

环境温度对特高压线路计量的影响分析

徐 静¹, 丁一阳², 崔新强¹, 陈 玉³

(1. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430074; 2. 国网安徽省电力有限公司合肥供电公司, 安徽 合肥 230022;
3. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要:针对某些跨省特高压线路在轻载情况下出现的统计负线损现象, 考虑并分析环境温度对特高压线路计量的影响。以南阳—荆门特高压线路为例, 建立温度对电容式电压互感器(CVT)等效分压电容影响的数学模型, 并推导环境温度与 CVT 等效分压电容之间的关系。采用历史气温数据计算环境温度对 CVT 分压比的影响。算例分析表明, 考虑 CVT 参数的差异, 环境温度引起的 CVT 变比误差可能是线路出现统计负线损的一个原因。

关 键 词:环境温度; 电容式电压互感器; 测量误差

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.023 中图分类号:TM451 文章编号:1673-9140(2020)05-0165-06

The influence analysis of ambient temperature on measurement of UHV transmission line

XU Jing¹, DING Yiyang², CUI Xinqiang¹, CHEN Yu³

(1. Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430074, China; 2. Hefei Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the abnormal phenomenon of negative statistical line loss occurring in some interprovincial ultra-high voltage (UHV) transmission lines under light load, the influence of ambient temperature on measurement of UHV transmission line is analyzed in this paper. Firstly, the UHV transmission line of Nanyang-Jingmen is taken as an example to establish a mathematical model of the influence of temperature on equivalent dividing capacitance of capacitor voltage transformer (CVT). Then, the relationship between the ambient temperature and the equivalent dividing capacitance of CVT is deduced. In the end, based on the historical temperature data, the influence of ambient temperature on the voltage division ratio of CVT is calculated. It is shown that the error of CVT voltage ratio caused by the environmental temperature may result in the negative statistical line loss of UHV transmission line when considering the discrepancies of CVT parameters.

Key words: ambient temperature; capacitor voltage transformer; measurement error

近年来,特高压、长距离交流输电系统在跨区域电力互联上的投运越来越普遍^[1]。跨区域输电系统

的关口电能计量是区域电力公司间贸易结算的重要依据,其计量准确性对于贸易结算的公平性尤为重

要^[2-5]。但是,包括特高压线路在内的一些跨省联络输电线路在轻载情况下出现了负线损的异常现象,有必要分析产生统计负线损的原因。

目前中国高压输电线路广泛采用电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)作为电压测量设备^[6],采用电流互感器(current transformer, CT)作为电流测量设备进行功率测量和电能计量。计量用CT测量精度较高、线性传变特性良好,但是计量用CVT会受到各种因素的影响产生计量误差^[7-12]。文献[7]分析了临近效应对CVT测量误差的影响,给出了临近效应误差与统计线损之间的关系;文献[8]分析了现场环境对CVT测量误差的影响;文献[9]分析了不同因素对CVT误差的影响,并研制了CVT误差在线测试系统;文献[10]提出一种CVT误差在线同级比对系统;文献[11]分析了不同因素引起的CVT附加误差,并给出减小测量误差、提高测量准确度的建议;文献[12]提出CVT误差分析理论,分析了不同因素影响下CVT误差变化的趋势。但是,目前针对特高压线路轻载情况下出现的负线损现象却鲜有研究。特高压线路不同电能计量关口环境温度可能存在一定的差异,环境温度变化会影响CVT分压电容,可能会对特高压线路计量产生影响,因此从环境温度的角度分析跨省联络线轻载情况下出现的负线损现象具有一定的工程意义。

该文以某特高压线路为例,建立温度对CVT分压电容影响的数学模型,推导CVT分压电容随温度的变化规律,分析环境温度对CVT变比误差的影响,探索环境温度与某些跨省联络输电线路在轻载情况下出现的负线损异常现象之间的关系。

1 温度对CVT测量误差的影响分析

环境温度是影响CVT电容分压器稳定性的重要因素。根据如图1所示的CVT等值电路图,CVT的高压电容 C_1 和中压电容 C_2 由于温度分布不均或温度系数不同时,将会产生电容值的偏差,会引起电容分压比 $K_c = C_1 / (C_1 + C_2)$ 发生漂移,使中间电压产生偏差,同时可能会因分压电容值变化引起谐振点偏移,导致串联谐振支路存在非零阻抗引起附加误差。

