

通过开关电源输出电压和电流值 计算电能的可行性分析

Feasibility Analysis on Calculating Electrical Energy from Switch-Mode Power Supply Output Voltage and Current Value

张莹,杨鹏,郭欣,刘凯(中国联通北京分公司,北京 100032)

Zhang Ying, Yang Peng, Guo Xin, Liu Kai (China Unicom Beijing Branch, Beijing 100032, China)

摘要:

在不安装直流电能表的情况下,监控单元(SU)利用开关电源获取直流电压和直流电流值进行直流电能计算。通过直流电能计算公式,对可能影响直流电能计量精度的7种因素进行分析。结果显示,部分因素对于直流电能计量精度的影响是不可忽略的,在计算直流电能时,应严格控制这部分因素,确保计量精度。

关键词:

开关电源;电压值;电流值;计算电能

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.02.017

文章编号: 1007-3043(2026)02-0089-04

中图分类号: E968

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Without installing a DC energy meter, Supervision Unit(SU) uses a switch-mode power supply to obtain DC voltage and DC current values for DC energy calculation. By introducing the formula for calculating direct current energy, an analysis is conducted on seven factors that may affect the accuracy of direct current energy measurement. The results show that some factors can not be ignored in their impact on the accuracy of direct current energy measurement. When calculating direct current energy, these factors should be strictly controlled to ensure measurement accuracy.

Keywords:

Switch-mode power supply; Voltage value; Current value; Calculate electricity

引用格式:张莹,杨鹏,郭欣,等.通过开关电源输出电压和电流值计算电能的可行性分析[J].邮电设计技术,2026(2):89-92.

0 引言

信息通信行业电能监测、管理及计量体系是信息基础设施电能采集、监测、分析和应用的技术基础,是构筑行业“碳达峰”与“碳中和”标准计量体系的重要支撑。信息通信行业电能计量低压部分主要有AC220/380 V交流计量和DC48 V直流计量。目前各类交流计量表计设备的应用十分普遍,但是DC48 V直流计量表计设备相对偏少,大多数开关电源仅采集直流电压和直流电流,未进行计量。本文研究了利用开关电源采集的电压、电流值,使用SU通用处理器计算直流电能的可行性。

1 直流计量原理

直流电能计算方法通常采用时域积分法^[1],时域积分法又叫瞬时功率积分法,其数学表达式为:

$$W = \int_t^{t+T} P dt = \int_t^{t+T} u(t)i(t) dt \quad (1)$$

其中, W 为单位周期 T 内的瞬时电压、电流的积分电能值, P 为瞬时功率, $u(t)$ 为瞬时电压, $i(t)$ 为瞬时电流。 $u(t)$ 和 $i(t)$ 这2个参数并非恒稳不变的直流,其中会夹杂一定的交流分量。为直观分析,假定输入电压、电流为^[2]:

$$\begin{cases} u(t) = U_d + U_m \sin(\omega t) \\ i(t) = I_d + I_m \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

在实际的采样过程中,瞬时功率不是连续采样

收稿日期:2025-12-30

的,而是有采样间隔时间的。设置采样间隔时间为 Δt ,在单位采样周期 T 内进行采样,设置采样次数为 N ,用时域积分法进行计算求得的瞬时功率可以表示为:

$$P = \left[u(t_1)i(t_1) + u(t_2)i(t_2) + \dots + u(t_N)i(t_N) \right] \frac{1}{N} \quad (3)$$

单位采样周期内电能表达式为:

$$W = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(t_k)i(t_k)\Delta t \quad (4)$$

当 Δt 的值比较小,且 N 的值比较大时,时域积分法计量的电能便可以用式(4)表示。在理想情况下,当 Δt 无穷小、 N 无穷大时,可认为所计算出的电能为实际电能值,但在实际计量时不可能达到理想情况,所以得到的结果会存在一些误差。

2 影响计量精度的因素

结合式(4),影响直流计量精度的因素主要包括电压准确度 $u(t_k)$ 、电流准确度 $i(t_k)$ 、采样分辨率 Δt 、采样频率 N 以及其他因素,如交流分量、电流变化率、时钟准确度、硬件性能等。

