

## 不同电压等级变电站工频电磁场暴露状况调查

李华亮<sup>1</sup>, 李丽<sup>1</sup>, 曾广诚<sup>1</sup>, 陈青松<sup>2</sup>, 刘嘉文<sup>1</sup>

**摘要:** [目的] 探讨电网企业不同类型变电站工频电磁场及个体磁场暴露状况。[方法] 选取广东某供电局 3 座不同电压等级变电站及办公场所, 对工作环境的电磁场强度进行检测, 并对典型作业人员进行个体磁场暴露水平测量。[结果] 500 kV 变电站区域电场强度最高, 其中隔离刀母线下方电场强度达到 11.573 kV/m。电抗器及大电流母线排附近磁感应强度最高, 例如在 500 kV 变电站内的 35 kV 电抗器附近可测得磁感应强度达到 767.79  $\mu$ T。办公室工频电磁场强度比变电站职业环境小得多。由于 500、220 kV 变电站内具有较多的大电流和高磁场源设备, 因此随着变电站电压等级升高, 个体磁场暴露水平逐渐升高, 其中, 500 kV 变电站个体磁场暴露水平分别为  $(1.50 \pm 0.01) \mu$ T 和  $(3.90 \pm 1.32) \mu$ T, 而办公室人员均值水平介于  $(0.02 \pm 0.23) \sim (0.11 \pm 0.10) \mu$ T。[结论] 电网企业不同工作环境电磁场强度差异较大, 500 kV 及 220 kV 运行人员有接触高强度电场和高水平工频磁场的风险。

**关键词:** 变电站; 工频电磁场; 个体磁场暴露水平

**Exposure to Power Frequency Electromagnetic Field in Different Voltage Substations** LI Hua-liang<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, ZENG Guang-cheng<sup>1</sup>, CHEN Qing-song<sup>2</sup>, LIU Jia-wen<sup>1</sup> (1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangdong 510080, China; 2. Guangdong Prevention and Treatment Center for Occupational Diseases, Guangdong 510300, China). Address correspondence to LI Li, E-mail: liligz@163.com • The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

**Abstract:** [Objective] To investigate the status of individual occupational exposure to power frequency electromagnetic field (EMF) in different substations. [Methods] The EMF density in the workplaces of three different voltage substations and the workers' individual exposure levels of power frequency magnetic field were gauged. [Results] The electric field densities recorded in the proximity of the 500 kV substation were higher than the other workplaces, of which the highest recorded electric field density was located under the disconnect switch bus bar (11.573 kV/m). The magnetic flux density values near high-current bus bar and reactors were the highest (767.79  $\mu$ T). The value of EMF density reduced gradually with the voltage grade, and the lowest value was located in the office areas. The individual exposure levels of power frequency magnetic field were  $(1.50 \pm 0.01) \mu$ T and  $(3.90 \pm 1.32) \mu$ T in the 500 kV and the 220 kV substations respectively, and ranged from  $(0.02 \pm 0.23) \mu$ T to  $(0.11 \pm 0.10) \mu$ T in the office areas. [Conclusion] Significant differences of electromagnetic field density distribution are found in various work places. Potential health risk could be expected in workers exposed to high electric field density and high magnetic field exposure levels of 500 kV or 220 kV substations.

**Key Words:** substations; power frequency electromagnetic field; individual magnetic field exposure levels

目前, 我国电网企业主要的交流变电站类型包括 500、220、110 kV 等不同电压等级, 作为长期在变电站工作的职业接触人员, 其所接触的磁场大小各不相同。因此, 本研究拟通过现场调查和检测, 观察电网企业工人工作区域工频电磁场强度, 并对职业暴露人群进行个体磁场暴露水平测量, 掌握电网企业不同电压等级变电站工人个体磁场暴露情况, 为职业人群工频电磁场防护和标准的制定提供依据。

[作者简介] 李华亮 (1983—), 男, 博士, 工程师; 研究方向: 电力行业环境保护和职业卫生; E-mail: li-hualiang@163.com

[通信作者] 李丽高级工程师, E-mail: liligz@163.com

[作者单位] 1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 510080; 2. 广东省职业病防治院, 广东 510300

### 1 对象与方法

#### 1.1 调查对象

本研究选取广东省某供电局 500 kV、220 kV 和 110 kV 运行值班人员及办公室文职人员为调查对象, 对其工作环境电场和个体磁场暴露水平进行测量。其中, 办公室文职人员不进入变电站工作区域, 作为对照人群。

