

非对称负荷场景下三相四线制电能 计量优化方法

李响, 胡林豪

(国网陕西省电力有限公司兴平市供电分公司)

【摘要】在复杂用电环境下, 非对称负荷已成为影响三相四线制电能计量精度的重要因素。文章研究了非对称负荷条件下计量误差的成因机制, 分析了三相四线制计量系统在电流不平衡、零序电流干扰等场景中的关键影响环节, 提出基于模型修正与算法补偿的优化方法, 并设计典型负荷条件下的仿真验证模型, 探讨误差补偿机制的实时性与准确性。研究结果可为智能电表设计与非对称负荷环境下的电能计量提供技术支撑。

【关键词】非对称负荷; 三相四线制; 电能计量

中图分类号: TM933.4

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.135

Optimization Method of Three-phase and Four-wire Power Metering in Asymmetric Load Scenarios

LI Xiang, HU Lin-hao

(State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Xingping Power Supply Branch)

【Abstract】In complex power consumption environments, asymmetric loads have become an important factor affecting the power measurement accuracy of three-phase four-wire system. This paper studies the genesis mechanism of measurement errors under asymmetric load conditions, analyzes the key impact links of the measurement systems of three-phase four-wire system in current imbalance, zero-sequence current interference and other scenarios, proposes an optimization method based on model correction and algorithm compensation, designs a simulation verification model under typical load conditions, and discusses the real-time performance and accuracy of the error compensation mechanism. The research results can provide technical support for smart meter design and power metering in an asymmetric load environment.

【Keywords】asymmetric load; three-phase four-wire system; power metering

1 引言

当配电系统用户负荷分布不均时,三相负载常处于非对称运行状态,影响三相四线制电能计量的准确性。传统电能表计量模型多依据理想对称条件设计,难以有效识别并修正由负荷不对称引发的误差,进而影响用户计费公平、用电公正性与系统能效管理水平。为提升计量精度与系统适应能力,需对非对称负荷下的误差形成机理、计量系统响应特性及优化手段开展系统分析,构建具备动态修正能力的计量模型,增强电能表在复杂负载场景下的技术稳定性与误差控制能力。

2 非对称负荷对计量准确性的影响

2.1 电流不平衡对计量误差的引入机制

三相电流不平衡使各相电流的幅值与相位角呈现显著差异。在电能表常用的功率计算模型中,有

功率通常表示为各相电压与电流的乘积、与对应相位余弦值的累加;不平衡状态下,若某一相或两相电流发生变化,会破坏该公式的量值对称性,进而引发误差累积。尤其在分时计量或基于电流采样的电能计算系统中,电流幅值偏差与相位畸变会对功率计算结果产生放大效应,导致电能表实际读数与真实负荷功耗出现偏差,且不同类型负载在不平衡状态下的误差方向存在差异^[1]。

2.2 零线电流变化对电能计量的干扰

在三相四线制系统中,负荷不对称运行时,零线会出现显著电流。此电流会干扰电能表的共模抑制能力,还会影响测量通道参考电位的稳定性,导致电压、电流信号在模拟前端转换过程中的误差增大。

部分低端电能表在设计时未接入零线独立电流检测装置,零线中频繁波动的电流会通过电磁耦合导致互感器磁饱和或偏磁,进而影响各相感应精度。不稳定的零线电流还可能引入间歇性尖峰信号,扰

动AD采样瞬时值,导致功率积分不稳定。不同负载条件下零线电流与各相电能读数偏差情况见表1。

3 三相四线制计量结构与关键环节

3.1 电能表计量路径中的非对称干扰点

三相四线制电能表的计量路径涵盖电流互感器、电压采样网络、模数转换电路、数字信号处理单元及功率计算模块。在负荷不对称条件下,电流互感器因各相负载不均增强偏磁现象,导致磁通密度异常,感应输出产生失真,引发采样电流幅值偏差^[2]。电压采样部分通常采用分压或隔离采样方式,在中性点漂移或零线电压波动影响下,参考电压基准发生偏移,采样精度降低。模数转换电路在零线频繁波动情况下产生共模扰动,使得采样通道对各相电流信号的瞬时值响应出现偏移误差。进入数字信号处理模块后,电压与电流数据在时间同步上的相位差增大,影响功率计算中有功分量与无功分量的准确提取,进而干扰能量积分累加过程。