下文将针对上述各因素对计量精度的影响进行具体分析。

2.1 电压准确度

在通信机房中,开关电源大多处于浮充状态,此时直流电压非常稳定,且根据《通信用高频开关电源系统》(YD/T 1058-2015)的要求^[3],系统稳压精度应优于 $\pm 1\%$ 。本文采集了5个厂家5个型号的开关电源电压数据,在浮充状态下,10 s的时间间隔内,最大跳变数据如表1所示。

表1 5个型号的开关电源电压数据

序号	型号	最大跳变/%	最大电压/V	最小电压/V
1	型号A	0.12	53.596 172	53.531 128
2	型号B	0.09	54.608 734	54.557 083
3	型号C	0.00	53.510	53.510
4	型号D	2.82	53.780 777	52.263 462
5	型号E	0.11	53.517 498	53.456 135

由表1可知,有一个厂家不满足行业标准,其余均优于行业标准要求。故在浮充期间,可以认为实际的电压误差小于 $\pm 0.5\%$,优于GB/T 33708-2017定义的2级表的要求^[4]。

2.2 电流准确度

开关电源直流电流一般通过分流器进行采集,电

流准确度主要受温度和模拟数字转换器(ADC)采样芯片的影响。

在实际情况中,机房内温度较为稳定,ADC采样芯片的精度无法改变。由于行业标准对电流的采集精度没有要求,此处暂且认为电流误差小于 $\pm 0.5\%$,优于GB/T 33708-2017定义的2级表的要求。

2.3 负载变化率与数据采集频率

SU采用轮询的方式与开关电源的数据进行交互,不同SU厂家、不同的开关电源,轮询一遍数据的时长从几百毫秒到几秒钟不同。

机房的负荷是相对稳定的,但是也存在一定变化率。假定变化率为 $\pm 2\%$ (GB/T 33708定义的2级表)是可接受的极限,在产生 $\pm 2\%$ 的负载变化率时,SU必须要有一次采样,即SU的采样周期应该小于 $\pm 2\%$ 负载变化率周期,否则负荷变化无法实时体现在采集的数据上,导致电能计量失准。

由于条件所限,作者未能采集到机房分立开关电源的负荷曲线,仅采集到2台综合接入局的组合式开关电源的负荷曲线。负荷频繁变化的开关电源如图1所示,开关电源直流电流有效值为15.4 A,峰—峰值为63.41 A,其电流波动较大,最大变化率为290%,绝大多数的变化率都超过了30%,远超过 $\pm 2\%$ 的变化率(GB/T 33708定义的2级表)。同时,在100 ms内,变化率超过 $\pm 2\%$ 的次数超过30次,故其变化周期小于3 ms。由于SU的电压电流数据采集周期通常都是秒级的,远大于此处3 ms的变化周期,故对于此类电压波动超 $\pm 2\%$,同时波动周期小于SU的电压数据采集周期的开关电源来说,这是第一重误差。

负荷相对平稳的开关电源如图2所示,开关电源直流电流有效值为49 A,峰—峰值为6.79 A,其电流波动较小,最大变化率为6.9%,但绝大多数的变化率都未超过 $\pm 2\%$ (GB/T 33708定义的2级表)。在SU的采样周期内,该开关电源负荷相对平稳,可以忽略负载变化率与数据采集频率对计量精度的影响。

2.4 交流分量

开关电源在根据式(2)计算电压有效值和电流有效值时,未滤除交流分量,因此计算得出的电压电流有效值与式(3)中直接采样得到的实时值存在偏差,导致计算得出的直流功率与实际功率数值存在偏差。

按照《通信用高频开关电源系统》(YD/T 1058-2015)的要求,系统直流输出端在0~20 MHz频带内的峰—峰值杂音电压应不大于200 mV,因此交流分量和

