

DOI: 10.7667/PSPC171875

## 统计线损数据准确性研究

唐登平<sup>1</sup>, 李俊<sup>1</sup>, 孟展<sup>2</sup>, 杨建华<sup>3</sup>, 汪应春<sup>1</sup>

(1. 国网湖北省电力有限公司计量中心, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 当前普遍采用统计线损考核线损管理水平, 但是缺乏统计线损的数据准确性的相关研究。为此, 分析了影响统计线损数据准确性的误差因素, 主要包括计量装置误差和计量装置配置差异。并在分析实际运行工况下的计量装置误差的基础上, 提出了关口计量误差合成方法。指出在计算短时统计线损时, 电量上传协议会显著影响统计线损准确性。结合线路实际参数和计量装置实负荷校验数据, 通过仿真计算验证了实际运行工况下现有关口计量装置配置方案会对统计线损的准确性有较大影响。

**关键词:** 统计线损; 关口计量; 计量误差; 误差合成; 电能计量装置

### Research on accuracy of statistical line losses

TANG Dengping<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, MENG Zhan<sup>2</sup>, YANG Jianhua<sup>3</sup>, WANG Yingchun<sup>1</sup>

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Measurement Centre, Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Central China Division of the State Grid Company, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Statistical line loss is widely used in line loss management, but relevant research on accuracy of statistical line losses is scarce. Therefore, this paper analyzes the error factors of statistical line losses accuracy, including measurement device error and difference of device configuration, and puts forward synthesis method of gateway energy measurement error on the basis of analyzing metering error on the actual operating conditions. Besides, energy upload protocol would have a great influence on statistical line loss when the time interval is small. Combined parameters of the line with the actual load verification data of metering device, it is verified that the existing gateway metering devices configuration scheme would have a great impact on the accuracy of statistical line loss under the actual operating conditions by simulation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFA0401703).

**Key words:** statistical line losses; gate metering; metering error; error synthesis; energy metering device

## 0 引言

线损率直接反映了线路规划设计、运行管理的水平, 是电网考核的一项重要经济指标<sup>[1]</sup>。随着电力系统精细化管理的推进, 线损管理工作愈发受到重视。统计线损作为考核线损管理水平的重要依据, 其准确性直接关系到电力企业和用电客户的经济利益。据国家电网公司测算, 线损率每下降1个百分点, 全国每年能减少电能损失70亿kWh<sup>[2]</sup>。如何提高统计线损的准确性已经成为电力企业和相关研究

人员关注的焦点。

关口计量装置的准确性直接关系到统计线损的准确性。但是当前对关口计量准确性的要求仅局限于计量装置个体, 对关口综合误差尚无任何要求。此外, 跨省输电线路两端的计量关口分属不同电网公司, 导致同一线路两端配置的计量装置存在差异, 导致统计线损出现误差。本文以湖北省某500kV跨省输电线路为例, 分析了其计量装置合成误差情况, 并着重分析了3/2接线方式的误差合成, 提出了若干关口计量装置配置建议。此外, 本文指出电量数据上传协议会显著影响统计线损数据准确性, 在计算短时统计线损时需要统计电量进行补偿。通过

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFA0401703)

理论仿真与现场检测数据结合验证了计量装置误差对统计线损的影响,从而提高统计线损数据准确性。

### 1 统计线损

在日常管理工作中,通常将线损分为理论线损和统计线损两部分<sup>[3-4]</sup>。理论线损是指各省、地区供电部门对其所属输、变、配电设备根据其设备参数和实测运行数据计算得出的线损率,其计算公式为<sup>[5]</sup>

$$\text{理论线损率} = \frac{\text{本网理论线损电量}}{\text{计算供电量}} \times 100\% \quad (1)$$

目前已有成熟的理论线损电量计算方法,主要包括均方根电流法、平均电流法、最大电流法、最大负荷损失小时法等方法<sup>[5-9]</sup>,根据线路参数和运行数据即可较为准确地计算出一定工况下线路的理论线损。

统计线损是指根据统计电量数据得出的实际运行线损,其中包含了理论线损、计量关口误差以及电量上传误差。目前计算输电线路统计线损的主要依据为线路两侧计量关口上传至主站的电量数据<sup>[10]</sup>,计算公式为

$$\rho = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\rho$  代表某一时段的统计线损;  $w_1$ 、 $w_2$  分别为该时间段内电能输送端和接收端上传的电能。

