

# 高比例分布式电源接入下互感器计量误差特性研究

李飞, 史轮, 陈磊, 申洪涛, 武光华, 吴一敌, 申雪韵  
国网河北省电力有限公司营销服务中心, 河北 石家庄 051000  
DOI:10.61369/EPTSM.2025120011

**摘 要 :** 高比例分布式电源接入电力系统后, 电网呈现随机波动性、时变性及双向潮流等复杂特征, 显著劣化互感器计量精度, 直接影响电网经济结算与安全稳定。为此, 本文系统性综述该复杂工况下互感器计量误差特性演变、机理与研究进展。首先, 系统分析高比例分布式电源接入引发的电网运行特性演变, 明确其对互感器工作状态的扰动路径与影响机制;<sup>[1]</sup>其次, 深度剖析计量误差内在产生机理, 揭示单/多因素耦合下的误差影响规律; 最后, 基于前述分析提出多维度误差抑制策略, 为互感器计量优化相关研究提供理论支撑。

**关 键 词 :** 高比例分布式电源; 互感器; 计量误差; 复杂工况

## Research on the Metering Error Characteristics of Instrument Transformers under High Penetration of Distributed Generation

Li Fei, Shi Lun, Chen Lei, Shen Hongtao, Wu Guanghua, Wu Yidi, Shen Xueyun  
Marketing Service Center, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 051000

**Abstract :** After high penetration of distributed generation is integrated into the power system, the power grid exhibits complex characteristics such as random fluctuations, time-varying behavior, and bidirectional power flow, significantly deteriorating the metering accuracy of instrument transformers and directly affecting the economic settlement and safety stability of the power grid. To address this issue, this paper systematically reviews the evolution, mechanism, and research progress of metering error characteristics of instrument transformers under such complex operating conditions. Firstly, it systematically analyzes the evolution of power grid operation characteristics caused by the integration of high penetration of distributed generation, clarifying the disturbance paths and impact mechanisms on the operating state of instrument transformers.<sup>[1]</sup> Secondly, it deeply analyzes the internal generation mechanism of metering errors and reveals the error influence laws under single/multi-factor coupling. Finally, based on the aforementioned analysis, it proposes multi-dimensional error suppression strategies to provide theoretical support for research related to the optimization of instrument transformer metering.

**Keywords :** high penetration of distributed generation; instrument transformer; metering error; complex operating conditions

## 引言

高比例分布式电源接入通过改变电网拓扑结构与运行方式, 推动电力系统从传统“源随荷动”单向潮流模式向“源网荷储”多向互动复杂系统转型, 深刻影响电网电能质量与运行参数, 包括潮流分布紊乱、电压电流波动加剧以及谐波污染加剧问题<sup>[1]</sup>。互感器作为联接电力一次系统、二次系统的关键耦合环节, 其传变特性与计量精度直接决定了二次测控、保护及计量装置数据采集的准确性与可靠性。互感器设计多基于50Hz工频正弦波标准, 并依托实验室静态校准。然而, 逆变器并网高次谐波、新能源出力间歇性所引发频率微波动及潮流反转导致宽范围负荷变化, 均导致互感器长期处于非标准工况, 其现场误差远超实验室检定值, 严重影响电能计量公平、状态估计准确度及继电保护可靠性, 亟需开展高比例分布式电源接入下互感器计量误差特性研究<sup>[2-4]</sup>。

基金项目: 国网河北营销中心科技项目“基于电气拓扑的广域互感器群强关联性分析与在线校准数据筛分方法研究”(SGHEYX00AQJS250053)

作者简介: 李飞(1982.10-), 男, 汉族, 河北省石家庄人, 硕士, 单位: 国网河北省电力有限公司营销服务中心, 研究方向: 为电力传感量测技术、电力计量等。

## 一、高比例分布式电源接入场景互感器计量特性

高比例分布式电源接入从拓扑结构、运行参数、电能质量维度影响电网运行特征。具体而言，拓扑结构方面，配电网由辐射状转为网状，潮流双向波动引发铁芯磁化方向周期性反转，增大计量误差；运行参数方面，分布式电源间歇性导致电流幅值波动幅度提升3-5倍，造成铁芯工作点偏离额定磁密，非线性特性或饱和效应加剧；电能质量方面，分布式电源变流器引入高含量奇/偶次谐波，并网点电流 THD 易超出国标限值，同时叠加小幅频率波动，通过磁滞、涡流损耗进一步劣化互感器计量性能<sup>[9]</sup>。综上分析，高比例分布式电源接入下互感器计量误差主要可围绕产生机理、影响规律展开。