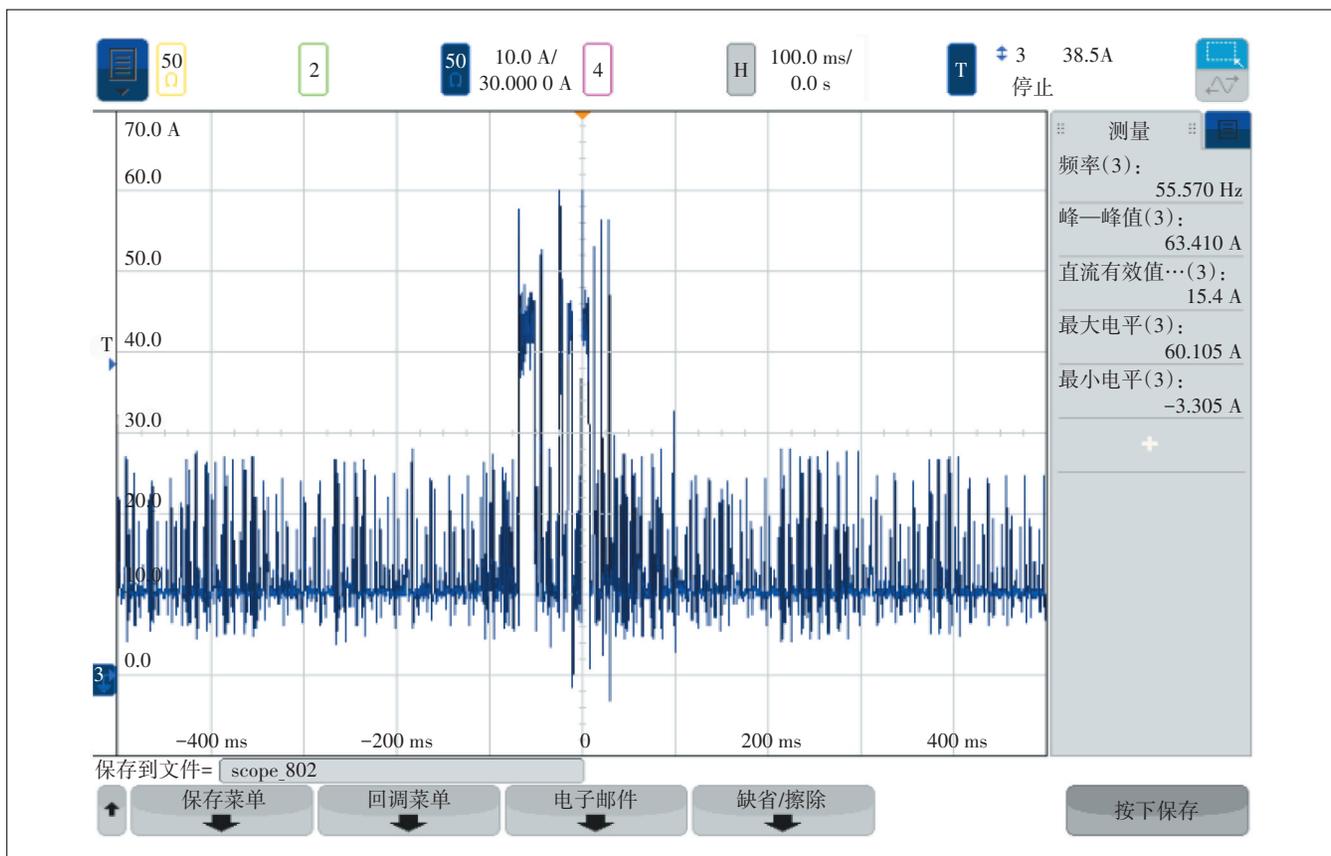


图1 负荷频繁变化的开关电源

高次谐波是无法避免的。

显然,通过开关电源采集的电压、电流忽略了交流分量和谐波成分的影响,这引入了第二重误差。同时,交流分量还会带来频率不同步、相位偏差等影响因素,进一步加大了计量误差。