### 2 计量装置误差合成

计量关口主要由电压互感器、电流互感器、关口电能表、二次回路和电能量采集终端组成<sup>[11]</sup>,关口电能表接收互感器输出的二次电压电流信号计算电能,电能量采集终端定时采集电能表内的电能数据并上传至主站。以某 500 kV 跨省输电线路计量关口为例,其结构如图 1 所示。

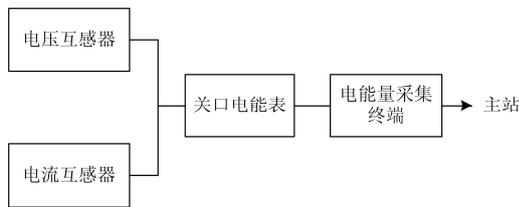


图 1 计量关口结构图

Fig. 1 Structure of metering gateway

图 1 的计量装置中,电能量采集终端是纯数字设备,接收电能表发送的电能数据后打包上传至主站,理论上没有任何误差;二次回路中的误差因素主要包括电压互感器二次压降、互感器二次负

荷等<sup>[12]</sup>,若在计量关口设计、设备安装时未出现失误,则二次回路各项参数理应满足相关标准的要求,基本不会对关口计量精度产生影响,且在长时间运行后基本不会出现变化,因此影响关口计量精度的计量装置主要为电流互感器、电压互感器和关口电能表,其合成误差将直接影响统计电量数据的准确性。

#### 2.1 计量装置误差

输电线路计量关口普遍采用 0.2S 级传统电磁式电流互感器,文献<sup>[13]</sup>已深入研究了电流互感器的稳态误差。电流互感器的误差来源主要是互感器铁芯消耗的励磁电流<sup>[14-15]</sup>,《DL/T 448-2000 电能计量装置技术管理规程》规定,电流互感器实际一次电流不应小于额定电流的 30%<sup>[16]</sup>,若一次电流大小符合相关标准,励磁电流在一次电流中的占比很小,电流互感器的计量精度较高,若电流互感器一次电流很小,励磁电流与一次电流的比值较大,且此时铁芯磁导率很小,电流互感器的误差较大<sup>[17]</sup>。

国家标准《GB 1208-2006 电流互感器》中规定了 0.2S 级电流互感器在不同一次电流下的误差限值,其中当一次电流为 1%额定电流时,电流互感器比差的误差限值为 0.75%,角差的误差限值为 30'<sup>[18]</sup>,误差远高于 20%额定电流下的互感器误差。根据输电线路实际运行数据,跨省输电线路经常出现低负荷的运行工况,以湖北省某 500 kV 线路为例,2016 年 1 月至 2017 年 6 月,其实际输送电量小于 2%额定电量的时间占比为 75.35%,实际输送电量小于 1%额定电量的时间占比为 65.14%。此外,该线路计量关口采用如图 2 所示的 3/2 接线方式,电能表统计的运行电流为两台互感器的电流之和,因此可能出现单台互感器运行电流小于线路统计运行电流的情况。可见,电流互感器的实际运行误差不可忽视。

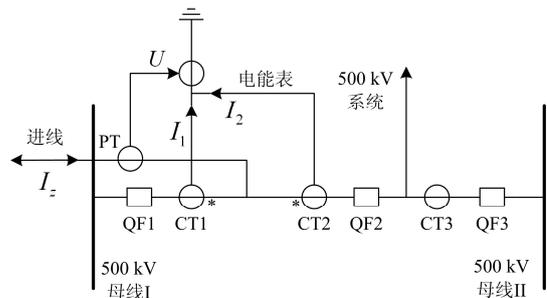


图 2 3/2 接线方式计量装置图例

Fig. 2 3/2 connection method example

当前电压等级 220 kV 及以上的变电站普遍采用电容式电压互感器(CVT), CVT 具有防止铁磁谐振、兼做高频保护和载波通信、绝缘可靠等特点<sup>[19]</sup>,

如图 3 所示, 电容式电压互感器主要由分压电容和电磁单元构成, 其中电磁单元可等效视作电磁式电压互感器。由于 CVT 一般工作在额定电压附近, 电磁单元的误差基本可以忽略, 相较于传统电压互感器, CVT 结构更为复杂, 分压电容更易受环境温度湿度、绝缘状态、电场、污秽等因素影响<sup>[20]</sup>。分压电容是 CVT 的主要误差来源。

