

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104051

基于脉冲虚功率源的直流电能表误差计量研究

马 焱¹ 宋晓林¹ 孙 刚¹ 曹刘炎² 曾翔君²

(1. 国网陕西省电力有限公司营销服务中心(计量中心) 西安 710054; 2. 西安交通大学电气工程学院 西安 710049)

摘要:当前对直流电能表的检定忽略了功率的动态变化对计量结果的影响,缺少非理想直流电能计量标准。为此,提出一种使用脉冲虚功率源检定直流电能表的方法,该法通过将脉冲虚功率施加给被检表对比输出电能和被检表测得电能得到误差,且实现了输出电能的量值溯源,基于该法研制校验装置样机,通过检定和实验计算出了仪器输出电能的误差,并对市面上现有直流电能表进行测试,结合测试结果和算法仿真结果分析了动态变化功率对直流电能计量的影响。结果表明,脉冲虚功率源法能够用于建立直流电能计量标准,实现动态变化功率下直流电能表的检定。

关键词: 直流电能计量; 动态变化功率; 脉冲虚功率; 误差

中图分类号: TM933.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research on error measurement of DC electric energy meter based on pulse virtual power source

Ma Ye¹ Song Xiaolin¹ Sun Gang¹ Cao Liuyan² Zeng Xiangjun²

(1. State Grid Shaanxi Marketing Service Center (Metrology Center), Xi'an 710054, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The current verification of DC energy meters ignores the impact of dynamic changes in power on the measurement results, and lacks DC energy metering standards under non-ideal conditions. For this reason, proposed a method of using pulse virtual power source to calibrate DC electric energy meters. This method applies pulsed virtual power to the tested meter, and obtains the error by comparing the output electric energy with the electric energy measured by the tested meter. It realizes the traceability of the value of the output electric energy. Based on this method, developed a calibration device, and calculated the error of the instrument's output energy through verification and experiments. Using this device to test the existing DC electric energy meters on the market, and the influence of the dynamic change of power on the DC electric energy measurement is analyzed by combining the test results and the algorithm simulation results. The results show that the pulse virtual power source method can be used to establish DC electric energy metering standards and realize the verification of DC electric energy meters under dynamic power changes.

Keywords: DC energy metering; dynamically changing power; pulse virtual power; error

0 引言

随着新能源产业的快速发展,直流供用电作为新能源战略的重要组成部分,在越来越多的领域得到应用,直流电能准确计量的重要性也随之上升^[1-2]。在直流用电的实际工况中,受负载与电力电子设备影响,输出功率存在动态变化^[3-5],而现有直流电能表检定装置仅对理想直流工况进行测试,缺少非理想直流电能的计量标准,没有

全面检定直流电能表的能力,导致通过检定的直流电能表在实际工况下所测直流电能仍存在较大误差,甚至不同厂家电能表所测结果不一致。而直流充电的合理计费关系电力企业和用户的利益,对推动直流供用电相关行业发展具有十分重要的意义^[6]。

市场上现有直流电能表所使用的计量芯片其内算法结构基本相同,在原理上难以准确计量实际充电过程中存在动态变化的直流功率,导致直流电能表测量值与标准值相比存在较大误差^[7]。目前对直流电能表的检定普

遍采用标准源法,将标准源输出电能与被检表测得电能对比实现检定,检定过程中标准源输出量均为直流稳态电压电流,无法实现对变化功率与高频纹波的计量^[8-11],现场校验时常使用到的标准表法,所使用的标准表测得的结果也只是在理想工况下有更高精度^[12],不能作为非理想直流电能计量标准。而当前对改进直流电能表检定方法的相关研究较少,且多数未用于实际测量。文献[13]通过大量标准器件与高精度标准表的应用,设计了一个以标准表法为理论依据的校准系统,但该系统只针对纹波工况,且仅仅停留在理论分析阶段。文献[14]通过研究不同计量算法面对带有纹波的高功率直流计量时存在的误差,分析了纹波对计量的影响,但其仍使用直流标准表测量作为标准结果,未能解决溯源问题。相比之下,交流电能计量针对功率变化、纹波等非理想因素下的电能计量误差存在较多相关研究,但均不适用于直流电能计量^[15-20]。

针对当前直流电能表检定中缺少非理想直流电能计量标准这一问题,提出一种使用脉冲虚功率源检定直流电能表的方法,该法通过将脉冲虚功率施加给被检表对比输出电能和被检表测得电能得到误差,且实现了输出电能的量值溯源,可用于测试直流电能表面对非理想直流电能时的计量误差。基于该法研制一台直流电能表校验装置样机,设计计量实验对市面上不同厂家直流电能表面对动态变化功率的计量误差进行了测试,通过对比仿真算法与计量实验的误差结果,研究了动态变化功率对直流电能计量的影响,为改进直流电能计量算法提供了思路,通过检定和误差分析,验证了脉冲虚功率源法作为非理想直流电能计量标准的可行性,有助于建立完善的直流电能表检定方法,对推动直流供用电行业发展具有重要意义。

1 动态变化功率引起的直流电能计量误差分析

目前市场上使用的直流电能表,结构普遍为通过分压器分路器将电压电流信号变为小电压模拟信号,再由计量芯片将模拟输入量转为电能脉冲,计量芯片多为“A/D 采样—数据处理”的架构^[7],其内直流电能计量算法结构如图 1 所示。

其中 LPF1 截止频率 f_{c1} 较高,可滤除采样量化过程中产生的噪声,LPF2 截止频率 f_{c2} 较低,用于滤除功率信号中存在的交流分量,得到平均功率。