2.5 算法影响

不同算法对直流计量也存在一定影响。直流计量可以采用矩形积分算法和梯形积分算法。矩形积分算法的基本原理是将一段时间内的功率曲线划分为多个矩形,用多个矩形的面积和来等效功率对时间的积分结果。由于直流电与交流电不同,它不具备周期性,矩形积分产生的误差可能无法抵消。梯形积分算法的基本原理是将一段时间内的功率曲线划分为多个梯形,用多个梯形的面积和来等效功率对时间的积分结果^[5]。已有的研究表明,不同计量算法会影响直流计量误差,梯形积分法的准确度优于矩形积分法,尤其是当电表处在动态计量条件时,使用该算法计量的优势会更明显(见图3)^[6]。

2.6 时钟准确度

长期以来,动环监控系统均采用SU上报数据,中心平台解析的方式,大多数动环监控系统以平台接收到的系统时间为准,故SU对时钟准确度要求不高,其误差远远大于电能表要求的 $\leq \pm 0.5$ s/24 h,部分SU每天的时钟偏差可达十几甚至几十分钟。

另外,SU通常采用CR2032纽扣电池,其寿命一般为2~3年,而电能表通常采用锂亚电池,额定容量大于1 200 mAh,可以维持内部时钟累计工作时间5年以上。相比之下,电能表的时钟可靠性更高。在纽扣电池寿命期之外,一旦SU设备掉电,时钟可能会恢复到过去的某个时刻,这会导致日历错误,从而影响电能计量,进一步影响月度用电量统计。这引入了第三重误差。

2.7 硬件性能影响

直流电能表的MCU通常采用32位Cortex-M0以上内核,其主频一般在20 MHz以上,配合高速ADC可以满足GB/T 33708-2017定义的2级表计量硬件需求。