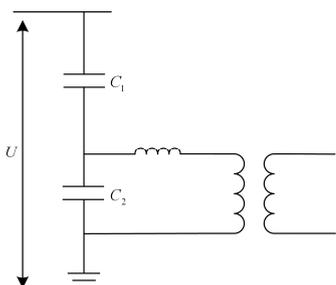


图 3 电容式电压互感器结构图

Fig. 3 Structure of CVT

在长期运行的 CVT 中分压电容  $C_1$ 、 $C_2$  的实际值可能偏离额定值, 即产生分压误差。CVT 的角差由分压电容的介质损耗决定, 若分压电容无介质损耗, 流过分压电容的电流为纯容性电流, 若分压电容出现介质损耗, 分压电容可等效视为电容与电阻并联。当分压电容  $C_1$ 、 $C_2$  的介质损耗因数相等时, 即  $\tan \delta_1 = \tan \delta_2$ , 分压电容造成的电流相位变化相等, 理论上 CVT 的角差为零; 若  $\tan \delta_1 \neq \tan \delta_2$ , CVT 输出信号的相位发生偏移。

以湖北省某 500 kV 跨省输电线路为例, 线路两端计量端口均配备了额定电压为 500 kV 的电容式电压互感器, 型号相同, 电压变比为 500 kV/100 V, 精度等级为 0.2 级, 投运于 2006 年。于 2015 年对 CVT 的计量准确度进行了现场检测, 结果显示, 与投运时的误差数据相比, 被测 CVT 普遍出现了误差增大的现象, 其中一台被测 CVT 的 A 相比差达到了 0.265%, 超过了国家标准中 0.2 级电压互感器的比差限值, C 相角差达到了 9.58', 接近国家标准 0.2 级电压互感器的角差限值。电容式电压互感器是影响计量关口计量准确度的重要因素, 且 CVT 的计量准确性很容易出现劣化。现场检测 CVT 需要相应母线停电, 而变电站停电需要服从调度安排, 因此时常出现 CVT 已到检定周期但是无法停电检测的情况, 即 CVT 的准确性无法得到保证。

目前用于贸易结算的计量关口普遍安装 0.2S 级高精度电子式电能表, 电子式电能表的误差特性已经得到了充分的研究。关口电能表计量精度高, 且误差稳定性高, 实际计量误差远低于 0.2S 级电能表的误差限值, 以湖北省某 500 kV 跨省输电线路为

例, 线路两端计量关口均配置了进口 0.2S 级红相 Mk6E 关口电能表, 2015 年在安装前在实验室进行了误差试验, 2016 年和 2017 年分别在变电站现场进行了现场实负荷校验, 误差数据如表 1 所示。

表 1 关口电能表误差

Table 1 Error of gateway energy meter

电能表	2015 年 12 月	2016 年 7 月	2017 年 6 月
	实验室检测	现场检测	现场检测
主表	0.04	0.06	0.06
副表	0.02	0.02	0.06

实验室试验电压为电能表额定电压、试验电流包括  $5\%I_n$ 、 $I_n$  和  $120\%I_n$  ( $I_n$  为电能表额定电流), 电能表误差为各试验点误差的平均值; 现场实负荷检测时电压电流均为实际工作电压电流, 电压在额定电压附近波动, 电流由实际负荷决定, 当前跨省输电线路负荷普遍较低, 2017 年 6 月检测时电能表输入电流仅 30 mA 左右, 即  $3\%I_n$  (额定电流为 1 A), 由此可以看出关口电能表实际运行误差很小且误差稳定, 且在现场实负荷情况下依旧能准确计量电能。

## 2.2 计量装置误差合成

以三相四线制接线为例, 该接线方式无论三相电压、电流是否对称均能准确计量电能, 三相总功率为各相功率之和, 即

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C \quad (3)$$

式中:  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  分别为三相电压;  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  分别为三相电流;  $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ 、 $\varphi_C$  分别为三相电压、电流的相位差。以上各参量均为相值, 电压、电流均为互感器二次输出值。