基于该算法原理,以 ADE7953 等市场上现有交直流混合计量芯片参数为参考,在 Simulink 中搭建图 1 所示算法结构的仿真模型,对该模型输入非理想直流电能以研究算法与电能计量误差关系,仿真模型中算法的关键

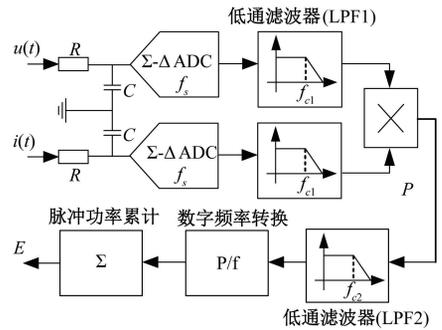


图 1 直流电能计量算法结构

Fig. 1 Structure of DC energy metering algorithm

参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型重要参数

| Table 1 Important parameters of simulation model | |
|--|---|
| AD 采样 | $f_s = 100 \text{ kHz}$ |
| LPF1 | $f_{c1} = 1.23 \text{ kHz}$ 32 阶巴特沃斯滤波器 |
| LPF2 | $f_{c2} = 3 \text{ Hz}$ 8 阶巴特沃斯滤波器 |

超级电容典型充电曲线中的恒流区波形如图 2 所示,对该算法模型输入连续变化功率,研究连续变化功率累计电能计量误差和算法的关系。

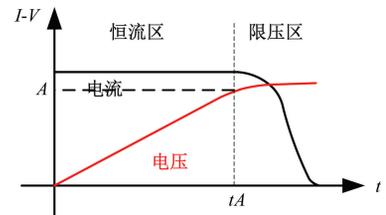


图 2 超级电容器充电曲线^[7]

Fig. 2 Super capacitor charging curve

控制仿真算法模型中输入电压信号幅值随时间从 0 到 A 线性增大,输入电流信号为稳态直流,设功率变化速率 α 为电压从 0~ A 所用时间 t_A 的倒数。改变功率变化速率,将输入电压电流信号累计电能作为标准值,则对比 0 到 t_A 期间算法模型电能测量值与输入电能标准值即可得动态变化功率下的电能计量误差 μ ,改变 LPF2 的截止频率 f_{c2} 进行重复计算,结果如图 3 所示。

可见,当电能计量芯片对连续变化功率进行计量时,产生的电能计量误差受功率变化速率和 LPF2 截止频率 f_{c2} 的影响,过低的 LPF2 截止频率容易产生了较大的计量误差。

输入含纹波的直流脉动电压电流,模拟整流性负载或电力电子开关在实际工况下的影响。在不同纹波频率下记录算法模型的电能测量值,并与仿真模型输入信号累计电能这一标准值相比较,当输出功率中纹波分量为

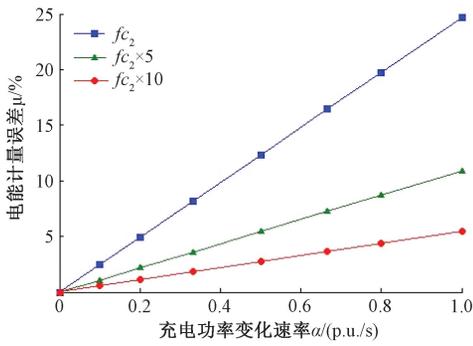


图 3 连续变化功率输入下仿真模型计量误差
Fig. 3 Simulation model measurement error under continuously varying power input

$\gamma\%$ 时,选取 ADE7953 与 QS1211D 两块计量芯片中 LPF1 的参数,得到不同截止频率 f_{c1} 下电能计量误差 μ 如图 4 所示。

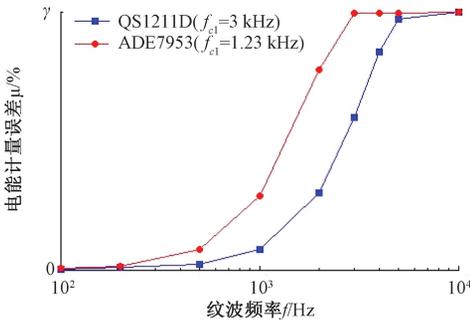


图 4 纹波功率输入下仿真模型计量误差
Fig. 4 Simulation model measurement error under ripple power input

结果表明,当电能计量芯片对含纹波的直流脉动电压和电流进行计量时,其内频率较高的交流分量被 LPF1 滤除,影响电能计量的准确度。

2 脉冲虚功率源法的检定原理

实际工况中直流电能表所计量波形存在各种非理想因素,本章提出一种使用脉冲虚功率源检定直流电能表的方法,并说明通过脉冲虚功率模拟动态变化功率的原理。

2.1 脉冲虚功率源法检定直流电能表原理

目前并没有针对功率动态变化、整流性负载等非理想情况下的直流电能表的检定规程,其主要原因是无法建立计量标准。因此本文提出采用脉冲虚功率源来建立非理想直流电能的计量标准,通过将该标准与电能表的测量结果相比较,可得被测电能表在受非理想因素影响时的计量误差。

脉冲虚功率源的核心是采用动作时间很短的半导体功率开关对稳定的电压和电流源进行通断控制,输出脉冲虚拟功率,通过控制开关的变化使得施加到电能表上的虚拟功率产生变化,方法的主要原理如图 5 所示。

