

钟劲松¹ 聂琪² 曾非同² 李宁¹ 胡浩亮² 张建文¹

强电磁环境下基于无线传输的直流电压互感器校验方法误差研究

摘要

在直流电压互感器校验中,为解决直流互感器一次分压器和二次测量系统通信距离长的问题,本文基于无线通信与北斗同步技术,提出了一种直流电压互感器无线校验方法和硬件设计方案,在锦屏—苏州±800 kV 直流换流站开展了直流电压互感器现场误差无线校验试验.试验结果显示,装置在测量低压时无线校验试验数据偏差小,但在测量高压时,由于处于高电压强电磁的环境,GPS定位与同步存在不稳定与小范围偏差的问题.针对此问题,本文对直流电压互感器无线校验系统在复杂电磁环境干扰下进行特性分析,并提出减小无线传输的直流电压互感器误差的解决方法,对直流电压互感器的无线校验技术发展有一定的工程意义.

关键词

直流电压互感器;无线通信;北斗同步;电磁干扰

中图分类号 TM933

文献标志码 A

收稿日期 2019-10-10

资助项目 国网新疆电力有限公司科技项目(5230DK180012)

作者简介

钟劲松,女,高级工程师,研究方向为电力信息通信系统的规划建设、运行维护.3961949@qq.com

聂琪(通信作者),男,硕士,工程师,研究方向为直流互感器校验技术、量测技术.1196541453@qq.com

1 国网新疆电力有限公司电力科学研究院,乌鲁木齐,830011

2 中国电力科学研究院有限公司,武汉,430074

0 引言

直流电压互感器是特高压直流输电工程和柔性直流输电工程的关键设备,为直流输电系统的控制、保护提供电压信号,其测量准确性直接影响到直流输电系统的安全稳定运行^[1].目前工程互感器校验方法多采用采样信号经 A/D 转换后通过电缆进行远程数据传输和同步的有线校验方法^[1-5].然而在实际工程中直流互感器的一次分压器和二次测量系统间隔距离长,有线校验方式存在电缆拉线长、电缆和光纤易磨损及折断、布线复杂等问题,会降低数据传输可靠性、减缓校验工作效率^[6-7].选择无线校验方式可避免上述问题,但存在同步难度大、无线覆盖范围小、数据传输不稳定和数据传输延时等问题,因此亟需研究解决方法以改善现场无线校验方法.

本文针对现有校验技术中存在的问题,研制了一种直流电压互感器无线校验装置,提出了基于无线通信的跨域点对点无线数据传输方案和基于北斗授时和时标容错技术的严格同步方案,并对锦屏—苏州±800 kV 直流换流站的直流电压互感器开展现场校验试验,极大地降低现场布线复杂度和提高现场校验工作效率.针对现场校验试验过程中无线校验装置中北斗定位与同步存在不稳定与偏差的问题进行误差分析,分析了无线传输互感器误差以及减小误差的方法,对直流电压互感器的无线校验技术发展有一定的工程意义.

1 无线直流电压互感器校验装置

1.1 无线同步与通信功能分析

为保证校验结果的可靠性,计量装置必须确保被测互感器与标准器采样信号同步^[8-10].在有线校验过程中,由于有线校验标准器与被测互感器由相同同步时钟提供同步信号,可认为标准器与互感器之间保持时钟同步.在无线校验过程中,考虑电力系统涉及国家安全,本文采用北斗系统向标准器与被测互感器提供同步采样信号,确保被测互感器与标准器之间的信号同步.为确保北斗系统提供同步信号的可靠性,本文工程样机通过判断连接卫星数目确保模块输出同步授时秒脉冲信号.无线同步信号判断流程如图 1 所示.为保证标准器与被测互感器间信息交换,并考虑直流换流站地域偏僻,4G 移动基站

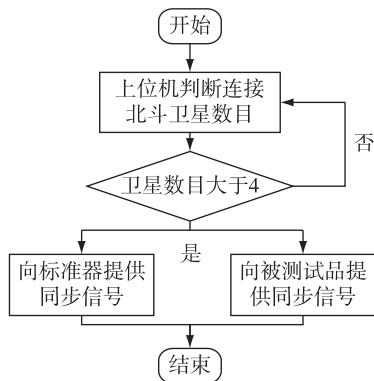


图1 基于北斗系统无线同步流程

Fig. 1 Flow chart of wireless synchronization based on Beidou system

提供信号弱,本文采样 GPRS 作为无线通信手段.

