

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221208

特高压交流输变电工程工频电场测量及不确定度分析

张建功, 鲁浩男, 万 皓, 徐吉来, 滕子涵

(中国电力科学研究院有限公司电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了解特高压交流输变电工程所产生的工频电场水平是否满足相关要求, 采用 EFA-300 工频场强仪对锡盟一胜利 1 000 kV 交流输变电工程变电站和输电线路横断面进行现场实测, 并评估了测量结果不确定度。结果表明, 变电站厂界测量值最大为 3.65 ± 0.18 kV/m (包含因子 $k=2$), 低于变电站厂界电场限值 (4 kV/m); 线路横断面测量值最大为 5.41 ± 0.28 kV/m ($k=2$), 低于架空输电线路下方电场限值 (10 kV/m), 均满足国家相关标准要求; 场强仪自身误差的影响最大, 可通过提高工频场强仪校准准确度来降低工频电场测量不确定度。

关键词: 特高压; 变电站; 输电线路; 工频电场强度; 不确定度

中图分类号: TM835.4; TM937.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0202-04

1 引言

特高压交流输变电作为远距离电力输送的关键技术已成为电网的重要组成部分, 其电磁环境问题受到广泛关注^[1,2]。《电磁环境控制限值》(GB 8702-2014)^[3]中规定环境中工频电场公众暴露限值为 4 kV/m, 架空输电线路下耕地、道路等场所工频电场限值为 10 kV/m。因此, 工频电场的准确测量对于输变电工程环境评价及竣工验收具有重要意义^[3-5]。目前对 750 kV 以下电压等级的输变电工程工频电场测量研究较多, 如罗鹏等^[6]在 500 kV 变电站内及设备附近测量了工频电场并进行对比; 林旗力等^[7]测量了城市 220 kV 户内变电站厂界的工频电场, 并计算了测量值的标准差; 张泽林^[8]测量了珠海电网 110、220、500 kV 变电站的工频电场并分析了电场分布特性及影响因素; 梁振光等^[9]测量了 500 kV 变电站厂区内的工频电场, 研究了变电站厂区内电场分布特性。然而, 目前关于特高压输变电工程工频电场测量的研究较少, 且相关研究中大多数直接给出了测量结果, 并未分析测量结果不确定度^[10-12]。鉴于此, 本文采用 EFA-300 工频场强仪对锡盟一胜利特高压交流工程变电站及输变电线路横断面进

行现场实测, 分析了测量中引入的不确定度来源, 计算了不确定度大小, 为输变电工程工频电场的准确测量提供了参考。

2 测量对象与测量方法

2.1 测量对象

锡盟一胜利特高压交流输变电工程包括新建胜利 1 000 kV 变电站、扩建锡盟 1 000 kV 变电站及锡盟一胜利双回特高压输电线路, 线路全长 240 km, 途经锡林浩特市、正蓝旗和多伦县。本文对锡林郭勒盟境内的胜利变电站、锡盟变电站厂界的工频电场进行测量, 变电站概况见表 1^[13]。另外, 在锡盟一胜利特高压交流输电线路[#]069-[#]070 杆塔档距中央弧垂最低处, 测量线路横断面工频电场, 并分别对变电站及输电线路横断面测量结果进行不确定度分析。

表 1 变电站概况

Tab. 1 The substation overview

名称	锡盟变电站	胜利变电站
主变压器	1×3 000 MVA	2×3 000 MVA
1 000 kV 出线	4 回	2 回
500 kV 出线	3 回	3 回
围墙	砖式围墙	砖式围墙

2.2 测量仪器及测量方法

采用经校准的 EFA-300 工频场强仪及配套

收稿日期: 2022-06-08, 修回日期: 2022-08-14

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(GYW1720200201)

作者简介: 张建功(1975-), 男, 博士、教授级高级工程师, 研究方向为电力系统电磁兼容和电磁环境, E-mail: zhangjiangong@epri. sgcc. com. cn

绝缘支架,依据相关规范开展测量^[14-16]。测量环境温度不超过 28.0 ℃,相对湿度不超过 60.0%,测量地点选择在地势平坦、远离树木的空地上,电场探头架设在支架上,操作人员远离探头以减小探头附近电场的畸变,记录地面上方 1.5 m 处工频电场幅值,每 1 min 读取一个数,取 5 min 读数的平均值作为测量值的估计值。