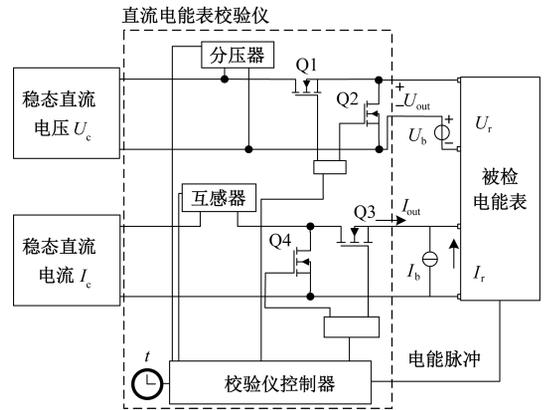


图 5 基于脉冲虚功率源法的直流电能表检定系统原理
Fig. 5 Functional block diagram of the DC electric energy meter verification system based on the pulse virtual power source method

图 5 中,电压和电流源均为稳定的直流量,其大小通过分压器和互感器监视并输出到控制器,Q1 和 Q2 是电压通道的开关,Q3 和 Q4 是电流通道的开关,通过控制器精确控制各开关,可以实现把稳态电压 U_c 、稳态电流 I_c 快速切换为脉冲电压 U_{out} 和脉冲电流 I_{out} ,且可分别与直流电压源 U_b 、直流电流源 I_b 叠加提高直流分量。电压电流通道的典型开关驱动信号及对应输出如图 6 所示。

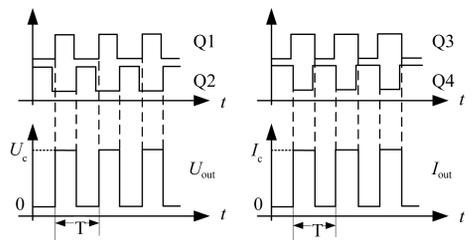


图 6 开关驱动信号及对应输出波形

Fig. 6 Waveform of switch drive signal and corresponding output

Q1、Q2 不同时导通,当 Q1 导通时 Q2 关断,输出电压快速上升至稳态电压源幅值,Q1 关断时,通过延时导通 Q2,可使输出电压快速下降至 0。Q3、Q4 不同时关断,当 Q3 导通时,延时关断 Q4 实现换流,输出电流快速上升至稳态电流源幅值,Q3 关断时,提前导通 Q4,避免电流源断路,同样通过换流实现输出电流快速下降至 0。

因此输出的脉冲虚功率幅值稳定且边沿陡峭,当与理想脉冲相比的误差可以忽略时,输出的电能 E 可由稳态电压 U_c 、稳态电流 I_c 、电压电流通路导通时间 t_{on} 计算

得出:

$$E = U_c \times I_c \times t_{on} \quad (1)$$

电压电流通路均导通的时间 t_{on} 可由控制器面板设置,故对稳态电压 U_c , 稳态电流 I_c 进行精确测量即可获得施加给电能表的精确的虚拟电能, 控制器接收电能表输出的电能脉冲可知电能表测得的电能累加量, 将电能表测得电能与标准电量比对即可知电能表的计量误差, 这是该方法区别于当前模拟实际电池充电特性进行电能表测量的方法的最独特的优点, 即脉冲虚拟功率源可以获得可溯源的电能累计量准确值, 可作为标准源法实现电能表计量误差的测量。

2.2 脉冲虚功率源模拟连续变化功率原理

脉冲虚功率源可通过改变输出脉冲功率占空比, 模拟功率的连续变化。以超级电容器恒流区波形为例, 控制仿真算法模型中输入电压信号幅值随时间从 $0.2A_U$ 增大到 $0.8A_U$, 输入电流信号为幅值为 A_I 的稳态直流, 得到输入功率与算法累计电能, 再将仿真算法模型中输入电压信号改为幅值为 A_U 的定频率脉冲, 控制占空比从 0.2 到 0.8 线性变化, 输入电流信号为稳态直流不变, 得到两者输入功率与算法累计电能如图 7 所示。

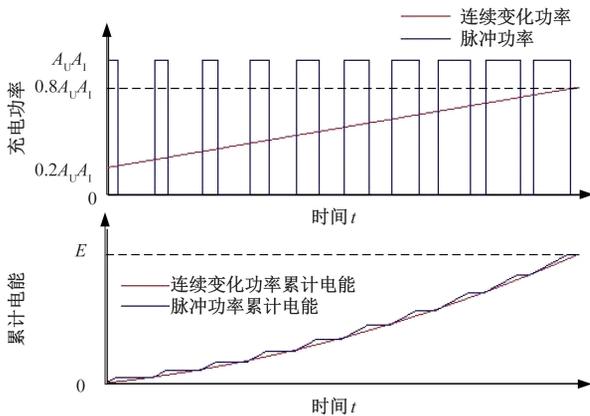


图 7 脉冲功率模拟连续变化功率波形
Fig. 7 Waveform of pulsed power simulation continuously changing power

可见对直流电能计量算法来说, 在保证输入电能一致的情况下, 输入占空比变化的脉冲功率和输入连续变化功率所得累计电能结果一致。因此, 通过测试直流电能表面对脉冲功率时的计量误差, 可分析变化功率对直流计量误差产生的影响。

2.3 脉冲虚功率源模拟纹波功率原理

在实际工况下, 当直流电是通过交直流变流设备整流获得时, 输出直流电并非恒稳直流, 受拓扑影响会叠加各次谐波构成脉动的直流电压, 而其中的交流脉动分量会产生相应功率, 如未被准确计量易导致电能计量超差。