1.2 工程样机原理与设计

工程样机原理如图 2 所示,其中虚线表示无线传输,实线表示电缆传输.基于无线通信与北斗同步,本文设计的无线直流电压互感器校验装置包含:收发串口(RS232)、北斗同步模块、无线通信模块、数字化电能表、上位机计算模块与直流电压校验仪模块.为测量标准互感器输出信号,装置中主机部分连接电力系统一次侧的分压器,主机部分与直流校验仪通过电缆连接.为测量被测互感器输出信号,装置中从机部分连接电力系统二次侧系统控制柜,从机部分与直流校验仪通过无线通信连接.为保证主机与从机同步,分别在主机与从机两侧连接北斗系统传输同步信号.

传统校验装置主机与从机中的上位机部分由电缆连接,本文无线校验装置则由无线通信替代有线

连接.

工程现场中运行的工程样机实物如图 3 所示.其中图 3a 为在户外一次侧连接标准互感器的主机,图 3b 为在控制室二次侧连接被测互感器传输信号的从机.



a.直流电压互感器校验装置主机



b.直流电压互感器校验装置从机

图3 无线直流电压互感器校验装置工程样机

Fig. 3 Engineering prototype of wireless DC voltage transformer calibration device

2 现场试点误差问题描述

为开展无线直流电压互感器计量性能研究,本文对锦屏—苏州±800 kV 直流换流站的直流电压互感器开展现场校验试验,并利用现场有线与无线设备分别计量并进行实时检测分析.试点运行前,被试

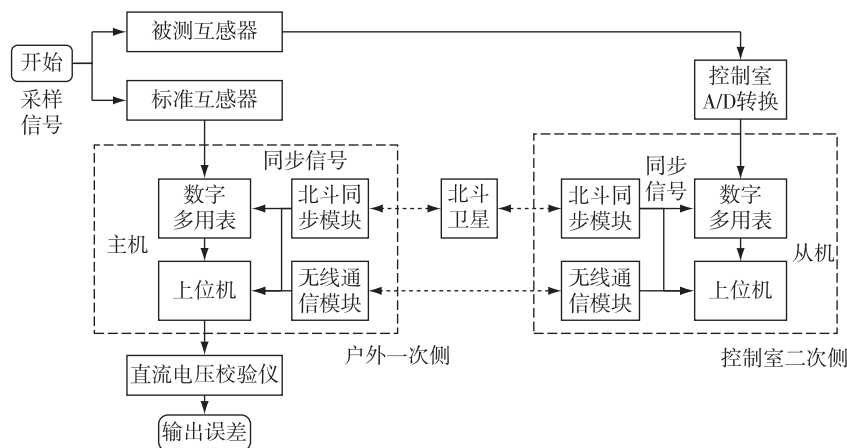


图2 无线直流电压互感器校验装置结构

Fig. 2 Structure of wireless DC voltage transformer calibration device

电子式互感器以及作为参考标准的传统互感器,还有在线监测设备均依照相关规程进行检测,计量性能满足规程要求.

现场试验运行数据都在±500 kV 直流下进行测得.为保证试验数据的准确性,在试验过程中,试验切断被测线路外其余导线,换流站中仅留一条线路运行.表 1 为有线状况下的直流电压互感器试验数据.表 1 数据表明通过电缆有线测试时,相对误差在 0.2%~0.9%之间.

