

输电线路线损的多参量修正算法

汪应春¹, 张宇轩², 王赞², 杨建华³, 李红斌², 明东岳¹

(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. 国网华中电网有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:随着线损精益化管理的不断推进,输电线路线损计算准确性愈加重要。目前的线损计算方法未考虑负荷水平、时钟准确度以及计量装置配合影响,导致实际统计与计算结果差别较大,不利于线损管理的精益化发展。以现有理论线损计算方法为基础,对统计线损影响量进行分析,提出多参量修正算法,提高线损计算的准确性,并以重庆—恩施 500 kV 超高压输电线路作为算例,证明了该方法的有效性。

关键词:理论线损;低负荷工况;对时误差;计量装置配合;多参量算法修正

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.017 中图分类号:TM933.4 文章编号:1673-9140(2020)05-0126-06

Multi-parameter correction algorithm for transmission line loss

WANG Yingchun¹, ZHANG Yuxuan², WANG Zan², YANG Jianhua³, LI Hongbin², MING Dongyue¹

(1. Metering Centre, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. State Grid Huazhong Power Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: With the continuous advancement of line loss lean management, the accuracy of transmission line loss calculations is becoming more and more important. The current line loss calculation method does not consider the load level, clock accuracy, and the influence of the metering device, resulting in a large difference between the actual statistics and the calculated results. It is not conducive to the lean development of line loss management. Based on the existing theoretical line loss calculation method, this paper analyzes the statistical line loss influence amount, and proposes a multi-parameter correction algorithm to improve the accuracy of line loss calculation. The effectiveness of the method is proven by taking the Chongqing-Enshi 500 kV ultra high voltage transmission line as a numerical example.

Key words: theoretical line loss; low load conditions; timing error; measuring device cooperation; multi-parameter algorithm correction

线损率是国家考核供电企业的重要技术经济指标^[1],统计线损是各网、省、地市供电部门对所管辖(或调度)范围内的电网各供、售电量计量表统计得

出的线路损耗,包含理论线损和管理线损。

线损水平受多方面因素影响,如环境条件、计量误差、管理错漏等^[2],目前线损管理中对线损考核均

是依靠相关理论中的线损计算标准计算结果的,此类计算方法仅考虑输电线路相关参数和电网负荷情况,未考虑系统运行方式、两端计量装置的误差配合等因素对线损统计结果的影响,因此,校核统计线损常出现线损异常情况。以华中电网为例,2013 年 1 月至 2016 年 6 月间,19 条跨省输电线路仅负线损现象就出现了 60 余次。线损异常导致同期线损系统无法正常分析,报表不能准确反映线损情况,给线损管理带来极大障碍。

该文通过分析多因素与统计线损间的关系,筛选出主要影响参量。针对性地对现有线损计算方法进行多参量修正,并以 500 kV 张家坝—恩施超高压输电线路作为算例,验证该线损修正算法的有效性。

1 现有理论计算方法

现有的理论计算方法主要依据网络中主要损耗原件的电气特征建立的等值模型算法,常用的有均方根电流法、平均电流法、最大电流法、等值电阻法以及潮流法等^[3]。

潮流计算方法目前已经较为成熟^[4],计算时主要使用的电力网络由输电线路、电抗器、电容器等静止线性元件组成,并用集中参数表示成串联或并联等值支路来模拟^[5]。

理论线损利用潮流法求得,并根据式(1)、(2)对线损进行温度补偿。

$$\Delta E'_L = k_w \times E_L \quad (1)$$

式中 ΔE_L 为未补偿前的损耗,即由潮流计算出的电能损耗; $\Delta E'_L$ 为计及温升后的电能损耗; k_w 为温升系数,可通过计算得到,即

$$k_w = 1 + 0.2 \left(\frac{I_{if}}{N_{ci} I_{pi}} \right)^2 + 0.004(t_m - 20) \quad (2)$$

式中 I_{if} 为线路的均方根电流值,如果线路为双回路线路, I_{if} 为整条线路的一半; I_{pi} 为导线容许载流值; N_{ci} 为每相分裂条数; t_m 为环境温度。

上述计算方法均只考虑输电线路中电气元件在温度修正后的损耗,即根据输电线路各元件电气参数和环境温度求得。统计线损由两端计量装置测得数据计算求出,而现有考核标准计算方法中未计及