电压、电流互感器一次侧输入和二次侧输出之间存在相位差, 即互感器角差, 即有

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \varphi_A - \alpha_1 - \beta_1 = \varphi_A - \delta_1 \\ \varphi_b &= \varphi_B - \alpha_2 - \beta_2 = \varphi_B - \delta_2 \\ \varphi_c &= \varphi_C - \alpha_3 - \beta_3 = \varphi_C - \delta_3 \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  分别为电压、电流互感器三相的角差。理论上互感器二次输出与一次输入应该成比例, 即互感器变比, 但是在实际工况下, 互感器的变比均存在一定误差, 即互感器的比差, 即

$$\begin{aligned} U_a &= U_A (1 + f_{u1}) & I_a &= I_A (1 + f_{i1}) \\ U_b &= U_B (1 + f_{u2}) & I_b &= I_B (1 + f_{i2}) \\ U_c &= U_C (1 + f_{u3}) & I_c &= I_C (1 + f_{i3}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $f_{u1}$ 、 $f_{u2}$ 、 $f_{u3}$ 、 $f_{i1}$ 、 $f_{i2}$ 、 $f_{i3}$  分别为电压、电流互感器三相的比差。取 A 相进行详细分析, 考虑互感器、电能表的各项误差因素, 则 A 相实际计量的有功功率为

$$P_A = U_A (1 + f_{u1}) I_A (1 + f_{i1}) \cos[\varphi - \delta_1] \cdot (1 + \rho) = U_A I_A (1 + f_{u1} + f_{i1} + f_{u1} f_{i1}) \cos[\varphi - \delta_1] (1 + \rho) \quad (6)$$

式中,  $\rho$  为关口电能表计量误差。  $f_{u1} f_{i1}$  远小于  $f_{u1}$  和  $f_{i1}$ , 可以忽略不计。则实际计量有功功率与理论有功功率之差为

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_A - P'_A = \\ &= U_A I_A [(1 + f_{u1} + f_{i1}) \cos(\varphi - \delta_1) (1 + \rho) - \cos \varphi] = \\ &= U_A I_A [(1 + f_{u1} + f_{i1}) (\cos \varphi \cos \delta_1 + \sin \varphi \sin \delta_1) (1 + \rho) - \cos \varphi] \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $\delta$  为电压互感器角差、电流互感器角差的差值, 一般很小, 即  $\sin \delta \approx 0$ 。则计量关口 A 相有功功率误差为

$$\varepsilon_A = \frac{\Delta P_A}{P'_A} \times 100\% = (1 + f_{u1} + f_{i1}) \cos \delta_1 (1 + \rho) - 1 \quad (8)$$

由于输电线路三相负荷基本平衡, 所以三相有功功率计量误差可视为

$$\varepsilon = \frac{1}{3} (\varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C) \quad (9)$$

### 2.3 3/2 接线计量装置误差合成

若计量关口采用图 2 所示的 3/2 接线方式, 则式(3)中的各相电流均为两台电流互感器的向量和, 即

$$\dot{I} = I \angle \phi = I_1 \angle \phi_1 + I_2 \angle \phi_2 \quad (10)$$

将电流互感器的比差、角差代入式(10), 若  $I_1$ 、 $I_2$  的向量关系如图 4 所示, 可得和电流的幅值和相角表达式为

$$|I|^2 = |I_1|^2 + |I_2|^2 + 2|I_1||I_2| \cos(\phi_1 + \phi_2) \quad (11)$$

$$\tan \phi = \frac{I_1 \sin \phi_1 + I_2 \sin \phi_2}{I_1 \cos \phi_1 + I_2 \cos \phi_2} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可以看出, 和电流的幅值、相位误差均与互感器的比差、角差有关, 可得

$$\frac{|I|}{|I'|} = \sqrt{\frac{|I_1|^2 (1 + f_1)^2 + |I_2|^2 (1 + f_2)^2 + 2|I_1||I_2| (1 + f_1)(1 + f_2) \cos(\phi_1 + \phi_2 + \beta_1 + \beta_2)}{|I_1|^2 + |I_2|^2 + 2|I_1||I_2| \cos(\phi_1 + \phi_2)}} \quad (13)$$

当且仅当  $f_1 = f_2 = f'$  时, 式(13)可化简为

$$\begin{aligned} \frac{|I|}{|I'|} &= (1 + f') \sqrt{\frac{|I_1|^2 + |I_2|^2 + 2|I_1||I_2| \cos(\phi_1 + \phi_2 + \beta_1 + \beta_2)}{|I_1|^2 + |I_2|^2 + 2|I_1||I_2| \cos(\phi_1 + \phi_2)}} = \\ &= (1 + f') \cdot \Delta \end{aligned} \quad (14)$$

式中, 若  $\beta_1 + \beta_2 = 0$ , 则  $\Delta = 1$ 。根据互感器历史检测数据, 电流互感器角差一般不超过  $10'$ , 即角差对和电流的比差影响很小, 可以忽略不计, 可近似认为式(14)中  $\Delta = 1$ 。即在两台电流互感器比差相同的情况下, 和电流的比差与单台互感器的比差相同, 可近似认为是一固定值, 不受运行电流大小的影响。