表 2 为无线状况下的直流电压互感器试验数据.表 2 数据表明在电压百分低于标准的 50%时,相

表 1 ±500 kV 有线直流电压互感器试验数据

Table 1 Test data of cable DC ±500 kV voltage transformer

电压百分比/%	标准侧电压/V	试品侧电压/V	相对误差/%
-17	-85 753.4	-85 518.5	-0.273 9
-31	-160 102.0	-159 585.0	-0.323 0
-48	-240 917.0	-239 712.0	-0.500 1
-69	-345 008.0	-342 256.0	-0.797 7
-80	-399 190.0	-395 637.0	-0.890 0

表 2 ±500 kV 无线直流电压互感器试验数据

Table 2 Test data of wireless DC ±500 kV voltage transformer

电压百分比/%	标准侧电压/V	试品侧电压/V	相对误差/%	误码
-16	-80 067.9	-79 969.9	-0.122 7	否
-32	-160 613.0	-160 095.0	-0.322 6	否
-48	-241 799.0	-240 759.0	-0.430 1	否
-68	-345 012.0	同步异常		是
-80	-399 190.0	同步异常		是

对误差在 0.12%~0.43%之间.然而随着电压百分比升高,相对误差变化明显,甚至在试验过程多次出现北斗定位与同步功能失灵,标准器与被试互感器上位机同步性差的现象,导致无线电压互感器测试数据比有线的数据偏差更大.

3 误差分析

3.1 无线直流电压互感器校验误差源分析

无线直流电压互感器校验流程中误差产生分析如图 4 所示,其中实线表示误差流程逻辑分析,虚线表示误差源分析.在校验过程中,标准直流电压互感器与被测直流电压互感器并接入户外一次侧线路中,标准直流电压互感器通过电缆有线传输将信号输入校验仪中,被测直流电压互感器通过电缆传输将信号传输至室内二次侧,在经过二次侧 A/D 转换后通过无线传输将信号传送至校验仪.

从无线直流电压互感器校验流程可知,校验误差来自于 3 个部分:互感器自身误差、互感器电缆有线传输误差和在高电压强电磁环境下对无线传输的干扰误差.

3.2 直流电压互感器误差分析

直流互感器自身误差来源于 3 个方面:互感器误差、A/D 转换误差与 FT3 通信协议量化误差^[9-10].有线传输下的直流电压互感器误差可以表示为

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, \\ \lambda_1 = f(\xi_u, \delta_u), \end{cases} \quad (1)$$

式中 λ_1 表示互感器误差, λ_2 表示 A/D 转换误差, λ_3 表示 FT3 通信协议量化误差, ξ_u 表示电压通道比差, δ_u 表示电压通道角差.

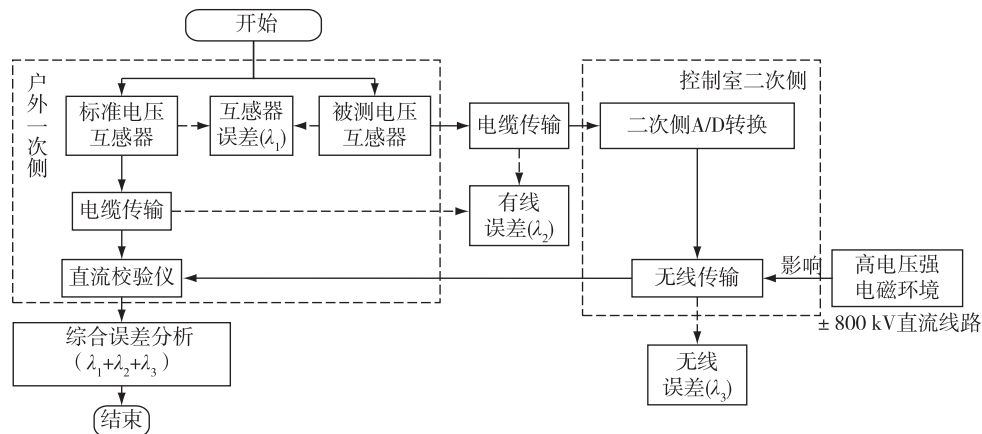


图 4 无线直流互感器误差源分析

Fig. 4 Error source analysis of wireless DC transformer

互感器误差由互感器自身的电压幅值比差与电压相角差决定,互感器为直流互感器可忽略角差与功率因数,可表示为

$$\lambda_1 = \frac{U_x - U_0}{U_0} \times 100\% = \xi_u, \quad (2)$$

式中 ξ_u 表示电压比差。

直流互感器的工作原理为饱和电抗器的工作原理,需要进行 A/D 转换将互感器感应产生的交流转换为直流,A/D 误差主要来自于互感器 A/D 转换器输出的离散值,可表示为

$$U_q[k] = U[k] + e_u[k], \quad (3)$$

式中 $U_q[k]$ 为电压第 k 点采样信号, $e_u[k]$ 为 k 点采样量化误差。而量化误差是 $[-q/2, +q/2]$ 内随机变量,所以当采样点足够大时,A/D 量化误差极小,几乎为 0 可忽略不计。