计量装置对于统计线损的影响,因此以理论线损计算结果作为考核标准的有效性不足。

2 影响因素分析及修正算法

以理论线损作为考核标准仍有不足,亟待改进。该文对环境因素、负荷水平、计量装置配合及时钟准确度与统计线损率的相关性进行分析,进一步研究各因素影响统计线损的作用机理,并对理论线损计算方法进行修正。

2.1 环境影响

在理论线损计算方法中,温度对线损影响已作相关修正,但未考虑环境温度对计量装置的影响。目前重要变电站主要使用传统电磁式电流互感器(current transformer, CT),稳定性较好,受温度影响较小。部分高压侧使用电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT),CVT 在运行时误差特性易受环境温度影响^[6],因此需进一步研究环境温度对 CVT 的精度影响。

2.2 负荷影响

电流互感器的测量准确度在负荷范围 20%~120%前提下才能得到保证,超出该负荷范围时测量误差将增大^[7]。

励磁电流变化是造成电流互感器误差变化的主要原因^[8],通过分析电流互感器的等值电路和误差原理,推导出其误差的计算公式^[9]:

$$\epsilon = \frac{25.3 Z_{02} l}{W_2^2 \mu S k} \quad (3)$$

式中 l 是铁芯的平均磁路长度; ϵ 是复数误差模值; Z_{02} 是二次回路总阻抗; μ 是铁芯磁导率; S 是铁芯截面; k 是铁芯叠片系数; W_2 为二次侧线圈匝数。

对式(3)作进一步推导,可得电流互感器误差对线损率的影响:

$$\begin{cases} f = -\epsilon \sin(\Psi + \alpha) \times 100 \\ \delta = \epsilon \cos(\Psi + \alpha) \times 3438 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta P = \frac{(1+f)\cos(\phi + \alpha) - \cos \phi}{\cos \phi} \quad (5)$$

式中 f 是互感器比值差; δ 是互感器相位差; ΔP 是有功功率误差,直接反映误差对线损率的影响; Ψ 为铁芯损耗角; α 为 Z_{02} 阻抗角; ϕ 是功率因数

角,取 $\cos \phi = 0.8$ 。

电流互感器中铁芯磁密与负荷电流正相关,当电流较小时,磁感应强度按比例相应减少,但在低磁通密度时,励磁安匝的减少比磁通密度减少要慢, μ 减小,分母增减小,根据式(3)~(5)可以推出,此时电流互感器的比差和角差均较大,即有功功率误差较大^[9]。

目前电流互感器主要针对额定负荷 5% 或 10% 进行设计优化,并未充分考虑负荷小于 5% 的情况。可以推断,当线路负荷率很低时,互感器的准确度将明显降低,校核线损时异常几率也会增加。

计算 LMZ-0.5 型电流互感器不同负荷率的理论误差,该型互感器铁芯规格 $\Phi 45/\Phi 68 \times 25$, 铁芯材料 Z11(相当于 D 340),容量 $5 \text{ V} \cdot \text{A}$, $\cos \phi = 0.8$ 。二次绕组用 2 根 $\Phi 1.25$ 铝线或 $\Phi 1.04$ 铜线绕制,1 根 40 匝,1 根 39 匝,即半匝补偿。圆环磁分路的直径为 72 mm,片数为 1 片,材料与主铁芯相同。结果如表 1 所示,可以看出,随着负荷率的降低,其理论有功功率误差不断增大,当负荷极低时,误差会超出允许值。

表 1 LMZ-0.5 型 CT 理论误差计算结果

Table 1 LMZ-0.5-type CT theoretical error calculation results

二次电流的 相对值/%	比差 f / %	角差 δ / (')	有功误差 ΔP / %
1	-2.00	+137.9	-4.02
2	-1.43	+98.7	-2.87
10	+0.32	+34.2	-0.35
40	+0.29	+8.2	+0.09
100	-0.29	+1.4	-0.26

2.3 计量配合影响

计量装置配合状态影响计量关口电量数据的准确性,从而直接影响统计线损的准确性。

目前计算输电线路的统计线损主要依据为线路两侧计量关口上传至主站的电量数据,公式为

$$\rho = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中 ρ 代表某一时段的统计线损; ω_1 、 ω_2 分别为该时间段内电能输送端和接收端上传的电能量。电能表接收互感器的输出信号计算电能,电能量采集终端电能表的数据并通过网络上传至主站。互感