直流电能表校验仪可输出频率、相位、占空比均一致的低幅值电压电流脉冲并与直流电压源 U_b 、直流电流源 I_b 叠加, 此时被检表所测波形 U_r 、 I_r 如图 8 所示。

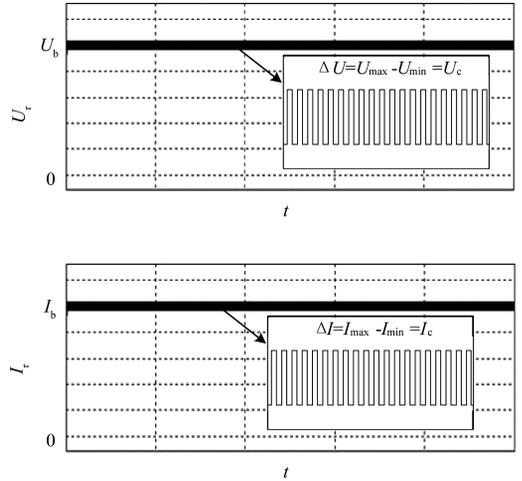


图 8 脉冲虚功率源模拟纹波工况波形
Fig. 8 Waveform of pulse virtual power source simulates ripple condition

该波形与整流性负载等工况中的脉动直流类似, 均包含直流分量、基波分量以及各次谐波, 即叠加了谐波的非理想直流波形。因此, 通过脉冲虚功率源法测试直流电能表面对该脉冲直流时的计量误差, 可分析纹波功率对直流计量产生的影响。

3 基于脉冲虚功率源法的直流电能表校验仪的样机研制与实验测试

为研究非理想波形对直流电能计量的影响, 基于脉冲虚功率源法研制一台直流电能表校验仪, 简要介绍校验仪结构设计, 并分析计算该仪器输出电能存在的误差。

3.1 直流电能表校验仪样机研制

直流电能表校验仪内部结构如图 9 所示, 该仪器采用 NI 公司 cRIO-9076 作为校验仪控制器, cRIO-9076 是一款适用于高级控制和监控应用的嵌入式控制器, 具有一个实时处理器和 FPGA, 提供了各种连接端口, 可实现控制, 采集和计算。工控机作为 cRIO 上层实现操作界面数据交互, cRIO 中 RT 层实现面板输入参数的处理与采集得到数据的计算, cRIO 中 FPGA 层时钟高达 40 MHz, 足以实现高速采集与开关的高精度控制。

控制器通过隔离驱动驱动电压电流开关阵列中的 MOS 管, 将输入稳态直流电压 U_c 和稳态直流电流 I_c 变为脉冲电压 U_{out} 和脉冲电流 I_{out} , 校验仪内部使用精密电阻分压和精密零磁通互感器将大电压、大电流信号变为 0~10 V 小电压信号, 由 NI 公司 16 位 AD 板卡 NI9220 采

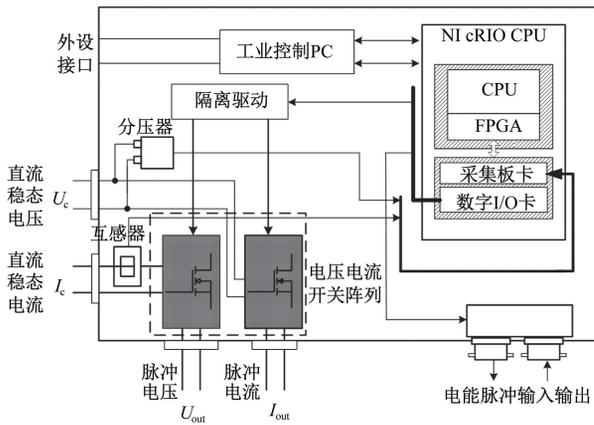


图 9 直流电能表校验仪结构

Fig. 9 Structure of DC electric energy meter calibrator

集给控制器用于计算。

该校验仪通过外接屏幕,显示当前稳态电压、电流值与功率,可选择模式输入频率、占空比和工作时间,即可控制电压脉冲和电流脉冲的输出,模拟不同工况下功率变化。控制器内部计算得到输出标准电能,与接收到的被检表电能脉冲比较即可得到被检电能表电能计量误差并显示,直流电能表校验仪机箱实物图如图 10(a)所示。为保证电压电流开关阵列切换大电压大电流的能力,电压通道开关采用 SiCMOS,电流通道开关采用多个大电流 MOS 并联,且考虑到 MOS 管内阻带来的发热问题,电流开关板采取在铝基板上焊接贴片 MOS 的方式制作,并辅以铜排通流,电流开关板实物图如图 10(b)所示,其驱动板通过上面的排针组固定在铝基板上方,铝基板下方安装散热片。

3.2 脉冲虚功率源输出电能误差分析

在脉冲虚功率源作为标准源实现电能表计量误差的测量前,需对输出脉冲功率累计电能的误差进行分析计算。

本文仪器经中国电科院检定,测得稳态下各项指标如表 2 所示。

表 2 电能表校验仪测量精度

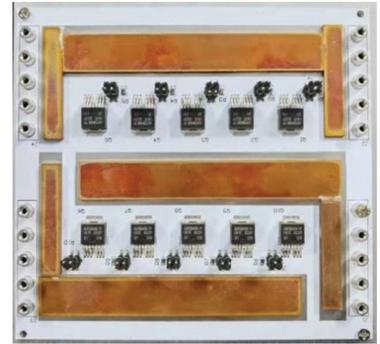
Table 2 Measurement accuracy of electric energy meter calibrator

| 被测量 | 量程 | 测量精度 |
|-----|-------------|--------|
| 电压 | 100~1 000 V | 0.01% |
| 电流 | 20~500 A | 0.02% |
| 电能 | | 0.025% |