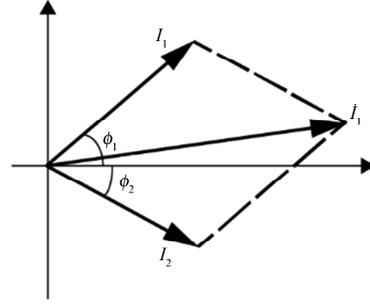


图 4 和电流向量图

Fig. 4 Sum current vectogram

若两台电流互感器的比差不同, 则式(13)不可化简, 且根据两台互感器的运行电流的大小, 可能出现实际和电流误差大于单台互感器比差的情况。

如:  $I_1 = 0$ ,  $I_2 \neq 0$ , 即此时两条 500 kV 母线仅有一条向系统供电, 和电流比差等于有的电流互感器比差, 即  $f = f_2$ 。若  $f_1 < f_2$ , 此时和电流的角差大于其中一台电流互感器的比差; 同理, 若  $I_1 \neq 0$ ,  $I_2 = 0$ , 此时有  $f = f_1$ ; 若图 3 中 500 kV 母线 I 向 500 kV 母线 II 供电, 根据电流互感器同名端的接线方式, 忽略角差的影响, 可近似认为两台电流互感器二次电流相位相差  $180^\circ$ , 考虑一种较为极端的运行方式, 设图 2 中 CT1 的二次电流为  $5I'$ , CT2 的二次电流为  $I'$ , 则电能表处的理论和电流为  $5I' - I' = 4I'$ , 代入两台电流互感器的比差, 得

$$I = 5I'(1 + f_1) - I'(1 + f_2) \quad (15)$$

设  $f_1 = 0.1\%$ ,  $f_2 = 0.05\%$ , 则有  $I = 4.0045I'$ , 即此时和电流的比差为 0.113%, 即此时出现和电流比差大于任意一台电流互感器的比差。综上所述, 对于 3/2 接线方式中的电流互感器, 应要求二次输出连接至同一电能表的电流互感器比差保持基本一致, 此时和电流的幅值误差随运行电流的大小、方向改变, 且数值与单台互感器的比差相等。

将电流互感器的比差、角差代入和电流的相角表达式, 可得

$$\tan(\phi' + \beta) = \frac{I_1'(1 + f_1) \sin(\phi_1' + \beta_1) + I_2'(1 + f_2) \sin(\phi_2' + \beta_2)}{I_1'(1 + f_1) \cos(\phi_1' + \beta_1) + I_2'(1 + f_2) \cos(\phi_2' + \beta_2)} \quad (16)$$

按照上文所述使和电流的幅值误差稳定的配置方式, 即  $f_1 = f_2$ , 可对式(16)进行化简, 此时式(16)中共有 6 个影响和电流相角的变量, 且该函数无极值, 即两台互感器的角差无最优配合情况使所有运行电流下和电流的相角误差最小, 具体运行情况下和电流的相角误差可由式(16)具体计算。

### 3 电量上传舍入误差

在日常线损考核工作过程中发现, 若计算统计

线损的时间间隔较小, 统计线损的数据可靠性极差。以湖北-重庆某跨省输电线路为例, 若每 15 min 计算一次 I 回线路的统计线损, 结果如图 5 所示。

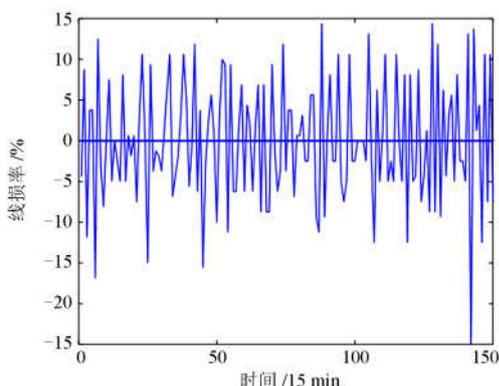


图 5 I 回线路实际统计线损

Fig. 5 I-line actual statistical line loss

从图 5 可以看出, 以 15 min 为时间间隔计算出的统计线损误差极大, 在关口计量装置误差合格的前提下, 仅有电量上传会使得电量数据出现较大误差。

虽然电能量采集终端是纯数字设备, 理论上不会产生误差。但是由于电能表内表码数据较大, 为避免出现数据溢出, 需要对上传数据进行折算后按照固定精度保存。折算倍率一般按照线路负载水平设置, 若在线路负载水平较低时使用较大的折算倍率, 会使得统计电量数据出现较大误差。统计电量表达式为

$$W = \left( \left\lfloor \frac{p_2}{b} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{p_1}{b} \right\rfloor \right) \times b \quad (17)$$