器的输出信号中必然包含互感器误差,电能表将电压电流信号相乘得到电功率,电能表在计算功率时引入额外误差。电功率的累计量即为电能量,因此变电站上传的电量数据中包含有各计量装置的计量误差。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^[10]。统计线损由两端关口数据计算求得,若两端整体误差较大且趋势不一致,则可能产生较大误差,导致线损异常的发生。

2.4 时钟影响

已有相关文献研究了时钟对线损的影响,文献[11-12]研究了日级对时误差对线损率的影响;文献[13]通过大量现场测试工作,发现大部分安装运行较长时间的电子式电能表、电量采集器等电能计量装置存在实时时钟误差较大甚至超差的现象。根据式(6)可知,线路上的线损功率是首端与末端功率之差,因此当线损是不同时刻的首端功率与末端功率之差时,统计线损较同时刻的真实线损有所不同,即线损出现了偏差。

在低负荷工况下,即使是微小的误差也会导致线损校核时出现异常,因此有必要深入分析对时误差对线损率造成的影响。

为量化分析对时误差对统计线损的影响,该文计算了不同时差对不同统计时长内的线损率影响,表 2 为不同大小小时差对不同时长的统计线损率影响。

表 2 时差大小对线损率影响

Table 2 The effect of time difference on line loss rate

时长/日	线损率/%		
	1 min	2 min	5 min
1	0.070	0.14	0.35
2	0.035	0.07	0.175
7	0.010	0.02	0.050
30	0.002 3	0.004 7	0.012

设时长范围内的平均功率为 1,统计时长首末端时差内线损功率差为 1,则时差导致的线损率误差计算为

$$\varepsilon = \frac{1 \cdot t_{\text{error}}}{1 \cdot t_{\text{total}}} \times 100\% \quad (7)$$

式中 t_{error} 为时差; t_{total} 为统计线损时长。

实际运行中关口间时差几乎都在 5 min 以内。从表 2 中可以看出, 当统计时长达到月度时, 5 min 对时时差对统计线损的影响已经十分微小, 基本可以忽略。因此, 时钟准确度对短期线损率有较大影响, 对长期线损率影响可以忽略。

2.5 线损修正算法

现对线损计算方法进行修正, 对时误差对线损影响与负荷变化有密切关系, 且考虑长期线损时, 对时误差影响可以忽略。故仅需考虑计量装置配合误差, 对线损计算方法进行修正, 利用式(8)求出单侧计量误差:

$$\Delta P = [UI(1 + f_{u1} + f_{u2}) \times (\cos \varphi \cos \delta - \sin \varphi \sin \delta) \times (1 + \rho) - \cos \varphi] \quad (8)$$

式中 f_{u1} 、 f_{u2} 分别为电压互感器三相的比差; ρ 为关口电能表计量误差, φ 为电压电流相位差; δ 为电压电流互感器角差之差。根据式(9)求出计量装置配合产生的综合误差, 用计量综合误差对理论线损进行修正, 得到修正后的理论线损率。

$$\Delta \delta = \Delta \delta_1 - \Delta \delta_2 \quad (9)$$

式中 $\Delta \delta$ 为线路综合误差; $\Delta \delta_1$ 为送电端计量误差; $\Delta \delta_2$ 为受电端计量误差。

通过式(9)即可求出修正后线损率。

$$\epsilon = \delta - \Delta \delta \quad (10)$$

式中 ϵ 为修正后线损率; δ 为传统理论线损率。

3 实例分析

3.1 环境影响验证

为研究温度变化对计量装置性能的影响, 对 CVT 负载率为 50% 和 100% 时的温度特性进行试验, CVT 精度为 0.2 级。以 20 °C 为基准, 以温差 -55 °C、-25 °C、-5 °C、15 °C 和 35 °C 分别作为温度测试点, 结果如图 1 所示。

从图中可以看出 CVT 的比差受环境温度影响较小, 实际中输电线路两关口间距离较短, 关口间温差较少出现极端值, 同时, 温度对电磁式 CT 的计量性能影响也很小。

综上所述, 环境温度对线损计量准确性影响较小。因此, 在已考虑环境温度的理论算法基础上进行改进时, 不再将环境温度作为计算的重要参量。

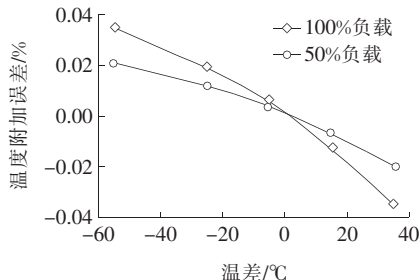


图 1 温度附加比差实测值

Figure 1 Measured value of temperature additional ratio difference

3.2 负荷影响验证

根据湖北省计量中心提供的数据, 查阅华中电网 39 台 0.2S 级电流互感器的检定证书, 统计这 39 台 CT 在不同负载电流比下的比差, 误差分布如图 2 所示。同时计算 CT 在不同负载电流比下的比差平均值, 结果如表 3 所示。