FT3 通信协议量化误差也满足 $[-q/2, +q/2]$ 内随机变量,可表示为

$$e_{uq}[k] = \text{round}(U[k]) - U[k] \leq q_u, \quad (4)$$

式中 round 表示取整, q_u 为协议最小分辨率 0.01 V,即通信协议量化误差不超过 0.01 V。

3.3 同轴电缆传输误差分析

在现场有线通信测量通道采用同轴电缆^[9],在直流互感器计量中,无线直流互感器电缆包含户外一次侧到室内二次侧的传输电缆,有线直流互感器电缆还需加上室内二次侧到直流校验仪的连接电缆。电缆在传输过程中等效电路如图 5 所示。

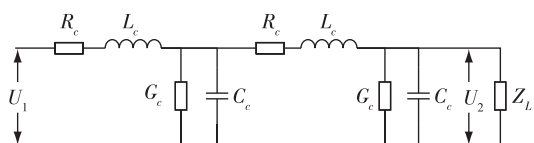


图 5 有线测量同轴电缆等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit for cable measurement coaxial cable

图 5 中 R_c 、 L_c 、 G_c 、 C_c 、 Z_L 分别表示电缆单位长度的等效电阻、电抗、电导、电容与负载等效电阻。 U_1 表示采集端电压, U_2 表示输入设备端电压。

在有线计量中,同轴电缆产生误差由 U_1 、 U_2 差值产生,同轴电缆传递函数为

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_L}{Z_c(\text{sh}\gamma)L + Z_L(\text{ch}\gamma)L}, \quad (5)$$

式中 γ 为传递常数, Z_c 为阻抗特性,满足:

$$Z_c = \sqrt{(R_c + j\omega L_c) / (G_c + j\omega C_c)}, \quad (6)$$

$$\gamma = \sqrt{(R_c + j\omega L_c) \times (G_c + j\omega C_c)}. \quad (7)$$

由于测量用电缆长度远小于电压波长,本文不考虑电缆反射系数 Γ 。

3.4 强电磁环境下无线传输误差分析

直流电压的频率在 0~50 Hz 范围电磁场不会对无线通信产生影响,但由于直流输电中存在谐波,谐波的频率 200~35 000 Hz 会对通信产生严重影响,在超高压开关站中,严重时甚至会导致通信模块丢包或误码的情况^[11-14]。在 ± 500 kV 特高压直流互感器所处的高电压强电磁环境对互感器无线传输信号产生干扰更为严重。电场场强是高压直流输电的基本电磁环境参数^[15-16],无线通信还需考虑设备所处环境中的场强大小。

目前研究多使用误码率评价无线通信误差。在无线传输因谐波产生误码时,可能产生同步不稳定与数据量读取偏差的问题,此时计量校验参数无参考意义。为避免低频噪声干扰,本文中无线通信模块使用对时 B 码调频调制(BFSK),通过电磁兼容性(EMC)试验,当通信设备所处电场环境超过 10 kV/m 时,设备通信误码率超过可接受范围,产生通信异常。

4 误差分析仿真

4.1 仿真条件

为便于分析,本文设定如下基本分析与仿真环境:

1) 在直流换流站中,无线直流互感器的通信电磁干扰主要来自变电站母线周围产生的电场和磁场、变压器产生的工频谐波与磁场、在高压侧由于隔离开关操作产生的过电压与大电流所产生的谐波与电场。