常见互感器类型主要包括电流互感器、电压互感器、电子式电流/电压互感器以及组合式互感器，其核心功能、典型适用场景、误差关键影响因素如表1所示。传统电磁式电流互感器、电压互感器设计及校准均基于50/60赫兹额定正弦稳态工况，进而保障该场景下比值差、角差满足精度等级要求。高比例分布式电源接入通过幅值波动、谐波分量、时变特性造成互感器实际工作状态偏离设定工况，其中，幅值波动易使铁芯磁密偏离额定范围，低磁密导致磁导率下降、高磁密引发铁芯饱和，均扩大互感器计量误差；谐波分量易引发叠加损耗，高次谐波涡流损耗大幅高于基波，且造成磁化曲线多值性畸变，使损耗显著提升；时变特性导致励磁电流动态响应滞后，分布式电源出力快速突变情形，动

态误差占比明显增加。上述因素叠加作用，造成互感器计量误差显著增大，远超稳态允许范围。

## 二、高比例分布式电源接入场景互感器计量误差产生机理

### (一) 互感器计量误差传统分析方法

互感器计量误差传统分析方法基于正弦稳态理论，主要面向额定频率正弦波情形稳态误差展开研究，计量误差来源包括磁滞损耗、涡流损耗、励磁电流、二次负荷变化，通过等值电路模型、相量图法量化误差。然而，针对高比例分布式电源接入场景，该方法未考虑非正弦信号谐波耦合效应，缺乏针对时变过程动态响应滞后因素考量，且未结合潮流双向波动造成铁芯磁化反转损耗问题，导致误差计算值与实测值偏差显著，较难适配新型电网运行特性<sup>[9]</sup>。

### (二) 高比例分布式电源接入场景互感器计量误差分析

鉴于传统误差机理难以适配非正弦、时变、双向潮流等复杂工况，无法全面解释磁滞-谐波耦合、涡流频率依赖及动态响应滞后等新误差分量，诸多学者结合新型电力系统运行特性开展互感器计量误差机理体系研究。本节面向高比例分布式电源接入场景互感器计量误差新增机理，系统梳理铁芯磁滞-谐波耦合、涡流效应频率依赖性及动态励磁电流研究进展，深入剖析各机理的物理本质、量化规律及影响因素。

表1 常见互感器类型、适用场景及误差特性表

互感器类型	核心功能	典型适用场景	误差关键影响因素
电流互感器	将大电流按比例转换为小电流，用于计量、保护及监测	发电侧、配电线路、用户侧进线等电流测量场景	1. 低负荷率易进入强非线性区；2. 电流频率与谐波含量；3. 铁芯磁化特性；4. 高频下分布参数寄生效应
电压互感器	将高电压按比例转换为低电压，用于电压测量与绝缘隔离	光伏电站母线、配电变压器高压侧、电网节点电压监测等	1. 二次负荷大小与功率因数；2. 电网电压畸变率；3. 频率偏移；4. 铁芯饱和程度
电子式电流/电压互感器	通过光电转换或罗氏线圈等原理采集信号，直接输出数字或模拟小信号	高谐波含量的光伏电站、智能配电网、数字化变电站等复杂场景	1. 传感元件精度；2. 光电转换模块噪声；3. 温度与电磁环境；4. 数据传输延迟
组合式互感器	集成电流、电压测量功能，简化接线，减少占地	光伏分布式电站出线柜、小型配电房等空间受限场景	1. 电流与电压回路交叉干扰；2. 共用铁芯的磁化耦合；3. 负荷变化的协同影响

针对磁滞-谐波耦合研究，诸多研究通过 J-A 模型、Preisach 模型等量化铁芯磁滞特性，并引入谐波影响分析耦合机制。非正弦信号作用情形，基波形成主磁滞回线，高次谐波叠加形成次磁滞回线，总磁滞回线面积与损耗随谐波含量增加而增大，且谐波与基波相位差、谐波次数显著影响耦合效应。针对涡流效应频率依赖性研究，高比例分布式电源引入大量高次谐波，直接导致涡流损耗激增，进而加剧互感器计量误差。诸多研究通过建立多频率谐波涡流损耗计算模型、推导误差量化关联公式，证实互感器计量误差与谐波频率、含量存在显著相关性。针对动态励磁电流研究，传统理论假设励磁电流与一次侧电流呈静态线性关系，实际工况存在铁芯磁滞惯性、绕组电磁惯性，导致一次侧电流快速情形励磁电流响应滞后，形成动态误差，其大小与电流变化率正相关。诸多研究通过构建等效电路模型，实现动态误差机理量化分析，并提出多类检测方法实现动态误差精准分离、量化。

## 三、高比例分布式电源接入场景互感器计量误差影响规律研究

### (一) 互感器传变误差物理机理与建模基础

电磁式互感器计量准确性取决于其信号传递的保真度，其物理模型通常基于 T 型等效电路进行描述。根据法拉第电磁感应定律与基尔霍夫电流定律，互感器一次电流并非全部感应至二次侧，而是分流出一部分励磁电流以维持铁芯磁通。定义互感器的复数误差为二次电流与一次电流的差值比。由上述定义及物理机制分析可知，励磁电流直接导致出现比值差、相位差。