式中:  $W$  为统计电量数据;  $b$  为折算倍率;  $p_2$ 、 $p_1$  分别为折算前的终止表码和起始表码;  $\lfloor \cdot \rfloor$  代表保留固定位数的小数。式(17)中, 电量数据的最小分辨率为

$$x = \frac{b}{10^n} \quad (18)$$

式中:  $b$  为折算倍率;  $n$  为保留的小数位数, 即统计电量数据为

$$W = Nx \quad (19)$$

式中,  $N$  为整数。若实际输送电量大于  $Nx$  且小于  $(N+1)x$ , 电量数据会被折算为  $Nx$ , 即产生数据舍入误差。某段时间内统计电量误差的最大值为

$$\varepsilon_{\max} = \frac{x}{W'} \times 100\% \quad (20)$$

式中,  $W'$  为未经折算的实际电量。不同电量条件下统计电量误差的最大值如图 6 所示。由于某段时

间的起始表码、终止表码以及输送电量均随机变化, 电量上传协议造成的实际统计误差在  $0 \sim \varepsilon_{\max}$  的范围内波动。只有在起始表码与终止表码均满足式(21)的情况下误差为 0。

$$\left\lfloor \frac{p}{b} \cdot 10^n \right\rfloor = \frac{p}{b} \cdot 10^n \quad (21)$$

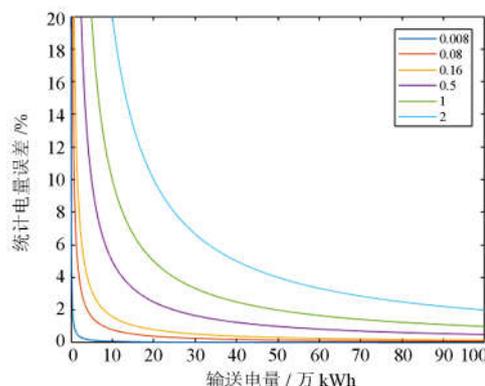


图 6 电量上传最大误差

Fig. 6 Energy upload maximum error

从图 6 可以看出, 电量上传协议造成的统计误差会随着统计电量的增大而减小, 因此若计算统计线损的时间间隔较小, 即使线路输送电量为额定值, 统计线损依旧可能较大, 若统计时间间隔较长, 线路输送电量足够大, 此时电量上传造成的统计线损误差可以忽略不计。以湖北-重庆某跨省输电线路为例, 当前统计线损计算最小时间间隔为 15 min, 其 II 回线路湖北侧变电站每 15 min 额定输送电量为 69.28 万 kWh, 折算倍率为 800, 折算表码保留 4 位小数, 此时电量数据的最小分辨率为 0.08 万 kWh, 则额定工况下电量上传可能造成的最大误差为 0.115%; I 回线路重庆侧变电站每 15 min 额定输送电量为 21.65 万 kWh, 折算倍率为 2 000, 折算表码保留 3 位小数, 此时电量数据的最小分辨率为 2 万 kWh, 则额定工况下电量上传可能造成的最大误差为 9.238%。

综上所述, 在线路实际输送电量较小的情况下, 不宜配置过大的电量折算倍率, 此外, 折算后的电量数据保留的小数位数不宜少于 4 位, 否则用于计算统计电量数据的准确性较差, 即统计线损的数据准确性较差, 此外, 不宜取较短时间间隔的电量数据计算统计线损。

#### 4 实际统计线损数据验证

统计线损由理论线损和其他误差组成, 其他误差主要包括计量装置误差和电量上传误差。以湖北-

重庆某 500 kV 跨省输电线路为例,验证计量装置合成误差和电量上传协议误差对统计线损准确性的影响。

根据线路实际正序电阻、正序电抗、正序电容、电抗器电抗和电阻器电抗建立线路理论线损计算模型,采用潮流法计算理论线损,重庆侧向湖北侧送电时的理论线损结果如图 7 所示。