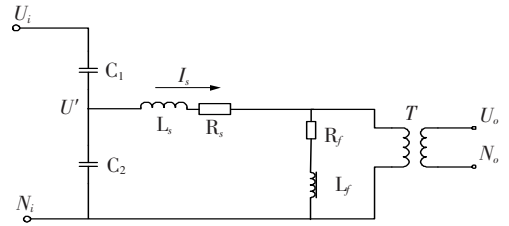


图1 CVT结构

Figure 1 The structure diagram of CVT

在规定的运行温度范围内,一般油纸介质电容器的电容随温度变化近似成线性关系,满足:

$$C_t = (1 + \alpha \cdot \Delta t) \cdot C_{20} \quad (1)$$

式中 C_{20} 为 20°C 时的电容值; C_t 为 t 温度时的电容值; Δt 为 t 与 20°C 的温度差; α 为电容温度系数。

如图2所示的电容分压器结构,当 C_1 、 C_2 在不同温度下运行,或 C_1 、 C_2 材料温度系数差别较大时,CVT分压比 K_c 将因偏离基准值而产生误差。为评估温度分布不均匀对分压比产生的影响,建立如下数学模型。

假设条件^[13]:设电容分压器电容连续、均匀分布,高压端对地距离为 L ,中压端对地距离为 l ,系统频率恒为 $\omega = 2\pi f$ 。

设电容分压器单位长度对应的电容为 c ,则分压器额定电容 $C_e = c/L$,则高压电容 $C_1 = c/(L - l)$,中压电容 $C_2 = c/l$,位于 x 处的微元 dx 对应的电容为 c/dx 。

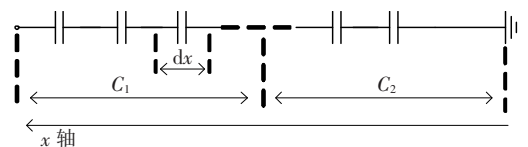


图2 电容分压器结构示意图

Figure 2 The structure diagram of the capacitance voltage divider

为便于推导,将研究对象由电容转化为电容在频率 $\omega = 2\pi f$ 下的容抗,则单位长度容抗:

$$z_c = \frac{1}{\omega c} \quad (2)$$

由于电容的温度效应,设 x 处的单位长度电容 $c(x) = [1 + \alpha(x) \cdot \Delta t(x)] \cdot c$,其中 $\alpha(x)$ 为 x 处电容对应的温度系数, $\Delta t(x)$ 为 x 处温度与 20°C 的温差,则 x 处微元对应的容抗为

$$dz = \frac{z_c}{1 + \alpha(x) \cdot \Delta t(x)} \cdot dx \quad (3)$$

分析 $\alpha(x)$ 与 $\Delta t(x)$ 的变化情况:由于分压器油

温具有上热下冷的分布特点,若认为电容温度系数为常数,则 Δt 随位置的增大线性增大,即

$$\begin{cases} \alpha(x) = \alpha_0 \\ \Delta t(x) = \Delta t_0 + k_t \cdot x \end{cases} \quad (4)$$

式中 Δt_0 为 CVT 底部温度与 20 °C 的温差; k_t 为温差斜率; α_0 为电容温度系数。

将式(4)代入式(3)得:

$$dz = \frac{z_c}{1 + \alpha_0 \Delta t_0 + \alpha_0 k_t \cdot x} \cdot dx \quad (5)$$

式(5)可化为

$$dz = \frac{z_c / (1 + \alpha_0 \Delta t_0)}{1 + \frac{\alpha_0 k_t}{1 + \alpha_0 \Delta t_0} \cdot x} \cdot dx \quad (6)$$

不妨记作:

$$dz = \frac{z_c / b}{1 + ax} \cdot dx \quad (7)$$

$$\text{其中: } a = \frac{\alpha_0 k_t}{1 + \alpha_0 \Delta t_0}, b = 1 + \alpha_0 \Delta t_0.$$

则相应的阻抗值为

$$Z_1 = \int_l^L dz = \int_l^L \frac{z_c / b}{1 + ax} \cdot dx = \frac{z_c}{ab} \cdot \ln \frac{1 + aL}{1 + al} \quad (8)$$