易知脉冲虚功率源输出的电能为直流稳态电能与输出功率脉冲占空比的乘积,故仪器输出电能的误差 δ 受校验仪稳态电能测量误差 δ_e 和控制信号占空比误差 δ_d 的影响。其中, δ_e 如表 2 所示, δ_d 受仪器时钟分辨率的



(a) 校验仪机箱实物图
(a) Picture of the calibrator chassis



(b) 电流开关板实物图
(b) Picture of current switch board

图 10 直流电能表校验仪实物图

Fig. 10 Picture of DC electric energy meter calibrator

影响, cRIO 中 FPGA 时钟频率高达 40 MHz, 单个脉冲周期可能存在的最大误差为两个时钟周期, 因此当脉冲频率为 f_p 时, 受分辨率影响产生的误差小于 $5 \times 10^{-8} \times f_p$ 。

此外还需考虑开关非理想特性引起的的误差。该误差可以通过测量开关动态过程的上升、下降和建立时间, 设计合适的最大脉冲频率来进行控制, 以图 11 所示电压电流脉冲及其边沿的实测波形为例说明这部分误差的计算。

电压电流脉冲波形的边沿均可视为梯形与振荡两部分误差叠加, 通过波形在稳态值的 10%~90% 变化花费的上升、下降时间可计算出梯形波与理想脉冲的相对误差 δ_1 , 再将实际波形与梯形对比, 计算振荡部分的相对误差 δ_2 。

图 11(b) 和 (d) 设脉冲波形上升时间为 t_r , 下降时间为 t_d , 当脉冲频率为 f_p 时, 可知单个周期梯形波与理想脉冲的相对误差为:

$$\delta_1 = \frac{1}{2} \times \frac{5}{4} \times (t_d + t_r) \times f_p \quad (2)$$

振荡产生的误差可以由实际脉冲波形与梯形对比的最大偏差和振荡时间计算。图 11(b) 和 (d) 设上升沿和下降沿的振荡时间 ($\pm 2\%$) 分别为 t_{rs} 和 t_{ds} , 最大偏差分别为 δA_r 和 δA_d , 可知振荡产生的误差:

$$\delta_2 < (t_{rs} \times \delta A_r + t_{ds} \times \delta A_d) \times f_p \quad (3)$$

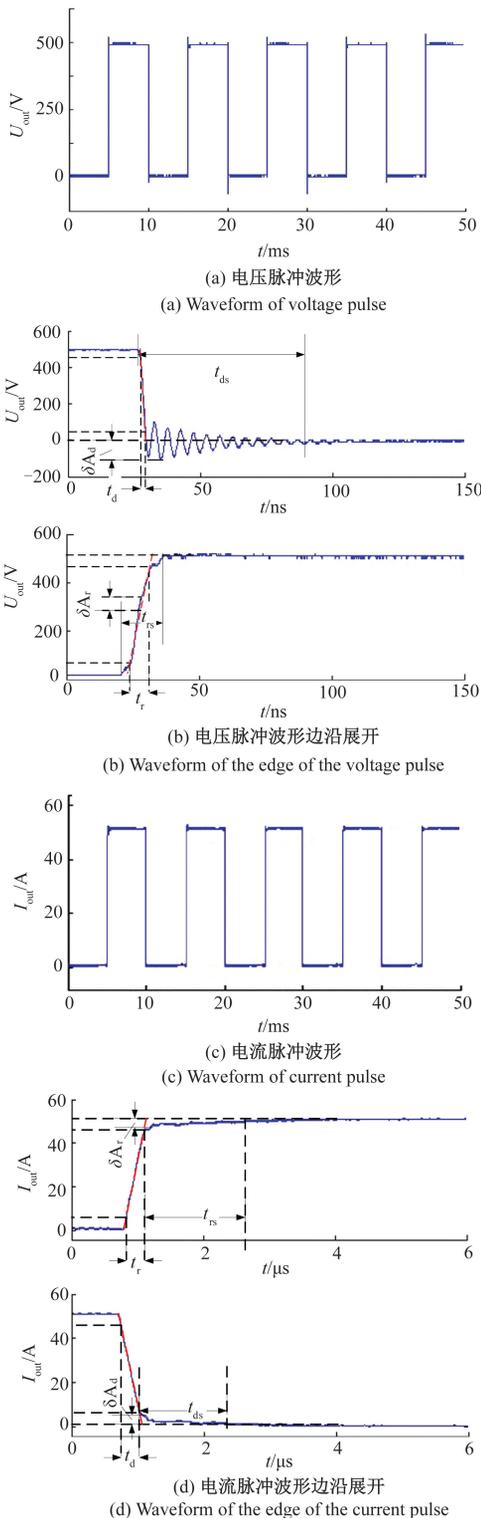


图 11 脉冲虚功率源输出电压电流脉冲波形

Fig. 11 Waveform of the voltage and current pulses output by pulse virtual power source

