



储能系统能量转换效率对高压费控计量累积误差的量化评估研究

张彦生, 刘占雄, 张 波, 王五星, 翟光辉

(国网河北省电力有限公司邯郸供电分公司, 河北 邯郸 056002)

摘 要: 在当今全球新能源产业快速发展的背景下, 储能系统成为维持电力系统稳定运行的关键所在, 其能量转换效率直接关联能源利用效益, 而高压费控计量的准确性会影响到电力交易的公平性, 本文关注储能系统能量转换效率与高压费控计量累积误差的关联机制, 通过分析储能系统以及高压费控计量累积误差的研究现状及相关影响机制, 理论推导构建量化评估模型, 明确二者量化关系。该研究为电力企业优化储能系统运维、提升计量准确性提供了理论支撑, 也为储能与计量行业协同发展提供了参考。

关键词: 储能系统; 能量转换效率; 累积误差; 量化评估

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0849

中图分类号: TM 93

文献标识码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 10-3989-03

Quantitative evaluation study on the impact of energy conversion efficiency of energy storage systems on the cumulative error of high-voltage fee-controlled metering

ZHANG Yansheng, LIU Zhanxiong, ZHANG Bo, WANG Wuxing, ZHAI Guanghui

(Handan Power Supply Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd, Handan 056002, Hebei, China)

Abstract: Against the backdrop of the rapid development of the global new energy industry, energy storage systems have become crucial for maintaining the stable operation of power systems. Their energy conversion efficiency is directly related to energy utilization benefits, while the accuracy of high-voltage fee-controlled metering affects the fairness of electricity transactions. This paper focuses on the correlation mechanism between the energy conversion efficiency of energy storage systems and the cumulative error of high-voltage fee-controlled metering. By analyzing the research status of energy storage systems and the cumulative error of high-voltage fee-controlled metering as well as their relevant influence mechanisms, a quantitative evaluation model is constructed through theoretical derivation to clarify the quantitative relationship between the two. This study provides theoretical support for power enterprises to optimize the operation and maintenance of energy storage systems and improve metering accuracy, and also offers references for the coordinated development of the energy storage and metering industries.

Keywords: energy storage system; energy conversion efficiency; cumulative error;

收稿日期: 2026-09-29。

基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目 (kj2024-071)。

第一作者及通信联系人: 张彦生 (1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力计量, E-mail: Zhangyansheng_6776@126.com。

引用本文: 张彦生, 刘占雄, 张波, 等. 储能系统能量转换效率对高压费控计量累积误差的量化评估研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(10): 3989-3991.

Citation: ZHANG Yansheng, LIU Zhanxiong, ZHANG Bo, et al. Quantitative evaluation study on the impact of energy conversion efficiency of energy storage systems on the cumulative error of high-voltage fee-controlled metering[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15 (10): 3989-3991.

quantitative evaluation

2023年下半年以来,全球范围内对2030年可再生资源装机增至三倍基本达成共识^[1],截至2024年底,太阳能、风能的装机总量已经突破1200 GW,但是由于其间歇性、波动性的特征,电力系统调频、调峰面临更高要求,储能系统凭借灵活充放电特性成为解决这一难题的核心思路,目前累计装机已超500 GW,高压储能系统在电网侧、工商业用户侧应用占比超60%。高压费控计量装置作为电能计量装置核心设备之一,其精确程度直接关系到各方经济利益,按《电能计量装置技术管理规程》(DL/T 448—2016)要求,误差必须控制在 $\pm 0.2\%$ 以内,然而储能系统能量转换效率波动会改变电力潮流、电压稳定性及电能波形,导致计量装置的误差累积,若无法精准评估则会引发交易纠纷。对此,本文通过分析储能系统以及高压费控计量累积误差的研究现状及相关影响机制,理论推导构建量化评估模型,明确二者量化关系,填补当前储能系统与计量误差研究缺乏交叉融合、量化分析不足的空白,既能够完善电力系统计量误差分析理论体系,又可以为电力企业提供计量误差评估工具,助力制定运维与校准方法,同时为储能系统选型提供科学依据,推动相关电力产业的共同发展。