同理可得:

$$Z_2 = \frac{z_c}{ab} \cdot \ln(1 + al) \quad (9)$$

根据式(8)、(9),则在温度影响下的电容计算公式为

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{\omega Z_1} = \frac{ab}{\ln \frac{1 + aL}{1 + al}} \cdot c \\ \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} C_2 = \frac{1}{\omega Z_2} = \frac{ab}{\ln(1 + al)} \cdot c \end{cases}$$

$$Z_1 = [j\omega(L_{s1} + L_{bur}) + R_{s1} + R_{bur}] \parallel j\omega L_m \parallel R_m + j\omega L_e + R_e \quad (11)$$

$$Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_e + R_e} + \frac{1}{j\omega L_m} + \frac{1}{R_m} + \frac{1}{j\omega L_{bur} + R_{bur}}} + \left(\frac{1}{j\omega L_e + R_e} + \frac{1}{j\omega L_m} + \frac{1}{R_m} \right) j\omega L_{s1} + R_{s1} \quad (12)$$

实际上,环境温度的变化会影响电容介质损耗角,会对测量电压相位带来影响。经研究表明,在 -40~60 °C 的温度范围内,电容介质损耗角一般没有明显变化^[14],一般跨区域输电线路环境温度皆在此范围内,因此环境温度对电容介质损耗角的影响基本可以忽略。

实际上温度引起的电容容值的变化可能会带来谐振工作点偏移,由分压电容和补偿电抗器构成的串联谐振电路因谐振工作点偏移引起的非零阻抗也会是电压传变产生附加误差。因此,建立如图 3 所示的特高压 CVT 等值电路图,分析 CVT 输出电压与一次电压之间的定量关系,分析温度引起的分压电容容值变化对 CVT 测量误差的影响。

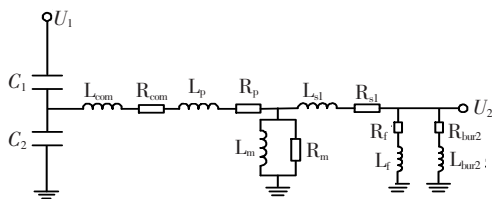


图 3 CVT 等值电路

Figure 3 The equivalent circuit of CVT

根据某实际特高压计量用 CVT 参数,阻尼装置的速饱和电抗器 L_f 折算到高压侧达到 500 kH (电压不高于 1.2 倍额定电压时),可视为开路,因此稳态条件下可以忽略阻尼支路的影响。

定义等值阻抗 Z_1 和 Z_2 如式(11)、(12)所示,其中 $L_e = (L_{com} + L_p)$, $R_e = R_{com} + R_p$ 。则 CVT 输出电压与一次电压之间的关系为

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{Z_1 \parallel 1/j\omega C_2}{Z_1 \parallel 1/j\omega C_2 + 1/j\omega C_1} \cdot \frac{Z_2}{j\omega L_e + R_e} \quad (13)$$

由式(13)可以看出,只有当 Z_1 非常大时,此时 CVT 的幅值误差由分压比误差决定。

实际上,等值阻抗 Z_1 数值并非远大于分压电容的容抗,因此温度引起分压电容容值变化带来的 CVT 传变误差应当按式(13)进行考虑。

2 算例分析

为分析环境温度对 CVT 测量误差的影响,以“晋东南—南阳—荆门”特高压交流输电线路为例,选择 2015 年南阳以及荆门 7 月份的历史气温数据

进行分析。两地的日最高气温和日最低气温如图4所示,从图4中可以看出两地之间的气温具有一定的差异性。

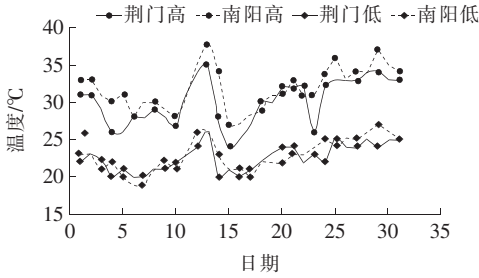


图4 南阳和荆门2015年7月历史日气温

Figure 4 The historical daily temperature of Nanyang and Jingmen in July 2015

设互感器总高 $L=11\ 190\ \text{mm}$, 高压电容 $C_1=5\ 050\ \text{pF}$, 中压电容 $C_2=481\ 000\ \text{pF}$, 温差斜率 $k_t=1.787\ 31\ \text{K/m}$ 。在前述假设条件下可计算得到中压端对地距离 $l=116.263\ \text{mm}$ 。