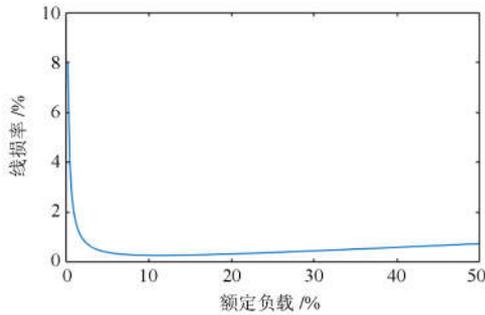


图 7 理论线损计算结果

Fig. 7 Theoretical line loss result

该线路额定负载 1 247.1 MVA,从图 7 可以看出,该线路理论线损在负载小于 5%额定负载的情况下,理论线损较大,在负载大于 10%额定负载的情况下,由于线路热损耗上升,理论线损略有上升,理论线损数据变化情况符合线损理论。

该线路两端计量装置均为 3/2 接线方式,使用本文第二章提出的计量误差合成方法,根据该线路两端计量装置历史检测数据计算各计量关口的计量合成误差。其中,电流互感器误差采用两台互感器误差的平均值,此时两条 500 kV 母线同时供电且运行电量大小相等,关口合成误差如表 2 所示。

表 2 实际关口计量误差

Table 2 Actual gateway metering error

关口	相别	1%额定 功率/%	5%额定 功率/%	20%额定 功率/%
重庆侧	A 相	0.204 96	0.179 97	0.183 93
	B 相	0.022 99	0.010 98	0.009 93
	C 相	0.149 01	-0.153 04	-0.147 05
	整体误差	0.125 65	0.012 64	0.015 60
湖北侧	A 相	0.044 96	0.044 96	0.044 96
	B 相	-0.059 01	-0.032 00	-0.032 00
	C 相	-0.122 99	0.020 97	0.020 97
	整体误差	-0.045 68	0.011 31	0.011 31

为验证关口计量合成误差对统计线损的影响,规避电量上传造成的统计线损误差,取该线路 2017 年 3 月—2017 年 5 月的实际运行数据验证关口合成误差对统计线损的影响。结果如表 3 所示。

表 3 实际统计线损验证结果

Table 3 Actual statistical line loss verification

时间	理论 线损率/%	关口间计 量误差/%	理论统计 线损率/%	实际统计 线损率/%	误差/%
2017 年 5 月	0.285 51	-0.171 33	0.114 18	0.109 35	0.004 83
2017 年 4 月	0.409 35	-0.171 33	0.238 02	0.228 61	0.009 41
2017 年 3 月	0.281 76	-0.171 33	0.110 43	0.141 82	-0.031 39

由于表 3 中的时间段该线路负荷较低,所以取表 2 中 1%额定功率点作为关口计量误差。表 3 中理论统计线损为理论线损与关口计量误差之和,计入关口计量误差的理论统计线损与实际统计线损之间误差均小于 0.05%,可以认为根据本文提出的关口计量误差合成方法计算出的关口计量误差是影响统计线损数据准确性的重要因素。若减小两关口间计量误差,可使得统计线损更贴合理论线损,提高统计线损数据准确性。

## 5 结语

1) 如果仅考核关口计量装置个体误差,不足以保证计量关口整体误差符合 0.2 级误差要求,本文提出了关口计量合成方法,可用于快速计算计量关口合成误差;

2) 对于 3/2 接线方式的计量关口,不仅需要保证计量装置个体误差符合要求,还需保证生成和电流的两台电流互感器的比差、角差尽可能一致;

3) 对实际负载较低的线路不应设置较大的电量折算倍率,此外,用于计算统计线损的电量数据精度应得到保证;

4) 计算线路统计线损时,不应使用较短时间间隔的电量数据,否则会导致统计线损数据精度低,对于线损考核无意义。

## 参考文献

[1] 吴鸿亮, 门锬, 董楠, 等. 基于 J2EE 架构的线损理论计算与诊断分析系统开发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 108-116.  
WU Hongliang, MEN Kun, DONG Nan, et al. Development and application of theoretical calculation and diagnosis analysis system of line loss based on J2EE framework[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 108-116.

[2] 王秀琦. 基于线损分析的电能计量装置误差研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
WANG Xiuqi. The electric energy metering error study based on line loss analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.

