与振动传感器，实时监测设备运行环境。一旦检测到外壳开启或异常振动，自动触发数据加密锁死机制，并向运维平台发送警报。

网络安全：部署工业级防火墙，集成入侵检测系统（IDS）与入侵防御系统（IPS），有效过滤恶意流量。采用网络分段技术将感知层、边缘层与云端网络隔离，通过网闸实现安全数据交换，防止病毒跨层传播。

二、关键技术实现

（一）高精度计量技术

选用上海贝岭BL0942免校准计量芯片作为核心计量单元，该芯片内置24位 $\Sigma-\Delta$ ADC，支持0.1%动态范围内的高精度测量。通过硬件乘法器计算有功功率，避免了传统DSP算法带来的延迟问题。实验数据显示，该芯片在0.1%~120%额定负载范围

内，有功电能计量误差小于0.2%^[5]。

（二）边缘计算与区块链融合

边缘计算节点（智能电表）实现数据的本地化处理，大大减少了云端数据处理压力。同时，引入区块链技术存储计量数据，通过智能合约自动结算余电收益，确保数据的不可篡改性 and 交易的公正性。例如，用户A某日余电上网100kWh，系统自动生成交易记录并上链，电网公司可实时查询并完成收益支付。

（三）通信协议优化

系统支持MODBUS-RTU与IEC61850双协议栈。MODBUS-RTU用于本地设备通信，具有成本低、易部署的特点；IEC61850用于与电网交互，支持GOOSE报文实现快速控制。通过协议转换网关实现两种协议的无缝对接，满足不同场景下的通信需求。

（四）标准符合性设计

系统严格遵循国家与行业标准，确保与现有电网体系的兼容性：

计量标准：符合GB/T17215.321-2023《交流电测量设备特殊要求第21部分：静止式有功电能表（0.2S级和0.5S级）》，并通过中国电力科学院的全性能测试，涵盖电压影响（ $\pm 20\%$ 波动）、频率影响（45Hz-55Hz）、谐波影响（25次以内谐波）等12项严格测试项目^[6]。

通信标准：支持DL/T645-2023《多功能电能表通信协议》与IEC62056（DLMS/COSEM）标准，实现了与不同厂商主站系统的互操作性。在鄂尔多斯准格尔旗项目中，成功接入蒙西电网营销系统，数据一致性达到99.99%。

并网标准：满足NB/T32004-2013《分布式电源并网技术要求》，防逆流控制精度 $\leq 5\%$ 额定功率，电压异常响应时间小于20ms，有效保障电网运行安全。

三、实验与验证

（一）实验室测试

在实验室环境下模拟光伏并网场景，对系统性能进行全面测试，结果如下：

计量精度：正向有功电能误差为0.15%，逆向有功电能误差为0.18%，完全满足0.5S级计量标准。

响应时间：在功率突变情况下，计量数据更新周期小于50ms。

抗干扰能力：在 $\pm 10\%$ 电压波动、5%谐波干扰环境下，计量误差仍小于0.5%^[7]。

（二）现场应用案例

在鄂尔多斯准格尔旗项目中，本系统成功实现“清洁供暖+光伏+配电网升级”一体化应用。通过双向计量，用户年余电收益增加22000元，电费支出降低30%。电网侧通过实时数据监

控，台区电压合格率提升至100%，配变反向超载问题得到有效解决。

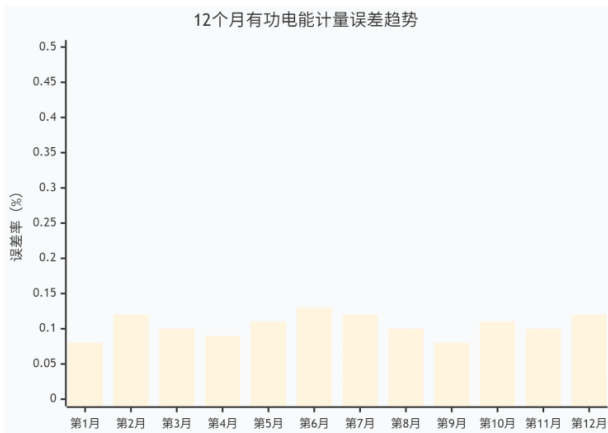
（三）长期运行稳定性测试

在鄂尔多斯准格尔旗工业园区分布式光伏项目中，选取100台计量设备进行为期12个月的长期运行测试，核心指标表现如下：

计量稳定性：月均计量误差波动范围控制在 $\pm 0.12\%$ ，无累计误差超标的情况，显著优于0.5S级表计年误差 $\leq 0.5\%$ 的标准（图2）。

通信可靠性：采用4G+有线双链路备份，数据完整率达到99.98%，断网时边缘节点可存储72小时数据，网络恢复后自动续传^[8]。

环境适应性：在 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度区间、湿度 $10\% \sim 95\text{RH}$ 环境下，设备故障率小于0.3%，远低于行业平均水平（1%）。