根据耦合电容器及电容分压器标准 GB/T19749-2005 的要求, 电容器在下限温度以及比上限温度高 $15\ \text{K}$ 温度范围内电容温度系数绝对值不应大于 $5 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$, 因此, 在计算时, 南阳站电容温度系数取 $-2.5 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$, 荆门站电容温度系数取 $-5 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$ 。此时假定 CVT 底部温度与外部气温相同, 则可以根据式(10)计算在不同环境温度下 CVT 分压电容的变化情况, 如图 5、6 所示。

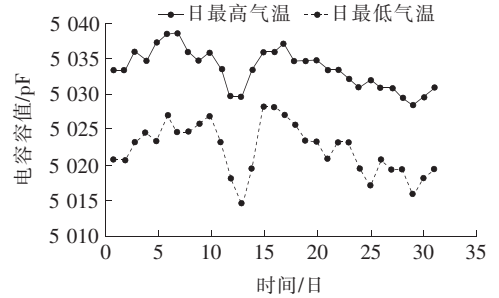
由图 5、6 可以看出, 受环境温度的影响, CVT 的分压电容 C_1 、 C_2 会偏离标准值, 使得实际 CVT 存在一定的传变误差。

根据表 1 所示的某特高压工程 CVT 参数, 可以计算温度对 CVT 传变误差的影响。根据计算温度对分压电容容值的影响, 带入式(13)中计算, 发现在分压电容容值偏移标准值最严重的情况下, CVT 角度误差不超过千分之一度, 因此温度对 CVT 相位偏差的影响可以忽略不计。

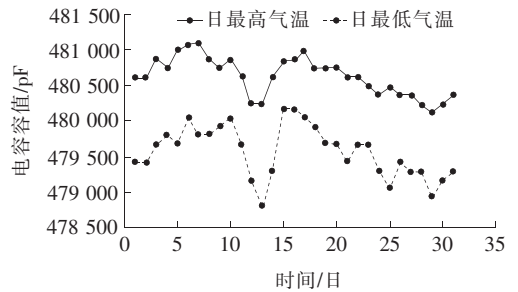
在上述算例分析中, 针对南阳和荆门两地设置不同的电容温度系数, 在 CVT 运行规程要求范围内, 设置不同的电容温度系数, 计算在同一温度下对 CVT 测量误差的影响, 计算结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 当电容温度系数不同以及两地环境温度存在差异时, 南阳和荆门两地的 CVT 变比会存在一定的差别, 同时可以看出如果两地

CVT 电容温度系数较为一致, 则 CVT 测量误差也较接近, 因此, 电容温度系数的差异对于跨区域电能计量精度存在较大的影响。



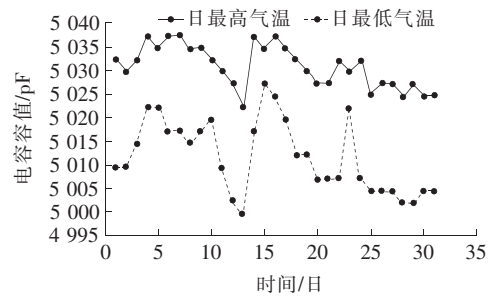
(a) 等效分压电容 C_1



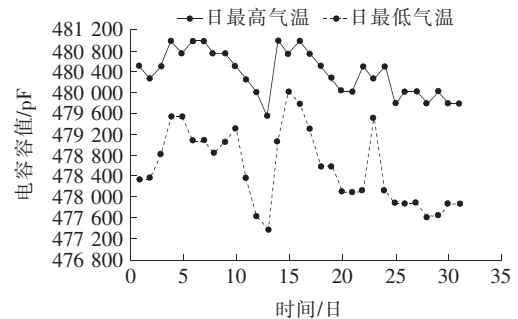
(b) 等效分压电容 C_2

图5 荆门日气温变化对等效分压电容影响

Figure 5 The influence of temperature variation on equivalent voltage divider capacitor in Jingmen



(a) 等效分压电容 C_1



(b) 等效分压电容 C_2

图6 南阳日气温变化对等效分压电容影响

Figure 6 The influence of temperature variation on equivalent voltage divider capacitor in Nanyang