3.2 电压电流采样方式的敏感点

电能表中电压电流采样方式分为直接采样与互感器采样两类,在负荷不平衡条件下,互感器采样受磁饱和和非线性影响更明显,导致采样信号与真实信号之间存在偏差。在高频脉冲负载存在的场景中,电流采样的响应延迟和电压采样的缓冲滤波易导致瞬时功率积分值偏差积累。不同采样方式下负荷不平衡条件下的功率偏差数据如表2。

3.3 零序分量对计量系统的影响路径

非对称负荷条件下,零序电压与零序电流会产

生额外叠加^[3]。零序电流在互感器内部形成附加磁通,导致输出波形偏斜,同时影响对应相感应电动势的线性特性。对于基于分时积分算法的能量计量系统,零序电压叠加会干扰时间同步基准,造成电流与电压间相位关系误判,进而影响功率计算中有功分量的准确提取。

部分计量芯片在建模阶段未纳入零序补偿机制,在高不平衡负载场景下会产生固定误差偏移。此外,零序分量通过耦合方式在多个路径上干扰计量系统,导致误差来源难以单一定位且具备累积特性;当非对称运行状态持续时间较长时,误差呈周期性浮动,且与负载变化规律相关。

4 计量优化方法设计与实现

4.1 平衡调整算法的引入与作用

平衡调整算法基于三相电流实时值的矢量平衡模型,通过内部逻辑运算将三相电流向量转换为等效对称输入,控制非对称结构在功率积分中的偏移误差。该算法核心公式为:

$$I'_x = I_x + \frac{1}{3}(I_y - I_x) + \frac{1}{3}(I_z - I_x) \tag{1}$$

式(1)中: I'_x 绕轴的转动惯量(原始或基准转动惯量值); I_y 绕轴的转动惯量; I_z 绕轴的转动惯量; $\frac{1}{3}(I_y - I_x)$ 表示由y轴分量修正到x轴的转动惯量差异; $\frac{1}{3}(I_z - I_x)$ 表示由z轴分量修正到x轴的转动惯量差异。虚拟平衡处理后,有功功率公式被修正为:

$$P = \sum_{x=A}^C U_x I'_x \cos(\phi_x) \tag{2}$$

式(2)中:P系统有功功率(Power),表示负载在

表1 不同负载条件下零线电流与各相电能读数偏差表

负载类型	A相电流/A	B相电流 /A	C相电流 /A	零线电流 /A	A相读数偏差 /Wh	B相读数偏差 /Wh	C相读数偏差 /Wh
典型照明不平衡	8	4	2	5.2	0.4	0.1	0.3
感性负载偏重A相	10	3	2	6.7	0.7	0.2	0.4
电焊机冲击性负载	12	2	1	8.1	1.2	0.3	0.5
三相平衡基准	5	5	5	0.1	0	0	0

表2 不同采样方式下负荷不平衡条件下的功率偏差数据表

采样方式	负荷类型	A相功率 /W	B相功率 /W	C相功率 /W	总功率理论值/W	总功率采样值/W	功率偏差 /W
互感器采样	A相高负荷	1000	300	200	1500	1572	72
互感器采样	C相低负荷	700	600	100	1400	1485	85
直接采样	A相高负荷	1000	300	200	1500	1514	14
直接采样	C相低负荷	700	600	100	1400	1407	7

电气系统中的实际功率输出或消耗。 $\sum_{x=A}^C$ 对三相电路A、B、C三个相位的求和。 U_x 第 x 相的电压有效值(Phase Voltage)。 I'_x 第 x 相电流的基波分量或有效值(Phase Current),用于功率计算。 ϕ_x 第 x 相电压与电流之间的相位差(Power Factor Angle)。 $\cos(\phi_x)$ 第 x 相的功率因数(Power Factor),表示电压与电流同相程度。电表在功率计算阶段使用 I'_x 替代实际电流值 I_x ,以减弱负荷不平衡对能量积分曲线的波动影响。修正后的功率输入更趋于稳态,积分过程中偏差呈周期收敛特性。该模型适用于典型长期不对称运行工况,适合嵌入在中低压配电中三相计量模块。平衡调整算法前后各项电能误差对比如图1。