当前,多数动环监控主机使用的处理器的主频均在400 MHz左右,处理器的算法处理能力可以满足计

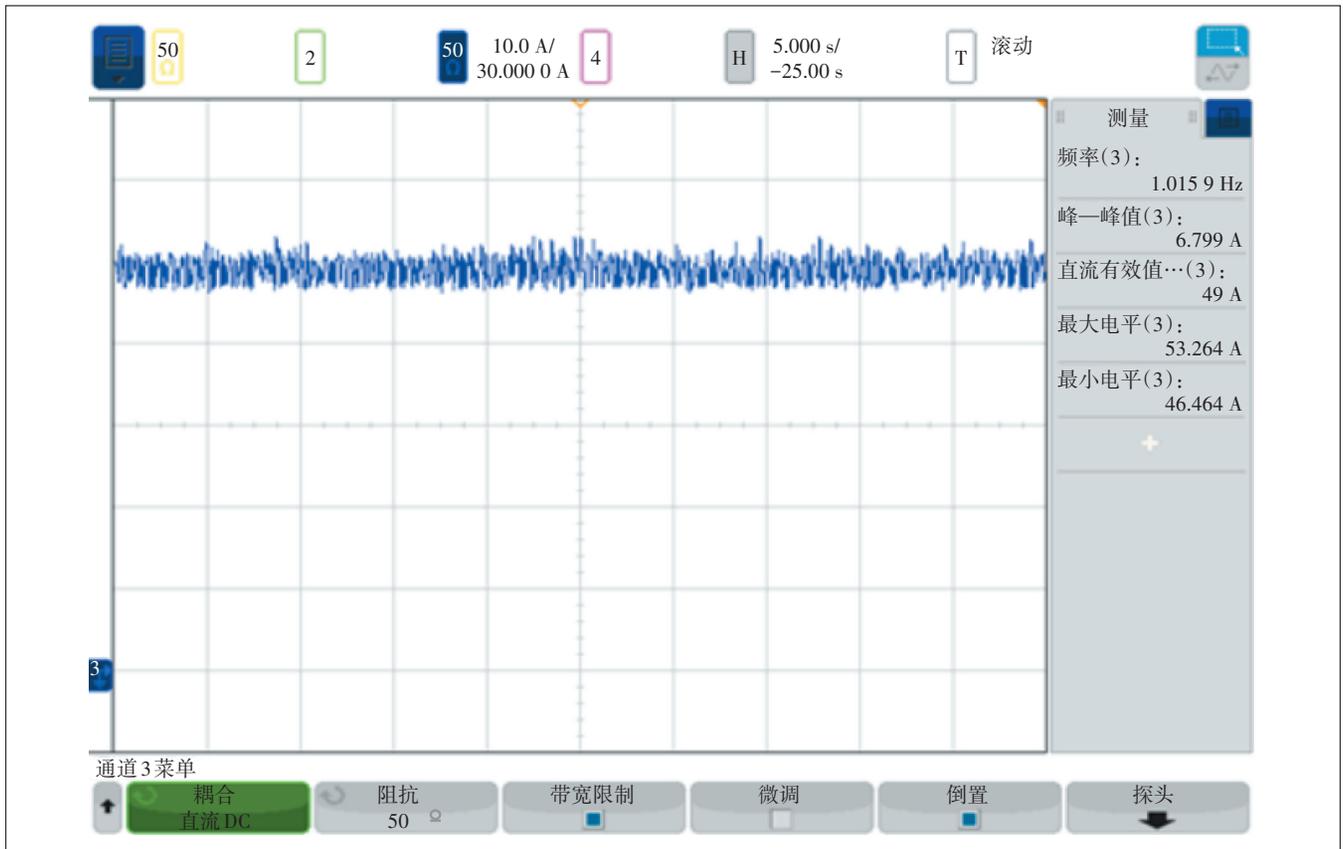


图2 负荷相对平稳的开关电源

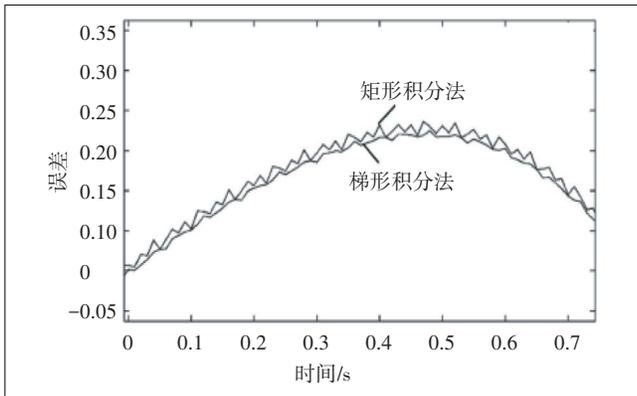


图3 不同积分法的计量误差影响的仿真结果

量算法的要求。

3 结论

本文以直流计量原理为基础,分析了通过开关电源采集电压电流计算电能的各种影响因素以及影响量,其中部分影响因素是不可忽略的,部分影响因素具备不确定性。同时,直流电能计量是一项复杂且专业的技术,影响计量精度的因素较多,且各因素之间

存在关联。综上可知,通过开关电源输出电压和电流值计算电能的可行性较低。

参考文献:

- [1] 魏豪. 直流充电桩直流表计量误差分析及计量精度提升方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
- [2] 宋晓林,马焯,孙刚,等. 复杂工况下直流电能计量的算法影响及误差分析[J]. 电测与仪表,2023,60(5):180-185,200.
- [3] 中华人民共和国工业和信息化部. 通信用高频开关电源系统: YD/T 1058-2015[S]. 北京:人民邮电出版社,2015.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 静止式直流电能表:GB/T 33708-2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [5] 李建强,朱德省,张健辉. 适用于光伏发电系统的直流电能计量算法[J]. 电测与仪表,2012,49(增刊1):75-79.
- [6] 尤子龙,徐璟,张丛余,等. 基于小波消噪法的电动汽车直流充电电能计量算法优化[J]. 浙江电力,2019,38(12):15-19.

作者简介:

张莹,高级工程师,主要从事双碳及基础设施运维管理工作;杨鹏,高级工程师,主要从事双碳及基础设施运维管理工作;郭欣,经济师,主要从事双碳及基础设施运维管理工作;刘凯,高级工程师,主要从事通信数字化运营工作。