

三相智能电能表计量精度优化与异常工况检测关键技术研究

郭明伟

浙江瑞银电子有限公司 浙江 杭州 311100

【摘要】：三相智能电能表是电力系统中的关键电能计量及用电信息采集设备，其计量准确性及运行稳定性影响着电力交易的公平性和电网的安全稳定运行。在实际使用过程中，由于采样通道误差、温漂效应、谐波畸变等原因会导致电能表计量不准确；而失压、失流、相序错误、窃电等情况的发生会进一步导致计量失真乃至失败。本文分析了影响三相智能电能表计量精度的因素，提出采样通道优化、温度补偿、谐波抑制以及高精度功率计算算法等计量精度优化方案；分析了对失压失流、不平衡故障、自身故障及窃电的检测方法；并讨论了计量精度优化和异常检测的联合实现，还包括数码补偿及自测试一体化方案和异常情况的数据容错及恢复机制。研究结果对提高三相智能电能表的整体性能有参考意义和应用价值。

【关键词】：三相智能电能表；计量精度优化；异常工况检测

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.040

引言

在智能电网建设全面推进的今天，三相智能电能表作为大工商业用户、一般工商业用户以及配网关口的主要电能表计，在使用量上也越来越多。相较于传统的三相电能表，三相智能电能表除了能够进行准确的电量计量外，还可以实现远方通信、负荷控制、事件记录、告警等功能。是用电信息采集系统及电力营销管理的基础。

1 三相智能电能表计量精度影响因素及优化方法

1.1 电压电流采样通道误差分析与优化

采样通道是电能计量的第一道关口，它的误差直接反映在后面的全部计算之中。电压采样通道一般由电阻分压网络组成，误差主要来自分压电阻的初始精度不高（一般只有0.1%~1%）；电阻的温度系数使得分压比会随着温度而变化；电阻的老化造成长期漂移。电流采样通道则视量程及接入方式的不同，采用标准分流器（用于直通式）或标准电流互感器（用于经互感器接入式）。标准分流器的误差主要有电阻温漂及热电动势；而标准电流互感器有比差（变比误差）和角差（相位误差），而且轻载时误差较大。改进方案为：选用精度（0.05%）和温度系数（ $\pm 5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ）较高的阻值，或使用集成电阻数组来改善其一致性；对于CT来说，选取高磁导率、低损耗的铁心材质及优化绕制技术减少比差和角差；采样电路后面加入PGA增益调节模块，可根据采集到的数据大小进行自动增益控制，提高小信号下SNR；在PCB布局中要注意将模拟地与数字地分开，防止数字噪声耦合进采样通道上。

1.2 温度漂移对计量精度的影响及补偿技术

温变效应主要体现在：电阻分压网络的分压比随温度漂

移，一般金属膜电阻的温度系数为 $\pm 50\sim\pm 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ，对于0.5级电表已不可忽视；电流采样元件（分流器或者互感器）受到温度影响，锰铜分流器温度系数在 $\pm 40\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 左右，电流互感器的比差及角差也随温度变化。同时，计量芯片内参考电压源以及ADC的增益和偏置本身也有一定的温度漂移。针对温漂现象，常用的补偿方法主要有硬件补偿法和软件补偿法两大类。硬件补偿法是指利用具有低温度系数的元器件进行电路设计或者在采集信号通道内接入温度传感器如热敏电阻，并通过模拟电路来完成温度误差的在线补偿。软件补偿更为灵活和精确：在电表内部布置温度传感器（如DS18B20或芯片内置温度传感器），通过实验标定获得各温度点下的误差曲线，在运行过程中实时读取温度值，查表或插值计算补偿系数，对采样值和计量结果进行数字校正。实验表明，采用软件温度补偿后，全温度范围（ $-25^\circ\text{C}\sim+60^\circ\text{C}$ ）内的计量误差可从0.5%以上降低至0.1%以内。

1.3 谐波与间谐波条件下的计量误差抑制

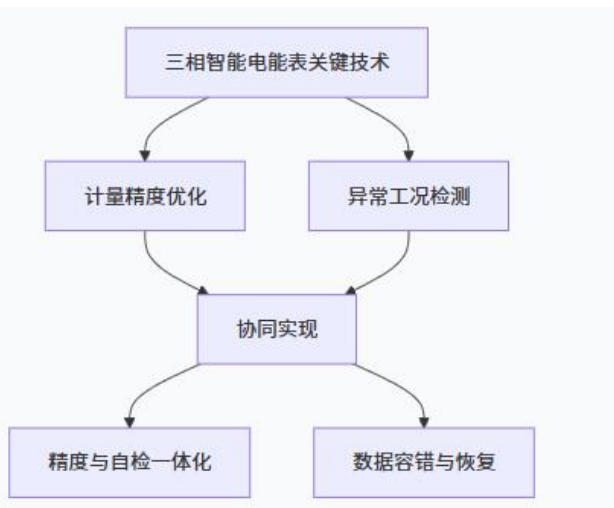
随着变频器、开关电源、电弧炉等大量非线性负荷设备在现代电力系统中的广泛应用，造成电压和电流波形畸变严重，谐波污染日益加剧。传统的基于基波的计量手段只能对频率为50Hz的基波功率进行测量，未考虑谐波功率的影响，在含有非线性负荷的情况下存在较大的误差；同时由于间谐波的存在，也使得传统的以一个周期为采样窗口的方法不再适用。放大了计量误差。针对谐波问题，优化的计量策略包括：采用宽带宽的采样通道（至少2kHz以上），保证高次谐波信号不被衰减；在ADC采样后，采用FFT分析获得各次谐波的幅值和相位，分别计算各次谐波的有功功率和无功功率，然后累加得到总功率（全波计量）。