定义实际脉冲波形积分与理想脉冲波形积分的比值为波形因子 Q , 实际脉冲波形积分与理想脉冲波形积分

的相对误差为 δ_Q , 可知:

$$\delta_Q = Q - 1 \leq \delta_1 + \delta_2 \quad (4)$$

综合仪器输出电能误差 δ 的其他两个组成成分 δ_E 和 δ_D , 可知输出电能误差 δ 可由误差传递公式计算:

$$\delta^2 = \delta_E^2 + \delta_D^2 + \delta_Q^2 \quad (5)$$

可见, 通过测量电压电流脉冲边沿波形, 可计算出当前脉冲频率下上升下降动态过程产生的电能误差范围。

3.3 脉冲虚功率源输出电能误差计算

仪器可选择 3 种脉冲功率输出模式, 以应对不同实验的需要, 模式 1 输出脉冲电压和稳态电流, 模式 2 输出脉冲电流和稳态电压, 模式 3 输出脉冲电压和脉冲电流。脉冲虚功率源模拟连续变化功率时可选择模式 1, 此时只需计算脉冲电压波形的 δ_Q 。而模拟纹波功率时需选择模式 3, 输出脉冲电压和脉冲电流, 由乘积误差传递公式对脉冲电压波形和脉冲电流波形的 δ_Q 进行合成。

对两种实验各选取一组电压电流脉冲波形进行测量, 用以计算输出电能误差, 脉冲波形边沿各项数据如表 3 所示。

表 3 脉冲虚功率源输出脉冲边沿测量结果

Table 3 Measurement result of pulse edge output by pulse virtual power source

| 实验类型 | 上升/下降 时间/ns | 振荡时间/ ns | 最大偏差/% |
|-------------------------------------|------------------|-------------|--------|
| | | | |
| | U 下降沿 1.9 | 50.4 | 21.6 |
| 纹波功率模拟 ($U_c = 100 \text{ V}$) | U 上升沿 7.2 | 14.3 | 10.1 |
| | U 下降沿 1.8 | 52.2 | 18.5 |
| ($I_c = 20 \text{ A}$) | I 上升沿 362.5 | 1 425 | 7.9 |
| | I 下降沿 390.5 | 1 402 | 7.9 |

仪器输出脉冲频率可调范围为 10 Hz ~ 10 kHz, 代入表内数据到式 (2) ~ (5), 计算可得两种脉冲功率输出模式在不同脉冲频率 f_p 下输出电能的误差如表 4 所示。

表 4 脉冲虚功率源输出电能误差

Table 4 Error of electric energy output by pulse virtual power source

| f_p/Hz | 连续变化功率输出 电能误差(模式 1) | 纹波功率输出电能 误差(模式 3) |
|-----------------|------------------------|------------------------|
| | 10 | 2.500×10^{-4} |
| 50 | 2.500×10^{-4} | 2.525×10^{-4} |
| 100 | 2.501×10^{-4} | 2.599×10^{-4} |
| 500 | 2.514×10^{-4} | 4.349×10^{-4} |
| 1 000 | 2.556×10^{-4} | 7.544×10^{-4} |
| 5 000 | | 3.568×10^{-3} |
| 10 000 | | 7.122×10^{-3} |

可见脉冲虚功率源输出连续变化功率时, 在 10 Hz ~ 1 kHz 任意选择输出电压脉冲频率, 输出电能的误差 δ 不超过 2.556×10^{-4} 。

在脉冲虚功率源输出纹波功率时, 当输出电压电流

脉冲频率在 10 Hz~10 kHz 这一范围内时,输出电能的误差 δ 不超过 7.122×10^{-3} 。

此外,由式(2)可知,梯形相对理想阶跃的误差 δ_1 可被准确计量,若需要实际输出电能误差更小,可考虑通过精确的测量计算修正这部分误差,得到精度更高的实验结果。

4 脉冲虚功率输入下直流电能表计量误差的仿真与实验

4.1 对连续变化功率计量的仿真与实验

现对当前市面上直流电能表面对连续变化功率时的计量误差进行研究,本实验选取 DJS566 和 DJZY102 两款相同规格不同厂家的直流电能表作为被检表 A 和被检表 B,使用基于脉冲虚功率源法研制的直流电能表校验仪输出变占空比脉冲虚功率给被检电能表。当稳态电压为 500 V,稳态电流为 200 A 时,通过校验仪将稳态电压斩波为 100 Hz 的脉冲电压,在不同的占空比变化速率下,计数被检表输出电能脉冲换算其测量值,并与脉冲间隔内输出电能标准值相比得计量误差,被检表 A、被检表 B 和表 1 中的仿真模型面对同样的变化功率输入时产生的计量误差结果如图 12 所示。

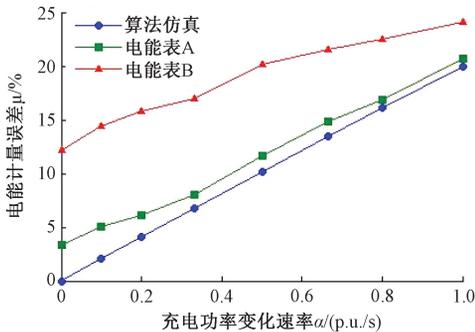


图 12 连续变化功率输入下的计量误差

Fig. 12 Measurement error under continuously varying power input

图 12 实验结果表明,当电能表对变化功率进行电能计量时,随着功率变化速率的上升,电能计量误差变大,且相同规格不同厂家的电能表 A 和电能表 B 在相同输入下产生的计量误差不同。