表 1 CVT 参数

Table 1 Parameters of CVT

$C_1/\mu\text{F}$	$C_2/\mu\text{F}$	L_e/H	R_e/Ω	L_m/H
5.05×10^{-3}	0.481	34.4	500	4.6×10^4
R_m/Ω	L_{s1}/H	R_{s1}/Ω	L_{bur2}/H	$R_{bur2}/\text{k}\Omega$
540×10^4	5	365	4 586	1 920

表 2 不同条件下 CVT 测量误差

Table 2 Measuring error of CVT under different conditions

地区	温度/ $^{\circ}\text{C}$	电容温度系数/ (10^{-4}K^{-1})	幅值误差/ $\%$
南阳	30	-1.0	-0.099
		-2.5	-0.248
		-5.0	-0.498
	15	-1.0	-0.099
		-2.5	-0.247
		-5.0	-0.494
荆门	25	-1.0	-0.099
		-2.5	-0.248
		-5.0	-0.497
	5	-1.0	-0.099
		-2.5	-0.247
		-5.0	-0.492

根据历史数据,南阳至荆门段曾出现统计负线损现象,当月日均电量为 559.2 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,根据数据计算线路日平均电流有效值为 135.77 A,根据线路参数可知线路电阻为 2.15 Ω ,计算线路实际线损仅为 0.28 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,说明统计线损出现的异常应当是由测量误差引起。

计量线损是线路不同关口通过计量的电压和电流数据计算线路的损耗,考虑到荆门为功率受端,则可通过式(14)计算线路损耗功率:

$$P_{\text{jloss}} = P_{\text{jNY}} - P_{\text{jJM}} \quad (14)$$

式中 P_{jloss} 为线路计量损耗; P_{jNY} 为南阳站计量功率; P_{jJM} 为荆门站计量功率。

考虑 CVT 测量的幅值误差,式(14)可化为

$$P_{\text{jloss}} = (1 + e_{\text{NY}})P_{\text{NY}} - (1 + e_{\text{JM}})P_{\text{JM}} \quad (15)$$

式中 e_{NY} 为南阳站 CVT 实际变比与标准变比之差; e_{JM} 为荆门站 CVT 实际变比与标准变比之差; P_{NY} 为南阳站功率实际值; P_{JM} 为荆门站功率实际值。

根据图 5、6 可以计算南阳和荆门两地当月每天

CVT 的变比,将上述数据带入式(15),即可计算当月统计线损量:

$$W_{\text{jloss}} = \sum_{i=1}^{31} [(e_{\text{NY}i} - e_{\text{JM}i})\bar{W} + (1 + e_{\text{NY}i})0.28] \quad (16)$$

式中 W_{jloss} 为计量损耗电量; $e_{\text{NY}i}$ 为当天南阳站 CVT 实际变比与标准变比之差; $e_{\text{JM}i}$ 为当天荆门站 CVT 实际变比与标准变比之差; \bar{W} 为日均电量。

表 3 给出了南阳和荆门两地 CVT 不同的电容温度系数下计算的统计线损。从表 3 中可以看出,电容温度系数对于统计线损有较大影响,当两地 CVT 电容的温度系数存在较大差异时,可能会出现统计负线损的情况。

通过上述估算分析,说明实际线路中 CVT 测量误差会受到多种因素共同影响,其中 CVT 电容温度系数差异引起的幅值误差可能是线路产生统计负线损的一个原因。因此, CVT 在设计过程时,建议选用电容温度系数较低的介质材料,还应使整个电容分压器具有相同的结构,使散热、导热性能尽可能相近,以减小温度对 CVT 测量误差的影响。

表 3 不同温度系数下的统计线损

Table 3 Statistical line losses under different temperature coefficients

电容温度系数/ (10^{-4}K^{-1})		统计线损电量/ (万 $\text{kW} \cdot \text{h}$)
南阳	荆门	
-5.0	-2.5	-33.38
-2.5	-2.5	8.46
-1.0	-2.5	34.42
-5.0	-1.0	-60.92
-5.0	-5.0	8.25

3 结语

为分析环境温度与某些跨省联络输电线路在轻载情况下出现负线损异常现象的关系,考虑到环境温度会影响 CVT 等效分压电容,以南阳、荆门特高压线路为例,建立了温度对 CVT 等效分压电容影响的数学模型,推导环境温度与 CVT 等效分压电容之间的关系,指出电容温度系数对于 CVT 计量误差有重要影响。不同 CVT 电容温度系数的差异可能是导致特高压线路出现统计负线损的原因之一。