互感器铁芯磁导率随磁通密度呈现显著非线性，高比例分布式电源场景极低负荷工况易造成铁芯磁导率骤降、励磁电流占比提升，进而引发计量误差；高次谐波则通过磁滞损耗、交叉调制效应加剧非线性偏差。传统频域模型难以表征该复杂过程，部分研究结合 Jiles-Atherton 理论构建时域微分模型可精准刻画铁芯

动态磁化轨迹。

### (二) 互感器计量误差频率偏移敏感性分析

高比例分布式电源接入场景系统频率呈现围绕50Hz工频动态波动特征,该频率偏移幅度通常处于 $\pm 0.5\text{Hz}$ 范围。互感器基于感抗原理设计,其计量精度关于频率偏移幅度呈现累积影响。同时,互感器二次侧感应电动势与频率、匝数及磁通密度成正比,励磁电抗则可由直接表征。

理论分析表明,频率波动与互感器计量误差呈现显著负相关特性:系统因重载或源荷失衡导致频率低于额定工频情形,为维持二次回路电压平衡,铁芯磁通密度需相应增大以补偿电动势损失,同时励磁电抗随频率线性减小,双重效应致使励磁电流显著增大,进而导致互感器比值差向负向漂移、相位差绝对值增大;同理,频率高于工频时,励磁电抗增大、分流作用减弱,误差特性得以改善。针对关口计量等高精度要求场景,微小频率偏差即可能导致误差超出互感器允许限值。

### (三) 互感器多频谱谐波复合计量误差特性

分布式电源逆变器运行过程产生高频开关谐波、其倍频分量,导致互感器长期处于非正弦波形激励工况。互感器多频谱谐波复合计量误差,具体涉及幅频响应、相频响应以及非线性耦合等复杂物理过程。

随着谐波频率升高,铁芯内涡流损耗与频率呈平方关系急剧增大,导致等效励磁电阻衰减,进而显著增大励磁电流有功分量,造成比值差恶化;高频段,互感器绕组漏抗随频率线性递增,励磁阻抗受铁芯非线性特性及饱和效应制约,其增长幅度通常滞后于漏抗,上述阻抗比例失衡导致高次谐波传输过程产生相移,引发二次侧输出波形严重畸变。并且,即使基波电流保持恒定,大幅值谐波电流仍将改变铁芯瞬时工作点,使其在磁化曲线非线性区域频繁切换,进而改变基波分量平均磁导率。

### (四) 宽域负荷波动情形互感器计量误差演化规律

呈现双向流动、大幅波动特征,互感器需在极轻载至重载、

正反向潮流频繁切换全工况下维持计量性能。轻载情形互感器处于“低灵敏度区”,铁芯工作于瑞利区,磁导率随磁场强度骤降引发励磁阻抗大幅衰减,比差、角差远超互感器计量误差允许下限,成为分布式电源计量主要误差来源。此外,分布式电源运行模式切换引发功率因数剧烈波动,通过改变二次回路去磁效应进一步扩大误差波动范围。

综上,高比例分布式电源接入直接改变互感器电磁工作环境,系统频率动态偏移、谐波非线性耦合以及宽幅负荷波动协同作用,造成互感器计量误差呈现显著时变性、非线性特征。

## 四、结语

本文面向高比例分布式电源接入下互感器计量误差特性研究,系统探究互感器计量误差信号特性、物理机理及演变规律,电网运行层面,高比例分布式电源造成电网呈非平稳随机性、频谱展宽以及动态时变特征,传统稳态模型失效;误差机理层面,误差来源为变频、畸变信号下铁芯非线性磁化致励磁阻抗动态变化,以及高频下分布参数引发寄生效应;影响规律层面,频率降低经感抗下降加剧比差、角差,谐波通过损耗增加、磁路耦合产生附加误差并干扰基波计量,轻载工况使互感器进入强非线性“高误差区”。

本研究作为互感器计量误差分析基础理论部分,对后续误差校准研究工作具有指导意义,未来需要深化暂态误差机理研究、研发适配性互感器误差校正技术、推动互感器迭代升级、建立全场景评估体系,进而有效保障高比例分布式电源接入下互感器计量准确性。

## 参考文献

- [1]戴璟,王剑晓,张兆华,等.新型电力系统形态特征与关键技术[J].新型电力系统,2023,1(2):161-183.
- [2]周峰,殷小东,葛得辉,等.电力量子计量技术的进展与趋势.高压技术2023,49(2):618-635.
- [3]蒋建东,李梦佳,周峰,等.互感器误差校验技术综述[J].科学技术与工程,2025,25(3):879-892.
- [4]周峰.电力互感器误差智能校验与在线监测技术[M].中国电力出版社,2023.
- [5]黄天超,李志新,黄奇峰,等.计量用低压电流互感器直流偏磁下的误差计算方法和特性研究[J].电网技术,2025,49(01):373-380.
- [6]殷小东,王斌武,曹祎,等.实时工况下计量用低压电流互感器校准技术研究[J].计量学报,2025,46(08):1083-1090.