对于间谐波,可采用非整周期采样结合窗函数(如 Hanning 窗)和插值 FFT 算法,减小频谱泄漏带来的误差。IEC 61000-4-7 推荐使用 10 周波(200ms)的矩形窗口来测量谐波分组,可以有效地消除间谐波对基波和谐波测量的影响;另外如果是以基波功率为结算依据,则可以通过数字滤波的方法将畸变波形中的基波分离出来,即所谓纯基波计量。

1.4 功率计算算法的精度提升策略

功率计算算法是计量芯片或 MCU 中执行的核心软件。传统的有功功率算法是将瞬时电压和瞬时电流相乘后在一个或多个周期内求平均。这一算法在理想正弦波条件下精度很高,但在实际应用中存在以下问题:采样不同步引起的周期截断误

差, ADC 量化噪声累积,以及有限字长效应导致的舍入误差。从硬件上使用同步采样技术,通过 PLL 跟踪电网频率,使得采样窗口一直与信号周期同步,消除了周期截断误差;在算法上采取过采样及求平均的方式,通过对采样点数进行增加,并取平均的方法减少量化噪声对系统的影响;采用更高精度的浮点计算代替定点运算(例如 32 或 64 bit 浮点),减小舍入误差。另外,针对无功功率的计算方法,传统上使用的基于移相法的无功有功检测方法,在存在谐波的情况下误差较大,可使用基于 Hilbert 变换或者基于 FFT 的相位解调方法。对于视在功率,应根据定义采用电压有效值与电流有效值的乘积,而非简单将有功和无功平方和开方,以避免在畸变波形下产生误差。



2 三相智能电能表异常工况类型及检测技术

2.1 失压、失流与断相异常检测

失压指电能表正常供电情况下某相或某几相电压低于设置门槛(一般取额定电压的 60%~80%)的现象。失压会使该相电能少计或不计,是一种比较常见的异常现象。失流指某相电流小于启动电流(一般取 0.1%~0.4%额定电流),但电压正常的状况,可能是由于用户的设备没有运行或者电流回路开路造成的,也可能是人为地将电流回路进行旁路偷电引起的。缺相即一相电压消失(小于 10%额定电压)。用电信息采集系统电能表实时监测每相电压的有效值以及电流的有效值,将电压值与失压阈值进行比较,在电压小于阈值的情况下并且满足一定的时间条件(例如 60s)的话就判断发生失压事件,并记录下失压开始的时间、失压累计时间及失压期间的电量;失流则要注意的是,在电压正常的前提下,电流长期(例如 30min)小于启动电流的情况下的失流。对于断相检测就更简单了,则是电压低至 10%的额定电压即判定为断相。为了防止误报,检测逻辑应该有去抖动以及延时确认的环节。

2.2 电压电流不平衡与相序错误检测

在三相供电系统中,电压或者电流的不平衡将降低系统的电能质量,增加线损,还可能影响到电能表的准确计量。不平衡度就是用负序分量与正序分量之比进行刻画的,在超过一定阈值(比如连续 2%,短时 4%)的时候,电能表应该产生事件并上报。电能表实时采样三相电压和三相电流瞬时值,采用对称分量法(或者简化为矢量)计算出正序分量、负序分量以及零序分量,并求得其不平衡度;相序错误即指三相电压或三相电流的相位顺序与规定的相位顺序(A-B-C 正序)不同。相序错误会造成电机反转、保护装置误动等后果。检查的方法比较简单,即测量三相电压过零点的先后次序,如果是 A-C-B 就是逆相序,记录相序错误事件;如果是三相三线电表还要对电压与电流之间接线是否正确进行判断(比如电流互感器极性反接)。

2.3 电能表自身故障检测

电能表自身故障包括时钟异常、存储器故障、电源异常、计量芯片故障等。时钟异常是较为常见的问题:电池欠压导致时钟停走或走时不准,直接影响需量计量和分时电价计费的准确性。检测方法为:电表内置时钟管理模块,定期监测电池电