2) 考虑变电站环境的对称性,并由于 ± 300 kV 时无线传输开始出现较大误差,所以选取 ± 300 kV 直流电场与电磁环境采用二维平面。

3) 仿真中不考虑换流站中绝缘子、线路杆塔等器件对电磁场影响。

4) 北斗同步系统同步误差 100 ns,可认为标准器与被测互感器同步。

5) 考虑互感器自身误差与同轴电缆传输产生误差。

4.2 基于有限差分方法的电磁环境仿真

由于在试验过程中,试验切断被测线路外其余导线,在换流站中仅保留一条线路运行,线路呈倒 L 型。本文简化换流站模型为一根 L 型 ± 300 kV 输电线

路.基于有限差分方法,得到 ± 300 kV 工况下的标准器与被测互感间电磁环境分布如图 6 所示.其中红线两端为标准侧主机与被试侧从机的放置位置,L型黄线为电缆.可见本次试验过程中,主机与从机通信直线距离跨越高强电磁区域.

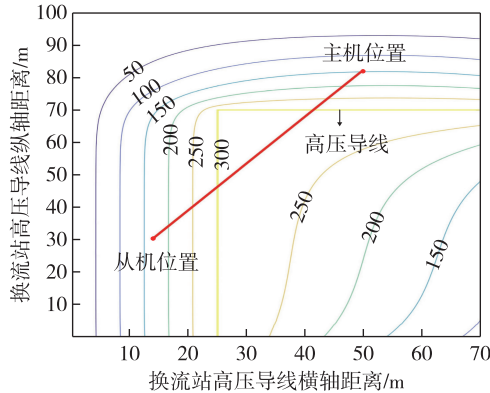


图 6 测量架空线周边电场分布(kV)

Fig. 6 Distribution of electric field around overhead lines(kV)

对图 6 电位求导可知,在无线通信信号发射与接收点的场强大小分别达到 5 kV/m 和 10 kV/m,并经过最大场强为 20 kV/m 的拐角区域,超过无线通信模块正常耐受电场范围.

图 7 为基于有限差分的标准侧与被试侧所处位置直线距离的电场强度.横轴坐标 0 处为标准侧,在 40 m 处达到最大场强,对通信造成影响.在两者距离大概 70 m 处时电场强度衰减接近 1 kV/m.

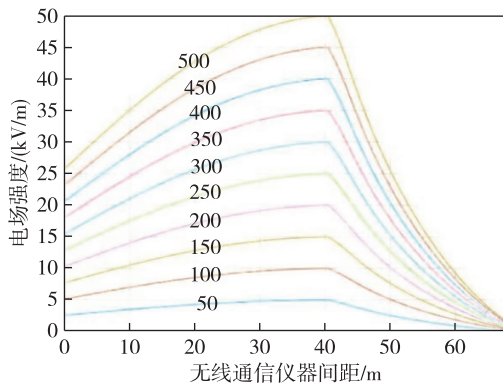


图 7 标准侧与被试侧间距电场对比
(等值线为导线电压等级,单位 kV)

Fig. 7 Comparison of electric field spacing between standard measurement and test side

通过图 7 可知,在架空线电压超过 300 kV 时,通信设备所处环境的场强超过标准规定值,试验过程中通信开始出现同步异常、数据偏差等问题.

4.3 直流电压互感器误差仿真结果

基于有限元方法的电磁环境仿真结果,本文考虑互感器误差、同轴电缆传输误差和无线通信干扰产生误差进行直流电压互感器校验结果仿真.

本文采用的 0.2 s 级的互感器为标准器,即比差小于等于 0.2%,通信协议与 A/D 转化误差可忽略.在锦屏—苏州 ± 800 kV 直流换流站,测量实地互感器与室内二次侧测量系统间距,电缆采用 LGJQ-300 的钢芯铝绞线.由于互感器现场因素影响,在现场试验比差在 0.5% 范围.

可得到电压互感器自身产生的电压幅值误差在 $\pm 0.2\%$ 之间.同轴电缆传输在被测试品到二次侧 A/D 转换器间为直流传输,产生电压误差幅值偏差为 0.022%,在室内二次侧 A/D 转换器到一次侧直流校验仪间距长且为直流传输,产生电压误差为 0.069%.

基于通信设备工作环境的电场要求, ± 300 kV 时输电线路产生电磁场超出 FCC 标准对通信设备工作环境电场大小标准,导致无线传输的误码率较高,本文认为场强大于 10 kV/m 时,计量标准器与被测试品不同步,计量结果不可靠.