3 测量结果与分析

3.1 胜利变电站工频电场测量

在胜利变电站围墙外 5 m 处布置 10 个测量点进行测量,测点布置见图 1。

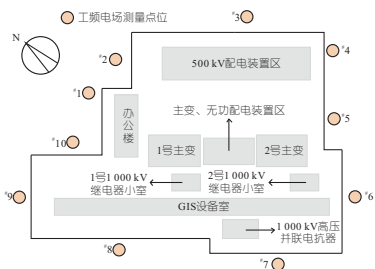


图 1 胜利变电站测量布点图

Fig. 1 Shengli substation measurement layout

测量开始时环境温度 24.0 ℃,相对湿度 42.0%,风向为南,风速 0.5 m/s;测量结束时环境温度 25.0 ℃,相对湿度 39.0%,风向为南,风速 0.8 m/s。测量结果见表 2。

表 2 胜利变电站工频电场测量结果

Tab. 2 Measurement results of power frequency electric field in Shengli substation

测量点 序号	测量值 /(kV·m ⁻¹)	测量点 序号	测量值 /(kV·m ⁻¹)	测量点 序号	测量值 /(kV·m ⁻¹)
#1	0.03	#5	0.14	#9	0.04
#2	0.03	#6	0.09	#10	0.04
#3	0.86	#7	1.14		
#4	0.40	#8	0.04		

由图 1、表 2 可知,胜利变电站 1 000 kV 配电装置区在站区西南侧, #7 测点在 1 000 kV 西南出线下方,测量值为 1.14 kV/m; #8 测点在站区南侧,与 1 000 kV 出线距离较远,测量值为 0.04 kV/m。500 kV 配电装置区在站区东北侧, #3 测点在 500 kV 向北出线下方,测量值为 0.84 kV/m; #4 测点在站区东侧,500 kV 配电装置区附近,测量值为 0.40 kV/m。#1、#2、#10 测点在站区北侧,办公楼外侧,由于建筑物屏蔽效应,测量值均较小,分别为 0.03、0.03、0.04 kV/m。#5 测点在 2 号主变压器附近,周围无高压出线,测量值较小,为 0.14 kV/m。#6、#9 测点分别位于 1 000 kV 配电装置区东南、西北方向,周围无高

压出线,测量值均较小,分别为 0.09、0.04 kV/m。

3.2 锡盟变电站工频电场测量

在锡盟变电站围墙外 5 m 处布置 9 个测量点进行测量,测点布置见图 2。

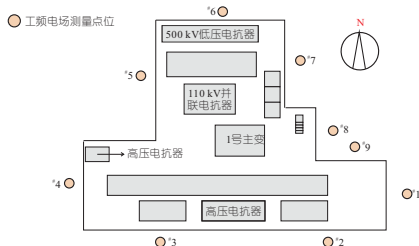


图 2 锡盟变电站测量布点图

Fig. 2 Ximeng substation measurement layout

测量开始时环境温度 28.0 ℃,相对湿度 23.0%,风向为西南,风速 0.5 m/s;测量结束时环境温度 27.0 ℃,相对湿度 33.0%,风向为东北,风速 0.9 m/s。测量结果见表 3。

表 3 锡盟变电站工频电场测量结果

Tab. 3 Measurement results of power frequency electric field in Ximeng substation

测量点 序号	测量值 /(kV·m ⁻¹)	测量点 序号	测量值 /(kV·m ⁻¹)	测量点 序号	测量值 /(kV·m ⁻¹)
#1	0.03	#4	0.05	#7	0.03
#2	0.06	#5	0.97	#8	0.31
#3	3.65	#6	0.10	#9	0.02