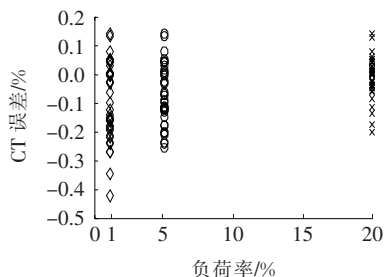


图 2 CT 误差分布

Figure 2 CT error distribution

表 3 CT 电流误差平均值

Table 3 CT current error mean

电流变比/ A	误差平均值/%		
	负荷率 1%	负荷率 5%	负荷率 20%
2000/1	0.096	0.066	0.005

输电线路的线损率受负荷水平影响, 随着负荷率增大, 线损率先减小后增大, 在 5% 额定负荷附近时达到最小值^[14]。以重庆—恩施 500 kV 超高压输电线路为例, 分析张恩线 2016 年 10 月至 2017 年 6 月的运行数据, 统计线损率随负荷率变化分布情况, 结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 当负荷率 1% 以下时, 统计线损率点分布十分离散, 随机性较大, 说明此时计量装置的精度可靠性低。随着负荷率上升, 统计线损率点分布愈发集中稳定, 计量装置的稳定性较好。

从表3中也可以看出,CT误差随负荷率上升而变小,验证了在负载率较低时,计量装置的精度无法得到保证。

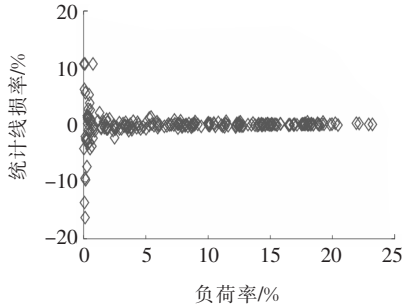


图3 统计线损率随负荷率变化

Figure 3 The variation of statistical line loss with the load rate

3.3 计量配合影响验证

对张恩II回两端计量装置进行检测,合成其计量关口综合误差,如表4所示。

表4 电量合成误差

Table 4 Power synthesis error %

综合误差		计量误差导致的线损率
张家坝侧	恩施侧	
0.125 65	-0.045 68	0.171 33

从表中可以看出关口计量误差导致的线损率达0.17%,而该回线运行时的理论线损不到0.5%,可知该线路关口计量误差很大,对统计线损率影响明显。

3.4 时钟影响验证

用MATLAB搭建仿真平台。采用潮流方法计算线损率,代入张恩II回50d的运行数据得到理论线损率,加入5min的时间差得到带对时误差的线损率,结果如图4所示。

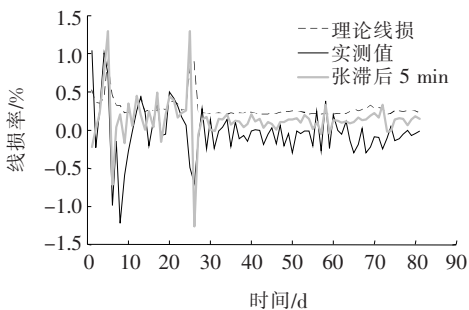


图4 对时误差对线损率影响

Figure 4 Effect of time error on line loss rate

从图4可以看出,在绝大部分时间,张恩线的理论线损为0.3%~0.6%,处于较低水平。计入5min的对时误差后,日线损率出现明显偏移,部分点出现负值,对时误差对短期线损影响明显。

3.5 修正算法验证

为验证修正后线损方法的有效性,选取张恩II回进行实例分析,该线路在线损校核时统计值和理论值偏差较大。

检测张恩II回两端互感器,将计量误差合成综合误差,合成计量配合误差为-0.173%。表5为张恩II回2016年年度线损率计算结果,表6为半年内月线损率计算结果。其中统计值为关口电能表数据计算结果,理论值为传统理论线损算法结果,该文算法即为修正后算法结果。