4.4 仿真结果分析与对比

本文通过分析无线直流电压互感器误差来源,对两组数据进行分析,测试次数 1 到 10 次,选取 ± 800 kV 电压等级的 15%~45%.在 45% 以上的无线传输误由于同步异常产生差较大已忽略,如图 8 所示.

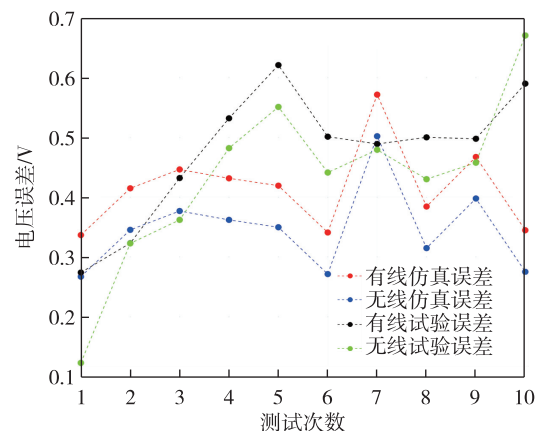


图 8 有线测量与无线测量数据对比

Fig. 8 Comparison of wired and wireless measurement data

图 8 是基于无线直流电压互感器校验装置误差分析的仿真结果与在锦屏—苏州 ± 800 kV 线路的试

验结果对比.因有线传输多一段同轴电缆有线误差,仿真结果中有线计量误差始终比无线计量误差多0.069%,而试验结果中无线计量误差比有线计量小,但随测试电压上升,第10次超过300 kV时,无线计量误差会超过有线计量误差.

5 结论

1)本文基于无线通信技术和北斗同步技术设计了一套无线直流电压校验装置,并使用该设备在锦屏—苏州 ± 800 kV 直流换流站进行电压校验,校验结果表明:由于无线传输不会因为信号通过同轴电缆传输产生误差,无线直流电压校验装置比有线校验装置能更精准地校验互感器.但由于电磁环境对无线传输的干扰会使得部分数据同步异常导致计量误差.

2)针对特高压直流输电中强电磁大电场环境对无线通信技术的干扰,本文仿真模拟出 ± 80 kV ~ ± 500 kV 直流电场与电磁环境.结合电磁环境与无线通信误差分析,仿真出电压偏差状况,并与实际工程试验结果进行对比.结果表明:无线直流电压校验装置误差主要来自于互感器误差、同轴电缆产生误差与电磁干扰对无线通信影响.

3)根据本文误差分析,为提高计量精度可采用无线计量方式或减小有线计量电缆距离、减小被测线路高频谐波、设置无线计量装置检测位置使被试侧与标准侧避开高电磁环境区域.