由图 2、表 3 可知,锡盟变电站 1 000 kV 配电装置区在站区南侧, #3 测点在 1 000 kV 向南出线西侧,与 1 000 kV 线路水平距离较近,测量值较大,为 3.65 kV/m; #2 测点在 1 000 kV 出线东侧,与线路水平距离较远,测量值较小,为 0.06 kV/m。#6 测点在站区北侧,500 kV 配电装置区附近,与高压出线距离较远,测量值较小,为 0.10 kV/m。#1、#7、#8、#9 测点在主变压器及无功补偿装置区域东侧,站区东侧无高压出线,但 #8 测点与 1 号主变距离较近,测量值分别为 0.03、0.03、0.31、0.02 kV/m。#4 测点站区西南方向,周围无高压出线且与 1 000 kV 配电装置区距离较远,测量值较小,为 0.05 kV/m。#5 测点在站区西侧,1 000 kV 向北出线东侧,测量值为 0.97 kV/m。

3.3 输变电线路横断面工频电场测量

在锡盟—胜利输变电线路 #069-#070 杆塔档距中央,导线弧垂最低处设置测量横断面,线路为同塔双回垂直方式布置,两回线路水平距离为 36.0 m,地面工频电场具有横向分布特性,从线路中心向一侧导线方向测量即可得到整个横断面的工频电场分布^[17]。因此,在两回线路中央布置一个测量点,锡胜 I 线下方布置一个测量点,锡胜

I 线内每隔 2 m 布置一个测量点;锡胜 I 线外 20 m 内每隔 2 m 布置一个测量点;锡胜 I 线外 20~50 m 范围内,每隔 5 m 布置一个测量点。线路横断面测量布点见图 3。

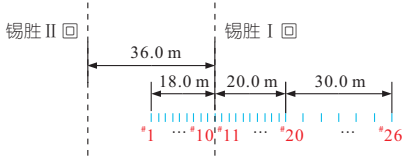


图 3 输电线路横断面测量布点图

Fig. 3 Transmission line cross-section measurement layout

测量开始时环境温度 21.0 °C,相对湿度 34.0%,风向为北,风速 1.0 m/s;测量结束时环境温度 23.0 °C,相对湿度 34.0%,风向为南,风速 1.6 m/s。测量结果见表 4。

表 4 线路横断面工频电场测量结果

Tab. 4 Measurement results of power frequency electric field in line cross section kV/m

测量点 序号	测量 值	测量点 序号	测量 值	测量点 序号	测量 值	测量点 序号	测量 值
# 1	2.73	# 8	4.80	# 15	4.67	# 22	1.97
# 2	2.79	# 9	5.22	# 16	4.48	# 23	1.47
# 3	2.99	# 10	5.33	# 17	4.23	# 24	0.99
# 4	3.29	# 11	5.41	# 18	3.84	# 25	0.71
# 5	3.61	# 12	5.31	# 19	3.61	# 26	0.49
# 6	4.19	# 13	5.05	# 20	3.37		
# 7	4.63	# 14	4.92	# 21	2.65		

一般地,随着测点与线路水平距离的增加,地面工频电场强度逐渐减小,但由图 3、表 4 可知,由于同塔双回线路电场相互影响,两回线路投影之间电场相对较低,两回线路中心点电场为 2.73 kV/m;电场最大值出现在锡胜 I 回导线对地投影外侧 2 m 处,为 5.41 kV/m;锡胜 I 回导线对地投影外侧 2 m 外,随测点与线路水平距离的增加,电场测量值迅速减小,在水平距离 50 m 处,电场仅为 0.49 kV/m。

4 测量不确定度评定

为研究特高压变电站和输电线路横断面工频电场是否满足国家相关标准要求,选取胜利变电站和线路横断面中最大测量值分别评定不确定度,测量数据见表 5。

4.1 不确定度评定数学模型

工频电场测量属于直接测量,被测量值由场强仪的示值直接给出:

$$E = E_r \quad (1)$$

式中, E 为场强仪测量示值, kV/m; E_r 为测点工频电场真实值, kV/m。

表 5 变电站、输电线路测量数据

Tab. 5 Measurement data of substations and transmission lines

序号	测量值/(kV·m ⁻¹)	
	变电站 3 号测量点	横断面 11 号测量点
1	3.65	5.40
2	3.65	5.41
3	3.64	5.41
4	3.65	5.41
5	3.65	5.41

工频电场测量不确定度来源主要包括:①电场重复性测量引入的标准不确定度 u_A ;②场强仪自身误差引入的标准不确定度 u_{B1} ;③数值修约引入的标准不确定度 u_{B2} ;④场强仪示值分辨力引入的标准不确定度 u_{B3} [18-20]。