表5 张恩II回年度线损率计算结果比对

Table 5 Comparison of calculation results of

Zhang en II's annual line loss rate %

统计值	理论值	该文算法
0.119 29	0.282 00	0.110 67

表6 张恩II回月度线损率计算结果比对

Table 6 Comparison of calculation results of

Zhang en II's monthly line loss rate

时间	统计值/%	理论值/%	该文算法/%
201705	0.109 35	0.285 51	0.114 18
201704	0.228 61	0.409 35	0.238 02
201703	0.141 82	0.281 76	0.110 43
201702	0.073 69	0.300 83	0.129 50
201601	0.130 39	0.287 86	0.116 53
201612	0.144 73	0.278 64	0.107 31

从表5、6中可以看出传统理论线损率与统计线损率的偏差较大,月误差最大达到0.227%,年误差高达0.163%。采用该文修正后算法,线损率与实际线损统计结果十分接近,月误差最大仅0.055%,年误差更低至0.008%,准确度大大提高。修正后线损计算方法相比于传统理论计算方法更具可靠性。

考虑到负荷水平和时钟精度对线损的影响,该文修正算法适用于线路电流在5%以上的情况,且线损校核时长为月度或更长。

4 结语

该文在过去对线损研究的基础上,进一步考虑了计量装置配合、负荷水平和时钟准确度对理论统计线损的影响。发现对时误差对短期线损影响较大,长期可忽略;负荷水平较低时互感器可靠性低,线损异常严重;同时计量装置配合误差对线损影响明显。该文提出了计及计量配合误差的修正算法。以 500 kV 张家坝—恩施超高压输电线路为算例对其进行分析,对比理论线损、实际统计线损和修正后线损,发现该文算法的准确度明显高于传统理论算法,证明在校核线损时线损修正后算法优于传统理论算法。

该文算法适用于线损校核时长较长且线路电流较大的情况。对于线路电流较小或统计时长较短的情况,还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 黄星知,杨奕纯,杨兰,等. 基于 BP 神经网络的配电网防窃电降线损研究[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(4):143-147.
HUANG Xingzhi, YANG Yichun, YANG Lan, et al. Study of anti-power theft and line loss reduction for power distribution network based on BP neural network [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(4):143-147.
- [2] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析(第 2 版)[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [3] 魏梅芳,胡毕正,庞文龙,等. 基于动态三相不平衡度的配电网线损计算方法研究[J]. 智慧电力,2020,48(2):104-108.
WEI Meifang, HU Bizheng, PANG Wenlong, et al. Calculation method of distribution line loss based on dynamic three-phase unbalanced degree[J]. Smart Power, 2020,48(2):104-108.
- [4] 方朝雄. 最优乘法及其在交直流电网潮流计算中的应用[J]. 中国电力,2018,51(6):107-112.
- FANG Chaoxiong. Optimal multiplier method and its application in power flow calculation of AC/DC power grid[J]. Electric Power,2018,51(6):107-112.
- [5] 顾本华. 电力系统潮流计算实用化研究[D]. 大连:大连海事大学,2012.
- [6] 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.
- [7] 戴春怡,刘高原. 统计线损中出现负线损的原因分析[J]. 电力与能源,2017,38(2):211-214.
DAI Chunyi, LIU Gaoyuan. Cause analysis of negative statistical line loss[J]. Power & Energy,2017,38(2):211-214.
- [8] 胡书红. 高精度开合式电流互感器的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- [9] 赵修民. 电流互感器[M]. 太原:山西科学教育出版社,1990.
- [10] 唐登平,李俊,孟展,等. 统计线损数据准确性研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(24):33-39.
TANG Dengping, LI Jun, MENG Zhan, et al. Research on the accuracy of statistical line loss data[J]. Power System Protection and Control,2018,46(24):33-39.
- [11] 孙志明. 电网统计线损率波动原因分析[J]. 江苏电机工程,2011,30(4):58-60+63.
SUN Zhiming. Analysis of the reasons for the fluctuation of the statistical line loss[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2011,30(4):58-60+63.
- [12] 胡新梅. 线损率波动分析[J]. 湖北电力,2003,27(5):53-54.
HU Xinmei. The analysis of line loss rate variation[J]. Hubei Electric Power,2003,27(5):53-54.
- [13] 罗志坤. 电能计量在线监测与远程校准系统的研制[D]. 长沙:湖南大学,2011.
- [14] 丁涛. 线损率随负荷增长变化的定量分析[J]. 华北电力技术,1998,(4):3-5.
DING Tao. Quantitative analysis of the change of line loss rate with load growth[J]. North China Electric Power,1998,(4):3-5.