对比实验结果与仿真结果,发现实际情况下电能表面对连续变化功率时,计量误差与功率变化速率的正比关系与仿真基本一致,均受到计量算法中滤波器的影响产生了较大的计量误差。但面对 100 Hz 占空比不变的脉冲电压时,两块被检表仍存在误差,应是实际电能表算法中存在与仿真的电能表算法不同的结构,导致产生了额外的误差。

考虑仪器误差的影响,由表 4 可知,该实验中标准电能误差不超过 2.501×10^{-4} ,远低于实验或仿真测得的电能计量误差,对结果的影响可忽略不计。

4.2 对纹波功率计量的仿真与实验

对直流电能表面对纹波功率的计量误差进行研究,仍旧采用 DJS566 和 DJZY102 两款直流电能表作为被检表 A 和被检表 B,使用直流电能表校验仪输出低幅值电压电流脉冲给被检电能表。当稳态电压为 100 V,稳态电流为 10 A 时,通过校验仪将稳态电压、稳态电流均斩波为占空比为 0.5 的脉冲波形,与直流源叠加提高直流分量。控制输出脉冲的频率从 10~10 000 Hz 变化,计数被检表输出电能脉冲换算其测量值,并减去叠加直流源产生的电能,与脉冲间隔内输出电能标准值比较即可得计量误差。相同脉冲输入下被检表 A、被检表 B 和表 1 的仿真模型各自产生的计量误差结果如图 13 所示。

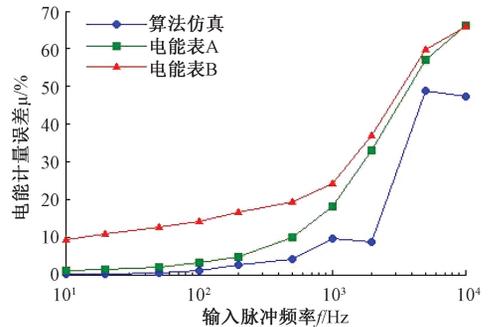


图 13 纹波功率输入下的计量误差

Fig. 13 Measurement error under ripple power input

图 13 实验结果表明,直流脉动中的交流分量在频率过高时会被低通滤波器滤除,交流分量产生的功率无法被计量,造成电能计量结果超差。

直流电能计量算法仿真模型所设计量带宽为 3 kHz,可见,脉冲频率达到该频率时因脉冲的基波分量也被滤除,电能计量误差大幅上升至近 50%。两款直流电能表的电能计量误差上升趋势与仿真基本相同。不同之处为滤波器截止频率附近的计量误差变化较缓,推测是因为实际电能表算法中滤波器阶数较低,另一不同之处为实际情况下电能表计量误差较之仿真计量误差更大,高频下甚至出现误差超过 50% 的情况,超出了理论上交流分量均被滤除时的误差值,这与连续变化功率实验中观察到的情况类似,应是实际电能表中存在的其他结构产生了误差,与采样通道上滤波器产生的误差叠加所致。

考虑仪器误差的影响,由表 4 可知,该实验中标准电能的误差随频率变化,但最大不超过 7.122×10^{-3} ,始终远低于实验或仿真测得的电能计量误差,对结果的影响可忽略不计。

5 结 论

直流供用电在实际工况下的功率存在动态变化,并非理想的稳态直流,而当前直流电能表的检定并未建立非理想直流电能的计量标准,无法全面评估直流电能表电能计量的性能,这导致了市面上直流电能表在实际工况下测量值相比标准值存在较大误差,且不同厂家直流电能表所测结果往往并不一致,影响了直流用电的合理计费。本文提出了一种使用脉冲虚功率源检定直流电能表的方法,该法实现了输出电能的量值溯源,建立了功率动态变化的非理想直流电能的计量标准,解决了直流电能表面对动态变化功率所产生计量误差的检定问题。基于该法研制一台直流电能表校验装置样机,且通过实验和理论分析证明仪器输出电能精度足够,对市面上不同厂家直流电能表的电能计量误差进行测试,结果发现,当前市场上直流电能表面对动态变化功率的确存在不可忽视的电能计量误差,且在具体误差量上,即使规格相同,不同厂家电能表的测量结果仍存在较大差异,该实验验证了基于脉冲虚功率源建立非理想直流电能计量标准的可行性和重要性,为改进直流电能计量算法提供了思路,对于建立完善的直流电能表检定方法从而推动直流供用电行业发展具有重要意义。

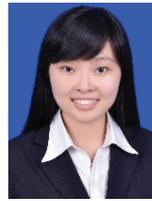
参考文献

- [1] 韩霄汉,胡小寒,姚力,等. 竞争性电力市场背景下电能计量发展趋势的思考[J]. 浙江电力,2017,36(3):30-33.
HAN X H, HU X H, YAO L, et al. Reflection on development trend of electric energy metering in competitive electricity market [J]. Zhejiang Electric Power,2017,36(3):30-33.
- [2] 张昀,黄艳,赵志华,等. 电动汽车充电站用直流电能表产品标准和检测技术研究[J]. 电测与仪表,2012,49(S1):68-74.
ZHANG Y, HUANG Y, ZHAO ZH H, et al. Standards and test research of the DC electric energy meters used in the electric vehicle charging stations [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2012,49(S1):68-74.
- [3] 李恺,王海元,杨茂涛. 交流调制型直流电能表的纹波影响仿真和实测[J]. 中国测试,2018,44(4):147-152.
LI K, WANG H Y, YANG M T. Ripple effects simulation and test of AC modulated DC electric energy meter[J]. China Measurement & Test,2018,44(4):147-152.
- [4] 林鑫,赵伟,黄瑾豪,等. 直流纹波对直流电能表的影响分析[J]. 广东电力,2015,28(4):91-94,120.