4.2 标准不确定度计算

根据《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1-2012)规定[21],本文计算不确定度分量时分别保留多位有效数字,以避免连续计算导致的误差,合成标准不确定度及扩展不确定度取两位有效数字,被测量估计值末位与不确定度末位一致。

4.2.1 电场重复性测量引入的标准不确定度 u_A

采用标准不确定度 A 类评定方法,分析测点 5 次重复测量结果,以算术平均值作为被测量的估计值 \bar{E} :

$$\bar{E} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n E_i \quad (2)$$

式中, E_i 为电场测量值。

利用 Bezier 公式计算测量值的样本标准差 $s(E)$:

$$s(E) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \quad (3)$$

式中, E 为电场测量值。

则平均值的标准不确定度 u_A 为:

$$u_A = s(E) / \sqrt{n} \quad (4)$$

按式(2)~(4),计算变电站和输电线路横断面电场重复测量不确定度分量分别为 $u_{As} = 0.0020$ kV/m、 $u_{Al} = 0.0020$ kV/m。其中,下标 s 、 l 分别表示变电站电场、输电线路横断面电场重复测量的不确定度分量。

4.2.2 场强仪自身误差引入的标准不确定度 u_{B1}

校准证书给出 0~20 kV/m 范围内,EFA-300 工频场强仪测量的扩展不确定度为 $0.05E + 0.0050$ kV/m,包含因子 $k_1 = 2$ 。以算术平均值作为被测量的估计值,则场强仪自身误差引入的标准不确定度 u_{B1} 为:

$$u_{B1} = (0.05\bar{E} + 0.0050) / 2 \quad (5)$$

按式(5)计算变电站和输电线路横断面测量

中由场强仪自身误差引入的标准不确定度分量分别为 $u_{B1s} = 0.0938 \text{ kV/m}$ 、 $u_{B1l} = 0.1378 \text{ kV/m}$ 。

4.2.3 数值修约引入的标准不确定度 u_{B2}

数值修约引入的误差服从均匀分布,修约间隔 $a_1 = 0.01 \text{ kV/m}$,则区间半宽度 $a_2 = 0.005 \text{ kV/m}$,在置信水平 $p = 1$ 条件下,取包含因子 $k_2 = \sqrt{3}$,则标准不确定度分量 u_{B2} 为:

$$u_{B2s} = u_{B2l} = a_2/k_2 = 0.0029 \text{ kV/m} \quad (6)$$

4.2.4 仪器示值分辨力引入的标准不确定度 u_{B3}

场强仪示值分辨力引入的误差服从均匀分布,最低位数字变化差为 1 V/m ,则区间半宽度 $a_3 = 0.0005 \text{ kV/m}$,在置信水平 $p = 1$ 条件下,取包含因子 $k_3 = \sqrt{3}$,则标准不确定度分量 u_{B3} 为:

$$u_{B3s} = u_{B3l} = a_3/k_3 = 0.0003 \text{ kV/m} \quad (7)$$

4.3 测量不确定度评定结果及分析

将计算的电场重复性测量、场强仪自身误差、数值修约及仪器示值分辨力引入的标准不确定度大小进行汇总,见表 6。表 6 中, u_s 、 u_l 分别为变电站电场、线路横断面电场测量不确定度分量。

表 6 标准不确定分量汇总表

Tab. 6 Summary of standard uncertain components

序号	不确定度来源	概率分布	包含因子 k	不确定度分量 u_s /($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)	不确定度分量 u_l /($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	重复性测量	正态		0.002 0	0.002 0
2	场强仪自身误差	正态	2	0.093 8	0.137 8
3	数值修约	均匀	$\sqrt{3}$	0.002 9	0.002 9
4	仪器示值分辨率	均匀	$\sqrt{3}$	0.000 3	0.000 3

假定不确定度分量相互独立,可计算合成不确定度 u_c :