1 储能系统、高压费控计量误差研究现状

1.1 储能系统相关研究进展

储能系统是解决可再生能源规模化消纳和实现能源革命的关键支撑技术,已成为构建新型电力系统的核心要素和基础装备^[2]。在技术优化层面,Bhajana等^[3]通过改进逆变器拓扑结构,将高压储能系统变换器效率提升至97%以上,有效降低了电力电子器件的开关损耗。国内团队则针对锂电池储能系统,提出了一系列基于动态充放电策略的效率优化方法,通过实时调整充放电电流,使系统循环效率提升了2%~3%。在效率影响因素分析方面,国内外研究普遍认为环境温度、充放电倍率是关键变量。例如,当环境温度低于0℃时,锂电池储能系统能量转换效率可下降10%~15%,而当充放电倍率从1C提升到2C时,效率会下降5%~8%。但现有研究大多仍聚焦于如何提升储能系统

自身效率,并未深入探讨效率波动对关联设备(如计量装置)的影响。

1.2 高压费控计量误差相关研究进展

国际电工委员会规定:所有仪表和计量装置的误差都必须进行实际的测量,未经测量,仅是以其他测量中计算出来的引用电压、电流和功率因数组合的误差,不能作为评价装置基本误差的依据^[4],针对高压费控计量误差方面,现有研究主要集中于单一的干扰因素分析。例如,在谐波影响方面,通过仿真发现,3次谐波含量超过5%时,0.2级电能表的计量误差就会增加0.3%以上;在互感器性能方面,研究表明互感器负载阻抗偏离额定值20%时,比差可扩大0.1%~0.15%。部分学者还关注了新能源接入时对计量的影响,如风电出力波动会导致电压暂时下降,进而使计量误差短时增加0.2%~0.3%。但这些研究都未将储能系统能量转换效率作为核心变量,无法解释效率变化与计量累积误差之间的关联。

2 量化评估模型构建

2.1 相关理论基础与影响机制

储能系统的能量转换包含充电、储能、放电三阶段,效率为放电输出与充电输入电能比值,其核心损耗包括储能介质损耗(20%~30%)、电力电子变换器损耗(高压场景40%~60%)、运行工况损耗(10%~20%),效率下降时变换器损耗增幅十分明显,如逆变器开关频率偏离最优值10%会使效率下降3%~5%。

高压费控计量装置由PT、CT、电能表以及费控模块构成,通过互感器转换高压信号后由电能表计算电能,误差源于互感器与电能表,储能系统能量双向流动下,效率波动会加剧误差叠加,单次循环误差0.15%时,50次循环累积误差就会高达7.5%^[5]。并且效率通过“损耗传导-参数畸变-误差叠加”大大影响累积误差:效率下降会导致热能、电磁损耗的增加,前者会升高互感器温度从而扩大其误差,后者则是产生谐波畸变波形,畸变波形会改变电信号的特征,从而导致电能表计算偏差。而在多次的充放电循环中,上述因效率下降引发的互感器误差与电能表误差会不断地累积,形成非线性

的误差叠加。

2.2 模型构建核心内容

本文所提出的量化评估模型，以储能系统能量转换效率与高压费控计量累积误差的关联机制为基础，整合行业中较为权威的文献与行业标准中的损耗数据、误差数据，同时为了提高所构建模型的实用性与准确性，需设定常规化假设前提：储能系统运行环境温度稳定在 $25\sim 35^{\circ}\text{C}$ 的工业常规范围，电网电压波动控制在 $\pm 2\%$ 的合规区间，充放电倍率固定为 1C 的常见运行值，且高压费控计量装置选用 0.2 级主流配置，初始误差控制在 $\pm 0.05\%$ 以内。