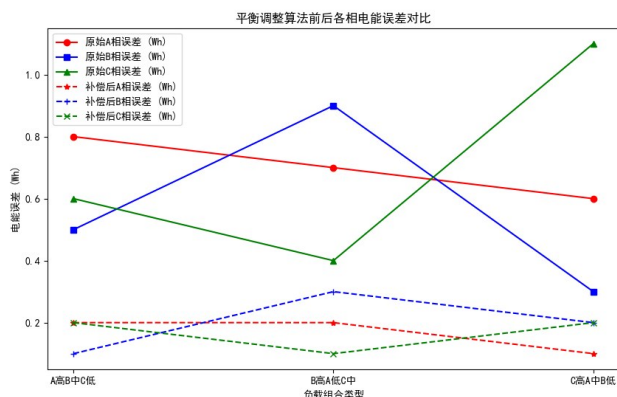


图1 平衡调整算法前后各相电能误差对比图

在典型非对称负荷结构中,未补偿状态下各相存在显著读数偏差且偏差集中在主负荷相。采用平衡调整算法后,各相误差幅度大幅收敛,偏差由原本的0.8Wh~1.1Wh压缩至0.1Wh~0.3Wh范围,表现出良好的对称调节能力。

4.2 电能表计量模型的修正方法

传统有功功率计算模型假设各相电压、电流相位稳定且波形理想,非对称负荷引入的零序分量、谐波及动态相位扰动未被有效识别,使得计算值与实际功耗之间产生误差。考虑电压电流幅值失真及相位非线性偏移,构建修正型功率模型,引入实时调整因子与相位修正项:

$$P' = \sum_{x=A}^C k_{ux} U_x \cdot k_{ix} I_x \cdot \cos(\phi_x + \delta_x) \quad (3)$$

式(3)中: P' 修正后有功功率; U_x 第 x 相电压有效值; I_x 第 x 相电流有效值; k_{ux} 电压修正系数; k_{ix} 电流修正系数; ϕ_x 电压与电流相位差; δ_x 相位修正角; $\sum_{x=A}^C$ 三相求和。该模型建立在同步采样技术与相位跟踪算法基础上,适配大幅度瞬时负荷变化,适用

于含感性元件、冲击型负载的典型现场场景。模型修正后的输出功率在负载切换过程中可保持连续响应状态,避免由原始算法中的相位滞后或波形不匹配引起的积分断层。

4.3 异常负荷下的实时误差补偿机制

非对称负荷条件下,三相电流幅值差异显著,突发性或周期性波动会引起电能计量误差快速累积,静态修正无法响应变化速率。实时误差补偿机制需具备快速识别不平衡程度并触发参数动态调整的能力。系统核心指标为不平衡因子 λ ,用于判断三相负载电流分布的偏离程度,并作为后续补偿模型的触发条件,表达式如式(4)所示。

$$\lambda = \frac{\max(|I_A - I_B|, |I_B - I_C|, |I_C - I_A|)}{I_{avg}} \quad (4)$$

式(4)中: λ 表示负载不平衡因子; I_A 、 I_B 、 I_C 分别为三相电流的有效值; $I_{avg} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}$ 是三相电流的平均值。该公式用于实时计算当前系统负荷的不平衡水平,在达到设定阈值时,启动电压电流增益调整和相位修正机制。此计算模型具备抗瞬时抖动能力,能适配采样周期内突变或缓变的负载波动行为,是误差补偿链路中的判定基础。

5 结语

研究表明,非对称负荷状态下,三相四线制电能表在电流采样、零线干扰与功率计算环节均易产生误差,采用电流虚拟平衡算法可显著降低各项能量偏差,基于修正系数的计量模型有效提升不平衡状态下的计算精度,实时误差补偿机制增强系统对负载突变的响应能力,后续可结合负荷识别与AI控制实现智能化动态计量控制。

参考文献

- [1] 李明珠, 孙苇庭, 张梦瑶. 三相四线有功电能表的几种误接线计量分析[J]. 电工技术, 2020 (22): 126-128.
- [2] 贾宏伟, 杨伊璇, 韩启银. 三相四线电能计量错误接线培训软件设计[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2020, 18 (1): 40-43.
- [3] 李振娜, 蔡堃, 林如兰. 三相四线电能表错误接线对电能计量影响分析[J]. 计量与测试技术, 2019, 46 (8): 69-72.