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (8)$$

式中, u_i 为第 i 个标准不确定度分量; n 为不确定度分量个数。

按式(8)计算合成标准不确定度分别为 $u_{cs} = 0.09 \text{ kV/m}$ 、 $u_{cl} = 0.14 \text{ kV/m}$ 。

在置信概率约为 95% 的情况下,取包含因子 $k_4 = 2$,则扩展不确定度分别为:

$$U_s = k_4 u_{cs} = 0.18 \text{ kV/m} \quad (9)$$

$$U_l = k_4 u_{cl} = 0.28 \text{ kV/m} \quad (10)$$

因此,变电站工频电场最大测量值为 $3.65 \pm 0.18 \text{ kV/m}$ ($k=2$),输电线路横断面工频电场最大测量值为 $5.41 \pm 0.28 \text{ kV/m}$ ($k=2$),均满足国家相关标准要求。分析电场测量中引入的不确定度分量,发现场强仪自身误差影响最大,进一步可通过提高工频电场校准技术降低工频电场测量的不确定度。

5 结论

a. 所选变电站工频电场最大测量值为 $3.65 \pm 0.18 \text{ kV/m}$ ($k=2$),低于标准规定的工频电场公众曝露限值(4 kV/m),满足《电磁环境控制限值》(GB 8702-2014)要求。

b. 所选输电线路横断面工频电场最大测量值为 $5.41 \pm 0.28 \text{ kV/m}$ ($k=2$),低于标准规定的架空输电线路下工频电场限值(10 kV/m),满足《电磁环境控制限值》(GB 8702-2014)要求。

参考文献:

- [1] 韩先才,孙昕,陈海波,等. 中国特高压交流输电工程技术发展综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(14):4371-4386,4719.
- [2] 郭昆丽,秦文浩,杨昊,等. 人体对工频电场测试仪测量准确度的影响分析[J]. 水电能源科学,2020,38(5):163-167.
- [3] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 电磁环境控制限值:GB 8702-2014[S]. 北京:中国环境科学出版社,2014.
- [4] 周想凌,刘勇. 特高压交流试验示范工程运营情况分析[J]. 水电能源科学,2013,31(3):169-172.
- [5] 王莎莎,黄川友,殷彤,等. 拟建户外型变电站周围电磁环境影响预测[J]. 水电能源科学,2016,34(2):190-194.
- [6] 罗鹏,杨峰,周君杰,等. 500 kV 超高压变电站整体工频电场仿真计算与测量分析[J]. 电工电能新技术,2016,35(9):67-73.
- [7] 林旗力,余飞,宋凯. 基于实测的城市 220 kV 户内变电站站界电磁环境分析[J]. 电力科技与环保,2022,38(1):56-64.
- [8] 张泽林. 珠海地区电网 500 kV、220 kV、110 kV 变电站工频电场强度的测量与分析[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [9] 梁振光,董霞,郑路,等. 500 kV 变电站工频电场的测量与分析[J]. 高电压技术,2006(11):81-83,122.
- [10] 全国认证认可标准化技术委员会. 测量不确定度评定和表示 补充文件 1:基于蒙特卡洛方法的分布传播:GB/T 27419-2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [11] 全国认证认可标准化技术委员会. 测量不确定度评定和表示:GB/T 27418-2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [12] 中国合格评定国家认可委员会. 检测和校准实验室能力认可准则:ISO/IEC 17025:2017[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [13] 杜乐,锡盟 1000kV 特高压变电站噪声治理措施研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2018.
- [14] 中国电力企业联合会标准化中心. 高压交流架空送电线路、变电站工频电场和磁场测量方法:DL/T 988-2005[S]. 北京:中国环境科学出版社,2005.

维护的工作量。在湖南洪江水电站,近三年来应用了第三代急停装置后,从未出现过误动作停机的情况,为水电厂机组安全稳定运行奠定了基础。

4 结论

a. 通过对比分析某大型水电厂水轮机调速器急停装置迭代优化方案,发现历经三代升级,基于双电磁阀搭配联动阀的水轮机调速器紧急停机装置既满足了“失电动作”规则的要求,又完善了对急停阀状态的监控;消除了急停装置因本身线圈故障或阀芯卡涩导致误停机的重大隐患。

b. 通过双重两位电磁阀搭建先导级控制阀组的思路,可为水电站调速器机械液压系统后续方

案优化提供借鉴。该技术现场应用情况良好,具有现实工程意义,在水电厂极具推广价值。

参考文献:

[1] 魏守平. 水轮机调节[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009.