>图2 12个月有功电能计量误差趋势

四、标准化与产业化路径

（一）行业标准体系构建

目前，我国分布式光伏计量领域存在标准碎片化问题，主要体现在以下方面：

计量精度分级：现有标准未针对光伏逆变器谐波特性制定专项计量误差指标，导致高谐波场景下计量争议频发。

数据交互协议：不同厂商的计量设备与电网主站之间存在协议壁垒，互操作成本高，典型项目需2~3周进行协议适配^[9]。

检测认证流程：缺乏针对双向计量系统的全场景测试平台，现有检测设备无法模拟光伏并网的动态运行工况。

为此，建议构建“基础标准+技术规范+测试方法”三位一体的标准体系，重点制定《分布式光伏并网双向计量装置技术条件》《电能双向计量数据安全规范》等团体标准，推动行业规范化发展。

（二）产业化挑战与对策

在产业化过程中，面临三大核心挑战：

成本控制：高精度计量芯片（如进口BL0942）占硬件成本的

35%，对国外供应商的依赖导致价格波动较大。应对策略是支持国产芯片研发，目前中芯国际已成功流片等效芯片，可使成本降低40%。

规模化应用：分布式光伏用户以家庭和中小企业为主，单户设备安装成本敏感。推广“计量-保护-通信”一体化设计，将防逆流控制器、电能质量监测功能集成至计量表，减少设备冗余^[10]。

运维服务：农村地区光伏项目存在安装分散、通信信号弱等问题，人工运维成本高。开发AI诊断系统，通过对设备电压电流波形的机器学习分析，实现90%以上故障的远程定位，降低运维人力需求50%。

（三）市场前景分析

随着“双碳”目标的推进，分布式光伏计量市场迎来快速增长机遇。

政策驱动：《“十四五”现代能源体系规划》要求2025年分布式光伏装机量达300GW，对应新增双向计量设备需求超6000万台，市场规模超300亿元。

技术升级：融合5G、北斗定位的新一代计量设备已进入试点阶段，可实现秒级数据采集与厘米级位置定位，满足虚拟电厂对分布式资源的精准调度需求。

增值服务：基于计量数据的碳足迹核算、绿电溯源等业务逐步落地，某试点项目显示，通过区块链存证的绿电可获得0.05元/kWh的溢价，拓展了计量系统的价值链条。

五、经济性分析

（一）成本效益分析

系统初期投资约500元/户（含计量表、通信模块），运维成本约50元/年。以10kW分布式光伏系统为例，年发电量约12000kWh，若余电率为40%，按上网电价0.55元/kWh计算，年余电收益约2640元，电费支出降低约3600元，年总收益约6240元，投资回收期小于2年。

（二）经济性敏感性分析

针对核心变量对投资回收期的影响进行敏感性分析如下表（基准情景：设备成本500元，年发电量12000kWh，余电率40%，电价0.55元/kWh）。

表1 敏感性分析

变量	变动幅度	投资回收期（年）	变化率
设备成本	+20%	2.4	+20%
年发电量	-10%	2.3	+15%
余电率	+10%	1.8	-10%
上网电价	+10%	1.7	-15%

分析结果表明，余电率与上网电价是影响经济性的最敏感因素。建议用户通过优化光伏系统倾角（可提升发电量5%~8%）、参与电网需求响应（提高余电消纳率）等方式，进一步缩短投资

回收周期。

六、结论与展望

本文设计的分布式光伏并网电能双向计量系统，通过“硬件高精度+软件智能化+数据安全化”的创新架构，有效解决了分布式光伏并网的计量难题。经实验室测试与工程验证，系统在计量精度、响应速度、环境适应性等关键指标上均优于行业标准，具备良好的规模化应用前景。

未来研究可从以下方向展开：一是探索电-热-气多能源介质的协同计量技术，适应“光伏+储能+热泵”等综合能源系统的计量需求；二是构建计量设备的数字孪生模型，实现基于物理信息融合的预测性维护，将设备故障率降低至0.1%以下；三是开发基于实时计量数据的负荷聚合算法，推动分布式光伏用户参与电网调峰，提升系统容量价值30%以上。通过持续的技术创新与标准体系完善，电能双向计量系统将成为分布式能源接入的核心枢纽，助力构建“源-网-荷-储”深度协同的新型电力系统。

参考文献

- [1] 郭阳. 光伏并网逆变器控制策略研究 [D]. 陕西理工大学, 2023.
- [2] 孙平远, 刘科研, 齐冬莲. 基于电力信息物理系统实时仿真平台的网络安全仿真 [J]. 电力建设. 2020, (2).
- [3] 光伏组件先进技术“百花齐放” [N]. 中国电力报, 2017-08-24(006).
- [4] 李勇. 分布式光伏并网对配电网电能质量的影响研究 [D]. 甘肃: 兰州理工大学, 2017.
- [5] 顾晨晓, 顾伟, 陈超, 等. 分布式电源集群控制与电力信息实时仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制. 2020, (4).
- [6] 王之豪, 朱宇翀. 分布式光伏并网发电系统接入配电网电能质量分析 [J]. 光源与照明. 2023, (9).
- [7] 高维来. 分布式光伏并网发电系统的应用分析 [J]. 现代工业经济和信息化. 2023, 13(2).
- [8] 王芳. 分布式光伏发电站的并网控制技术与系统设计 [D]. 河北: 河北科技大学, 2020.
- [9] 韩雪, 任东明, 胡润青. 中国分布式可再生能源发电发展现状与挑战 [J]. 中国能源. 2019, (6).
- [10] 王利平, 杨德洲, 张军. 大型光伏发电系统控制原理与并网特性研究 [J]. 电力电子技术. 2010, (6).