[3] 吕勇, 朱松涛, 迟峰. 不对应电量对统计线损的影响

- 及其改进[J]. 中国科技信息, 2005(14): 100, 125.
- LÜ Yong, ZHU Songtao, CHI Feng. Influence of incorrect electric energy on statistical line loss and its improvement[J]. China Science and Technology Information, 2005(14): 100, 125.
- [4] 刘庭磊, 王韶, 张知, 等. 采用负荷电量计算低压配电台区理论线损的牛拉法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 143-148.
- LIU Tinglei, WANG Shao, ZHANG Zhi, et al. Newton-Raphson method for theoretical line loss calculation of low-voltage distribution transformer district by using the load electrical energy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 143-148.
- [5] 南方电网公司. 线损理论计算技术标准: QCSG 11301—2008[S]. 2008.
- China Southern Power Grid Company. Technology standard of theoretical calculation of line loss: QCSG 11301—2008[S]. 2008.
- [6] 王琨, 刘丽平. 10 kV 线损理论计算方法的误差分析[J]. 电力学报, 2002, 17(4): 251-253.
- WANG Kun, LIU Liping. Error analysis on 10 kV line loss with theoretical calculating method[J]. Journal of Electric Power, 2002, 17(4): 251-253.
- [7] 邵军. 一种理论线损计算的电量潮流法[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- SHAO Jun. A power flow method for calculation of theoretical line loss[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [8] 王倩, 许童羽, 王作强. 配电网理论线损的计算方法[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2007, 3(2): 134-136.
- WANG Qian, XU Tongyu, WANG Zuoqiang. Calculation method of distribution network's theoretical line loss[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2007, 3(2): 134-136.
- [9] 李健, 黄俊铭, 朱建全, 等. 基于过程状态特征化的配电网线损计算[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 55-61.
- LI Jian, HUANG Junming, ZHU Jianquan, et al. Line loss calculation for distribution network based on state characterization[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 55-61.
- [10] 冷华, 陈鸿琳, 李欣然, 等. 基于功率或电量预测的智能配电网统计线损同期化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 108-114.
- LENG Hua, CHEN Honglin, LI Xinran, et al. A method for synchronous line loss statistics of distribution network based on load or electricity consumption forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 108-114.
- [11] 杨世海, 杨世涛. 关口电能综合误差的不确定度评定方法[J]. 电测与仪表, 2008, 45(3): 35-38.
- YANG Shihai, YANG Shitao. Evaluating method of uncertainty in measurement about composite error of electric energy at the power exchange point[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(3): 35-38.
- [12] 贾斌. 电能计量装置的综合误差计算及减少综合误差的方法[J]. 电测与仪表, 2004, 41(9): 16-19.
- JIA Bin. The calculation method for the composition error of electric energy measurement device and the reducing method for the composition error[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(9): 16-19.
- [13] 曹团结, 张剑, 尹项根, 等. 电流互感器的误差分析与工程计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(1): 53-56.
- CAO Tuanjie, ZHANG Jian, YIN Xianggen, et al. Error analysis and engineering calculation of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(1): 53-56.
- [14] WATH M G, RAUT P, BALLAL M S. Error compensation method for current transformer[C] // IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, July 4-6, 2017, Delhi, India: 1-4.
- [15] WU Yahui, DONG Xinzhou, SOHRAB M. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power System, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [16] 电能计量装置技术管理规程: DL/T 448—2000[S]. Technical administrative code of electric energy metering: DL/T 448—2000[S].
- [17] 李志坚, 吴崇昊, 侯喆. 测量用电流互感器小电流工作时的补偿方法研究[C] // 中国电机工程学会年会, 2006年12月11-13日, 郑州, 中国: 1-4.
- LI Zhijian, WU Chonghao, HOU Zhe. Research about compensating method to small current working of measuring current transformer[C] // Annual meeting of the China Institute of Electrical Engineering, December 11-13, 2006, Zhengzhou, China: 1-4.
- [18] 电流互感器: GB 1208—2006[S]. Current transformers: GB 1208—2006[S].
- [19] 杨龙. 电容式电压互感器介损损耗及电容量测试方法分析[J]. 通信电源技术, 2016, 33(6): 203-204.
- YANG Long. Analysis of the dielectric loss of the capacitor voltage transformer and common method of measuring capacitance[J]. Telecom Power Technology, 2016, 33(6): 203-204.
- [20] 李永森. 电容式电压互感器误差特性影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- LI Yongsen. Study on the influence factors on the error characteristic of the capacitor voltage transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

收稿日期: 2017-12-25; 修回日期: 2018-03-13

作者简介:

唐登平(1968—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电测量与电能计量; E-mail: tangdp@hb.sgcc.com.cn

李俊(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为互感器技术及高压计量、数字化计量; E-mail: lij575@hb.sgcc.com.cn

孟展(1993—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电能计量与设备状态评估。E-mail: mengzhan@outlook.com

(编辑 周金梅)