[2] 陈永兴. 水轮机调速系统应用及其故障维修分析[J]. 科学与信息化,2019(13):80,83.

[3] 缪新建. 调速器故障原因分析及处理措施[J]. 华电技术,2010,32(10):48-49,54.

[4] 陈宏州. 水轮机调速器系统及故障处理技术分析[J]. 建筑工程技术与设计,2018(14):1557.

[5] 郑森,陈开超. 水电机组调速器压油装置控制设备改造[J]. 红水河,2019,38(5):94-96.

[6] 孙伟华. 调速器在水轮发电机组中的应用分析[J]. 机电信息,2011(30):62-63.

Study on Iterative Upgrade of Emergency Stop Device for Hydraulic Turbine Governor in a Hydropower Plant

ZHONG Yong

(SPIC Sichuan Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The emergency shutdown device of the hydro-generator governor should not only meet the requirements of "power loss action" in the 25 anti-accident measures, but also avoid the hidden danger of unplanned outage of the unit caused by the electromagnetic valve coil of the device being charged for a long time and easy to burn. This paper introduces three generations of technical improvement of the emergency shutdown device of hydro-generator governor of a large hydropower station, from double electromagnet two-position solenoid valve, single electromagnet spring return two-position solenoid valve to double solenoid valve and linkage valve, expounds their working principle and compares their respective advantages and disadvantages. It is proved that the emergency stop device of hydro-generator governor based on double solenoid valve and linkage valve is a practical and reliable emergency stop control optimization scheme of speed regulating system, which has great popularization value in hydropower plants.

Key words: water wheel generator; governor of speed; emergency stop device; double solenoid valve; linkage valve

(上接第 205 页)

[15] 特高压交流输电标准化技术工作委员会. 1 000 kV 输变电工程电磁环境影响评价技术规范:DL/T 1185-2012[S]. 北京:中国电力出版社,2012.

[16] 电力行业环境保护标准化技术委员会. 输变电工程电磁环境监测技术规范:DL/T 334-2010[S]. 北京:中国电力出版社,2011.

[17] 姚德贵,张广洲,张嵩阳,等. 交直流线路并行架设时的电磁环境横向分布监测[J]. 水电能源科学, 2020,38(2):181-183,188.

[18] 胡建根,顾正皓,包劲松,等. 数据校正 在汽轮机热力性能监测中的应用[J]. 中国电力,2018,51(12): 124-131.

[19] 王瑶,李宁. 电场辐射敏感度测量不确定度评定的研究[J]. 电子测试,2020(4):48-49.

[20] 潘珺. 离子色谱法测量发电厂水汽系统蒸汽钠离子的不确定度评定[J]. 中国电力,2015,48(11):34-38.

[21] 全国法制计量管理计量技术委员会. 测量不确定度评定与表示:JJF 1059. 1-2012[S]. 北京:中国质检出版社,2013.

Power Frequency Electric Field Measurement and Uncertainty Analysis of UHV AC Power Transmission and Transformation Project

ZHANG Jian-gong, LU Hao-nan, WAN Hao, XU Ji-lai, TENG Zi-han
(State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to understand whether the power frequency electric field level generated by the UHV AC power transmission and transformation project meets the relevant requirements, this paper uses the EFA-300 power frequency field strength meter to conduct the cross-section of the substation and transmission line of the Ximeng-Shengli 1 000 kV AC power transmission and transformation project, and evaluate the uncertainty of the measurement results. The results show that the maximum measured value of the substation boundary is $(3.65 \pm 0.18) \text{ kV/m}$, $k=2$, which is lower than the electric field limit of the substation boundary, 4 kV/m ; the maximum measured value of the line cross-section is $(5.41 \pm 0.28) \text{ kV/m}$, $k=2$, which is lower than the electric field limit below the overhead transmission line, 10 kV/m , which meets the requirements of relevant national standards. It is found that the error of the field strength meter has a great influence. The uncertainty of the power frequency electric field measurement can be reduced by improving the calibration accuracy of the power frequency field strength meter. This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China-Research on Power Frequency Electric Field Calibration Technology (GYW1720200201).

Key words: UHV; substation; transmission lines; power frequency electric field strength; uncertainty