压,当电池电压低于阈值时报警;同时可通过与主站对时或内置高精度晶振的比对,发现时钟偏差超过允许范围(如 ± 5 秒/天)时上报时钟异常事件。EEPROM或Flash损坏导致参数丢失或者事件记录出错。可以通过对EEPROM写入一个值然后读取并比较来判断是否损坏;每隔一段时间检查EEPROM中所存储的关键数值的CRC是否正确;利用EEPROM自带的ECC功能来检测及修复单比特错误。电源不稳,比如掉电、纹波太大等。可以通过电源看门狗及时发现。计量芯片内部故障(如ADC满偏、参考电压异常)可以利用计量芯片中的BIST功能或周期性地注入测试激励来发现。

2.4 外部攻击与窃电行为检测

窃电对供电企业的利益造成很大的损失,并且手段越来越多样、隐蔽性更强。常用的有强磁干扰(在电流互感器或者分流器附近加一个强磁场让互感器饱和或分流器输出失真)、高频干扰(在电压输入端加入一个高频信号干扰计量芯片)、电流旁路(在电表外边并上一个支路分流)、电压窃电(将电压回路改接线使得电压变小)和零线电流法(利用三相电表没有采样零线的漏洞)。针对强磁干扰,可以在电表中内置磁传感器(比如霍尔元件或者磁簧开关),一旦检测到强磁场就马上报警并且记录事件。针对高频干扰,在输入端加电磁干扰滤波电路,并且计量芯片也要有抗混叠滤波的能力。针对电流旁路,则可以对三相电流进行矢量求和检查(应该等于0,如不能为零就可能旁路),或是比较火线和零线电流(对于单相用户)来确定;又或者用防拆开关检查表盖是否被非法开启,用加密通讯方式防止参数被更改等。近年来也有基于大数据分析的窃电检测技术,对用户的用电行为做离群点分析,找到疑似窃电用户后,再进行现场稽查确认。

3 计量精度优化与异常检测的协同实现

3.1 基于数字校正的精度与自检一体化设计

传统上精度优化和异常检测都是单独的功能块,在实现上虽然共享了采样数据和处理资源,但是可以实现协同集成。在数字校正精度及自检功能一体化设计中,基本思路是在电表处于正常工作的状态下,按照一定周期对采样通道注入由芯片内部产生的具有一定幅值和频率的已知测试信号,根据对本测试信号响应的结果,实时计算各采集通道之间的增益误差、零点偏移误差及相位误差,并实时修正校准系数值。这一过程既完

成了精度校正,又实现了对采样通道健康状态的自检——当校正系数超出正常范围时,表明采样通道可能存在故障(如电阻变质、互感器损坏等),触发异常报警。不增加额外硬件成本,利用已有ADC和数字处理资源;实现了实时在线校正,无需断电离线标定;将精度保持和故障检测融为一体,提高了系统的智能化程度。实际设计中需注意测试信号的注入不能影响正常计量,可采用时分复用方式在正常采样的间隙注入,或使用独立的低频测试信号与工频信号频分复用。

3.2 异常工况下的计量数据容错与恢复机制

在异常工况下,可能出现电能表不能正常计量的情况,此时应进行容错及恢复,尽量避免电量丢失,并确保数据完整。失压情况下容错处理:对于三相四线表来说,在某一相失压的情况下,如果另外两相正常,则可以根据正常的两相来推算出失压相的功率;对于三相三线表来说,可以采取跨相电量来估算。失流的情况比较类似,可以根据其他相电流估计一下。需要注意的是,容错估算的电量应该单独记录并加以标识,不用于正常结算,但是可以用于追补电量。对重要信息和事件均采取双备份的方式进行储存,即同一数据分别储存在两个不同的地方,在其中一处出现问题的情况下会自动到另一处调取;而对于计数的数据则采用增量备份的方式进行,每隔一个小时将当时的用电量作为一个快照储存起来,在某一时间段内数据丢失后可以通过前后两次时间点的用电量之差来估算出中间的用电量是多少。在通讯过程中如果出现了故障,电能表需在本地缓存未上送的数据,在通讯恢复后按时间先后顺序补发。

4 结论

针对影响三相智能电能表的关键技术点:计量精度优化以及异常工况检测这两方面的关键技术进行了一些探讨和研究,在计量精度优化部分,讨论了电压电流采样通道误差、温度漂移、谐波干扰、功率计算算法等对计量精度的影响因素并分别给出了相应的优化方法,包含高精度低温漂元器件选型、软件温度补偿、宽带宽采样及FFT谐波计量、高精度功率计算算法。针对异常情况检测,分析了掉压掉流缺相、电压电流不平衡及相序错误、电表内部故障以及外部攻击窃电等四种异常情况的检测原理和实现方式,并对计量准确度提升和异常情况检测相结合的方式进行了分析讨论,在此基础上提出了采用数字化补偿进行准确度提升的同时结合自我检测的设计方案,还有计量数据在非正常情况下的容错及恢复机制。

参考文献:

- [1] 石乐贤.三相智能电能表反向有功走字原因分析[J].农村电工,2023,31(01):49-50.
- [2] 谢梦楚.三相智能电能表设计优化及运行状态分析[D].郑州大学,
- [3] 吴章坤.智能电能表投产项目的进度管理——R公司三相智能电能表投产项目为例[J].科技创新与应用,2019,(35):195-196.