参考文献:

- [1] 徐遐龄,李勇,徐友平,等.区域互联大电网运行控制技术研究[J].电力科学与技术学报,2016,31(4):175-180.
XU Xialing, LI Yong, XU Youping, et al. Research on operation control technology of regional interconnected power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 175-180.
- [2] 刘纪鹏,刘作琼.国企“混改”背景下的电力体制改革[J].中国电力企业管理,2015(3):15-17.
LIU Jipeng, LIU Zuoqiong. Electric power system reform under the background of the reform of state owned enterprises[J]. China Electric Power Enterprise Management, 2015(3): 15-17.
- [3] 朱梦梦,朱全聪,束洪春,等.换流站直流电子式电压互感器现场校准方法研究与工程应用[J].电力科学与技术学报,2020,35(3):179-184.
ZHU Mengmeng, ZHU Quancong, SHU Hongchun, et al. Research and application of field calibration method for the DC electronic voltage transformer in converter stations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 179-184.
- [4] 刘玉玺,欧阳红,李刚,等.基于 IEC-CIM 的营配网末端设备公共信息模型设计[J].智慧电力,2019,47(2):75-81.
LIU Yuxi, OUYANG Hong, LI Gang, et al. Common information model design for integrated marketing and distribution terminal device based on IEC-CIM [J]. Smart Power, 2019, 47(2): 75-81.
- [5] 钱斌,蔡梓文,肖勇,等.基于边缘计算的电表计量系统数据协同检测方案[J].中国电力,2019,52(11):145-152.
QIAN Bin, CAI Ziwen, XIAO Yong, et al. Data collaborative detection scheme of electric metering system based on edge computing[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 145-152.
- [6] 李璿,王晓琪,余春雨,等.1 000 kV 特高压交流电压互感器研制现状及性能浅析[J].高压电器,2011,47(11):110-114+120.
LI Xuan, WANG Xiaqi, YU Chunyu, et al. Development and performance analysis of 1000 kV UHV voltage transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 110-114+120.
- [7] 刘佳,王春雨,丁一阳,等.1 000 kV 电容式电压互感器临近效应对统计线损的影响[J].水电能源科学,2017,35(6):186-189.
LIU Jia, WANG Chunyu, DING Yiyang, et al. Influence of 1000 kV capacitor voltage transformer proximity effect on statistical line loss[J]. Water Resource and Power, 2017, 35(6): 186-189.
- [8] 杜宇,李航,张鑫,等.电容式电压互感器误差及现场测试影响因素分析[J].内蒙古电力技术,2010,28(6):38-40+49.
DU Yu, LI Hang, ZHANG Xin, et al. Error of capacitive potential transformer and influence factor analysis for site testing [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2010, 28(6): 38-40+49.
- [9] 吴士普,吴细秀,李璿,等.1 000 kV CVT 运行状态下误差测试技术研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(3):122-127.
WU Shipu, WU Xixiu, LI Xuan, et al. Study on error test technology for 1 000 kV CVT under operation condition[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 122-127.
- [10] 徐思恩,冯宇,汪本进,等.特高压电容式电压互感器误差在线同级比对技术研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(3):133-137.
XU Sien, FENG Yu, WANG Benjin, et al. Research on on-line peer comparison of UHV capacitor voltage transformer error [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 133-137.
- [11] 张秦,张锋,岳国义.电容式电压互感器附加误差分析[J].河北电力技术,2011,30(5):13-14+40.
ZHANG Qin, ZHANG Feng, Yue Guoyi. Additional error analysis of CVT [J]. Hebei Electric Power, 2011, 30(5):13-14+40.
- [12] 王欢,汪本进,邓万婷,等.电容式电压互感器误差分析方法研究[J].电测与仪表,2016,53(11):39-44.
WANG Huan, WANG Benjin, DENG Wanting, et al. Research on error analysis method of capacitor voltage transformer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(11): 39-44.
- [13] 李昊翔.基于电容分压的电子式电压互感器的研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [14] 李国庆,庄重,王振浩.电容型电气设备介质损耗角的在线监测[J].电网技术,2007,31(7):55-58+68.
LI Guoqing, ZHUANG Zhong, WANG Zhenhao. On-line monitoring of dielectric loss of capacitive apparatus [J]. Power System Technology, 2007, 31(7):55-58+68.