模型核心围绕三方面误差贡献因素展开计算：首先是储能系统的实际能量转换效率与额定效率的差值带来的直接误差，结合相关文献拟合的效率影响系数，得出基础的误差分量；然后是效率下降引发的谐波含量变化产生的误差，根据效率从 96% 降至 88% 时谐波含量从 2% 增至 8% 的规律，结合谐波对计量的影响系数，计算谐波误差分量；最后则是对效率下降导致互感器温度升高带来的累积误差进行分析，依据效率每降低 1% 互感器温度升高 1.5°C 的特性，结合温度影响系数与充放电循环次数，得到温度相关误差分量。将得到的这三部分误差叠加，就可以得到高压费控计量总累积误差。

3 模型预期效果与应用场景

3.1 模型预期效果

从理论预期效果来看，该模型可以实现三大核心价值：一是精准预测，能够快速评估不同能量转换效率下的高压费控计量累积误差，为误差风险的预判提供量化依据；二是成本优化，帮助我国电力企业节省储能系统运维成本与计量误差损失，避免过度运维或因误差导致的经济损耗；三是标准统一，为含储能场景下的计量误差评估提供一个标准化工具，减少因评估方法差异引发的争议。

3.2 量化模型应用场景

在实际应用场景中，该模型可广泛服务于电力行业关键环节。在储能系统选型阶段，可用于电网侧、用户侧储能项目招标，通过计算不同效率产品的误差风险，优先选择能量转换效率 $\geq 94\%$ 的设备，从而达到降低长期计量损失的目的。该类基于量化评估开展设备选型的工程思路，在智能化工业

项目建设中已有实践参考^[6]。在电力交易结算环节，针对含储能的用户交易，依据模型评估不同时段累积误差，对结算电费进行精准修正，保障发电企业、电网公司与用户的利益公平。在运维管理的环节，可以辅助差异化运维策略制定。例如，当储能系统效率低于 92% 时，将计量装置校准周期从 1 年缩短至 6 个月，同时指导储能系统变换器参数优化、储能介质维护等工作，确保累积误差控制在 3% 以内，从而满足电力系统运行要求。

4 结 论

本文通过理论的推导与文献数据的整合，明确储能系统能量转换效率通过“损耗传导-参数畸变-误差叠加”机制影响高压费控计量累积误差，其中温度引发的互感器误差是累积误差的主要来源，文中构建的量化评估模型可以准确地预测不同效率下的累积误差，保障电力交易公平与系统稳定运行。未来的研究可以进一步结合压缩空气储能等更多新型储能介质的损耗特性细化模型参数，还可以引入长短期记忆网络（LSTM）等机器学习算法实现累积误差动态预测与预警，并推动制定“含储能的高压费控计量误差评估标准”，规范电力行业流程，促进储能与计量行业的协同发展，为新能源产业与电力市场健康发展提供更加全面的支撑。

参 考 文 献

- [1] 时璟丽. 2030 年可再生能源装机增至三倍面临的挑战和路径探索[J]. 中国能源, 2024, 46(11): 5-14.
- [2] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2024 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192.
- [3] SUBRAHMANYA KUMAR BHAJANA V V, DRABEK P, THUMMA R, et al. Improved bidirectional DC/DC converter configuration with ZVS for energy storage system: Analysis and implementation[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(5): 1103-1112.
- [4] 尚秋峰, 黄显, 陈青钦, 等. 高压计量装置一体化误差校验系统设计[J]. 计量与测试技术, 2016, 43(2): 33-34, 36.
- [5] 许灵洁, 沈建良, 郭鹏, 等. 基于隶属云和动态时间规整的电能量误差估计方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 78-87.
- [6] 李建林, 马会萌, 田春光, 等. 基于区间层次分析法电化学储能选型方案[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2707-2714.
- LI J L, MA H M, TIAN C G, et al. Selection scheme of electrochemical energy storage based on interval analytic hierarchy process method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2707-2714.