参考文献

References

- [1] 郑欣,汪司珂,庞博,等.直流电流互感器现场检测方法及应用[J].电测与仪表,2015,52(增刊1):119-123
ZHENG Xin, WANG Sike, PANG Bo, et al. The method and application of DC current transformer test in field [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52 (sup1): 119-123
- [2] Barnes M, van Hertem D, Teeuwssen S P, et al. HVDC systems in smart grids [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(11): 2082-2098
- [3] 张杰,胡媛媛,刘飞,等.高压直流互感器现场校验关键技术[J].高电压技术,2016,42(9):3003-3010
ZHANG Jie, HU Yuanyuan, LIU Fei, et al. Critical technology of on-site calibration system for DC electronic instrument transformer [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 3003-3010
- [4] Hallstrom J, Bergman A, Dedeoglu S, et al. Performance of a modular wideband HVDC reference divider for voltages up to 1000 kV [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1390-1397
- [5] Bergman A, Pogliano U, Hällström J, et al. Metrology for high voltage direct current [C] // 2010 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2010, DOI: 10.1109/CPEM.2010.5543404
- [6] 冯凌,侯兴哲,张喜,等.基于无线通信技术的互感器校验仪的研制[J].电测与仪表,2014,51(6):14-18
FENG Ling, HOU Xingzhe, ZHANG Xi, et al. Development of transformer calibrator based on wireless communication technology [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(6): 14-18
- [7] 熊前柱,李前,胡浩亮,等.电力互感器在线校准无线数据传输系统的研制[J].电测与仪表,2014,51(9):13-16,34
XIONG Qianzhu, LI Qian, HU Haoliang, et al. Development of a wireless data transmission system used for power transformer on-line calibration [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(9): 13-16, 34
- [8] 柏航,徐雁,肖霞,等.HVDC 电子式电流互感器现场校准方法及关键问题[J].中国电机工程学报,2016,36(19):5227-5235,5404
BAI Hang, XU Yan, XIAO Xia, et al. Research on field calibration methods and key problems for HVDC electronic current transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5227-5235, 5404
- [9] 李登云,李鹤,熊魁,等.直流 OCT 与 FOCT 的误差特性分析和比较[J].现代电子技术,2017,40(24):154-159
LI Dengyun, LI He, XIONG Kui, et al. Error characteristic analysis and comparison of DC OCT and FOCT [J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(24): 154-159
- [10] 侯崇学,杨启兵,王顺超,等.直流电子式互感器计量性能综合误差研究[J].电子测试,2019(1):45-48,73
HOU Songxue, YANG Qibing, WANG Shunchao, et al. Research on metering performance of analog-input merging unit synthetic error [J]. Electronic Test, 2019 (1): 45-48, 73
- [11] 徐天宇.单/多载波数字调制信号的最佳干扰样式研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018
XU Tianyu. Optimal jamming analysis against single/multi carrier digital modulation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018
- [12] 王敬高.复杂电磁环境中通信系统的电磁干扰作用过程建模仿真与应用研究[D].杭州:浙江大学,2019
WANG Jinggao. Study on modeling and simulation methods for characterizing electromagnetic interference process of communication systems operating in complex electromagnetic environment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019
- [13] 李旭彦.基于 ZigBee 的无线通信模块射频电磁场抗干扰性能研究[D].北京:华北电力大学,2012
LI Xuyan. Research on anti-disturbance performance of ZigBee wireless communication module under radio frequency electromagnetic field [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012
- [14] Saponara S, Ciampi G. Electrical and electromagnetic measurements of an inductorless DC/DC converter [C] // IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2017, DOI: 10.1109/

I2MTC.2017. 7969651

- [15] Zou Z L, Ju Y, Zhang X, et al. Measurement of ground-level charge density under a HVDC conductor with presence of fine particles [C] // 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016, DOI: 10. 1109/I2MTC.2016. 7520596
- [16] Zou Z L, Cui X, Lu T B. Upstream boundary element method for calculating the ionized field of the high voltage direct current conductor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(6): 2424-2431
- [17] 李新峰,郝晓军,韩慧,等.基于误码率的通信系统电磁干扰效应研究[J].微波学报,2017,33(1):71-76
- LI Xinfeng, HAO Xiaojun, HAN Hui, et al. Electromagnetic interference effect research of communication system based on SER [J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(1): 71-76

Error analysis of DC voltage transformer calibration method based on wireless transmission in strong electromagnetic environment

ZHONG Jinsong¹ NIE Qi² ZENG Feitong² LI Ning¹ HU Haoliang² ZHANG Jianwen¹

1 State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Urumqi 830011

2 China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430074

Abstract In this article, we propose a wireless DC voltage transformer calibration method and related hardware design for Jinping— Suzhou ± 800 kV DC converter station to conduct error validation test on DC voltage transformer. The proposed method is based on wireless communication and Beidou synchronous technology to solve the issue of long distance between the DC transformer voltage divider and the secondary communication measuring system. The test results show that a minor deviation is observed in wireless calibration test on measurement of low voltage. While on measurement of high voltage, the GPS positioning and synchronization are affected owing to the high voltage and strong electromagnetic environment, which produce instability and minor deviation of the calibration. To resolve this problem, the characteristics of wireless calibration system of DC voltage transformers are analyzed under interference of complex electromagnetic environment, and a solution is proposed to reduce the error generated in DC voltage transformers using wireless transmission approach. This will avail the development of wireless calibration technology for DC voltage transformers.

Key words DC voltage transformer; wireless communication; Beidou synchronization; electromagnetic interference