- LIN X, ZHAO W, HUANG C H, et al. Analysis in influence of direct current ripple wave on direct current electric energy meter [J]. Guangdong Electric Power, 2015,28(4):91-94,120.
- [5] 姚力,章江铭,倪琳娜,等. DC/AC 工况下的直流电能计量误差分析[J]. 浙江电力,2020,39(7):55-59.
YAO L, ZHANG J M, NI L N, et al. Error analysis of DC energy metering under DC/AC operating condition [J]. Zhejiang Electric Power, 2020,39(7):55-59.
- [6] 陈良亮,张浩,倪峰,等. 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):11-17.
CHEN L L, ZHANG H, NI F, et al. Present situation and development trend for construction of electric vehicle energy supply infrastructure [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(14):11-17.
- [7] 宋晓林,马烨,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/OL]. 电测与仪表:1-8 [2021-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20201221.1726.002.html>.
SONG X L, MA Y, SUN G, et al. Algorithm influence and error analysis of DC power measurement under complex working conditions [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation. 1-8 [2021-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20201221.1726.002.html>.
- [8] 徐子立,李前,胡浩亮,等. 电动汽车充电桩直流电能表检定装置的研制[J]. 电测与仪表,2011,48(12):65-69.
XU Z L, LI Q, HU H L, et al. Research on verification equipment of DC electrical energy meter for electric vehicle charger [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2011,48(12):65-69.
- [9] 王幸,袁辉,王林,等. 直流电能表校验技术研究[J]. 电子设计工程,2015,23(8):125-128.
WANG X, YUAN H, WANG L, et al. The research of DC electric energy meter calibration technology [J]. Electronic Design Engineering. 2015,23(8):125-128.
- [10] 白静芬,林繁涛,赵莎,等. 直流电能校准系统研制及不确定度评定[J]. 电测与仪表,2014,51(7):9-13.
BAI J F, LIN F T, ZHAO SH, et al. Development and uncertainty evaluation of calibrating system for DC energy meter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014,51(7):9-13.
- [11] 韩海安,程昱舒. 多表位直流电能表自动检定装置的研制[J]. 电气技术,2019,20(2):53-56,63.
HAN H AN, CHEN Y SH. Development of multi-epitope DC electric energy meter automatic verification device [J].

- Electrical Engineering, 2019, 20(2):53-56, 63.
- [12] 郭晓丹, 李晓辉, 李磊, 等. 300 kW 非车载充电机现场检定系统的设计[J]. 电测与仪表, 2017, 54(8):123-128.
GUO X D, LI X H, LI L, et al. Design of on-site verification system for 300 kW off-board vehicle charger [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(8):123-128.
- [13] 肖涛, 周新华, 董艺维. 直流电能纹波影响试验装置校准[J]. 自动化仪表, 2019, 40(5):83-86.
XIAO T, ZHOU X H, DONG Y W. Calibration of the test equipment for DC power ripple impact [J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(5):83-86.
- [14] 宋鹏, 潘峰, 林国营, 等. 电动汽车充电纹波对直流电能计量影响分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(1):46-52.
SONG P, PAN F, LIN G Y, et al. Analysis of the influence of ripple on DC energymetering in EV charging [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(1):46-52.
- [15] WANG X W, CHEN J X, YUAN R M, et al. OOK power model based dynamic error testing for smart electricity meter [J]. Measurement Science and Technology, 2017, DOI:10.1088/1361-6501/aa5067.
- [16] 向世强, 唐求, 宋鹏, 等. 非线性负荷电能计量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4):181-186. XIANG S Q, TANG SH Q, TANG Q, SONG P, et al. Research on nonlinear load energy measurement method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(4):181-186.
- [17] 温和, 滕召胜, 胡晓光, 等. 谐波存在时的改进电能计量方法及应用[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1):157-162.
WEN H, TENG ZH SH, HU X G, et al. Improved electric power measurement method and its application while harmonic exists [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(1):157-162.
- [18] 张江安, 杨洪柏. 用于电能计量芯片的无功功率计量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2):188-194.
ZHANG J AN, YANG H B. Reactive power metering method for power metering chips [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2):188-194.
- [19] 卢世祥, 阙华坤, 林国营. 畸变信号下电能计量方法及硬件系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(10):102-105.
LU SH X, QUE H K, LIN G Y. Measurement method of electric energy and design of hardware system under distorted signal [J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(10):102-105.
- [20] 陈垒, 赵伟, 肖勇, 等. 非整周期采样条件下有功电能计量的新算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4):861-869.
CHEN L, ZHAO W, XIAO Y, et al. New active electric energy measurement algorithm under non-integer-period sampling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4):861-869.

作者简介



马焱, 2012年于西安交通大学获得学士学位, 2015年于西安交通大学获得硕士学位, 现为国网陕西省电力公司营销服务中心(计量中心)工程师, 主要研究方向为电能计量标准技术。

E-mail: 379935474@qq.com

Ma Ye received her B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2012, M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2015. Now she is an engineer in State Grid Shaanxi Marketing Service Center (Metrology Center). Her main research interest includes standard of electric energy measurement.



曹刘炎(通信作者), 2018年于西安交通大学获得学士学位, 现为西安交通大学硕士研究生, 主要研究方向为仪器仪表技术与电能计量。

E-mail: caoliuyan@stu.xjtu.edu.cn

Cao Liuyan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include instrumentation technology and electric energy measurement.