#### 1.2 基本情况调查

通过访谈调查对象, 了解变电站站长、班长、巡视值班人员以及办公室人员工作情况, 了解变电站电气设备的布局、工人作业内容、作业方式、作业时间等基本情况。

#### 1.3 测量仪器

作业环境工频电磁场测定, 使用意大利 PMM 公司生产的 8053A 型电磁辐射分析仪, 配用 EPH-50B 低频电-磁场测量探

头,各向同性。测量范围:电场强度 0.01~100 kV/m;磁感应强度 1 nT~10 mT;频率范围 5 Hz~100 kHz<sup>[1-2]</sup>。

变电站内巡视值班人员的个体磁场暴露水平的测定,采用美国 EMDEX MATE Meter 个体磁场测量仪进行抽样测量<sup>[3]</sup>,所测数据主要包括最大值、均值和标准差( $\bar{x} \pm s$ ),以及各区域值所占的比例。

#### 1.4 测点及抽样

测点设在作业人员因工作需要而经常停留的地点与主要电气设备附近。根据变电站运行方式,每班抽取一名典型作业方式的工人在腰间悬挂佩戴个体磁场测量仪,监测 3 个工作日。按照统一表格做好各项记录并要求工人进行工作内容写实调查。

## 2 结果

### 2.1 环境区域测量结果

本次测量的工作环境包括办公室及 500 kV、220 kV 和 110 kV 变电站,结果见表 1。由表 1 数据可见,不同区域所测得的工频电磁场强度差异较大,办公室工频电磁场强度最低。

表 1 不同电压等级变电站工频电场与磁场测量结果

| 区域         | 测量点          | 距离<br>(m) | 工频电场<br>(kV/m) | 工频磁场<br>( $\mu$ T) |
|------------|--------------|-----------|----------------|--------------------|
| 500 kV 变电站 | 1#主变压器进线侧    | 2         | 1.1910         | 6.782              |
|            | 1#主变压器出线侧    | 2         | 0.8890         | 28.590             |
|            | 构架 隔刀母线      | 正下方       | 11.5730        | 20.995             |
|            | 信息机房         | 室内        | 0.0008         | 0.123              |
|            | 主控室          | 室内        | 0.0002         | 0.263              |
|            | 隔离开关         | 2         | 9.3490         | 2.459              |
|            | 35 kV 电抗器    | 4         | 0.7970         | 767.790            |
| 220 kV 变电站 | 耦合电容器        | 4         | 6.3830         | 69.480             |
|            | 1#主变压器       | 1         | 0.4740         | 2.542              |
|            | 3#主变压器       | 1         | 1.6020         | 4.553              |
|            | 构架 某乙线避 C 相  | 正下方       | 9.0390         | 10.070             |
|            | 构架 某乙线避 B 相  | 正下方       | 3.0730         | 9.488              |
|            | 构架 某乙线避 A 相  | 正下方       | 1.4120         | 7.925              |
|            | 主控室          | 室内        | 0.0003         | 0.177              |
|            | 2673 隔离开关    | 2         | 0.2570         | 19.040             |
|            | 1#电抗器室       | 4         | 0.0440         | 81.890             |
|            | 2#电抗器室       | 4         | 0.0070         | 28.230             |
| 110 kV 变电站 | 电容器组         | 4         | 0.0030         | 0.948              |
|            | 放电接地刀闸       | 2         | 0.0610         | 13.450             |
|            | 1#主变压器前      | 2         | 0.2090         | 1.212              |
|            | 2#主变压器前      | 2         | 0.2370         | 0.665              |
|            | 1#站用变压器      | 2         | 0.0080         | 2.773              |
|            | 110 kV 某甲线入线 | 正下方       | 0.7980         | 0.828              |
|            | 110 kV 某乙线入线 | 正下方       | 0.3730         | 0.622              |
|            | 开关柜前         | 2         | 0.0003         | 22.990             |
|            | 电容器侧放电合接地刀闸  | 2         | 0.1330         | 27.640             |
| 办公室        | 局本部办公室       | 室内        | 0.0007~0.0080  | 0.016~0.023        |

就电场强度而言,220 kV 及 500 kV 变电站隔离刀闸(隔刀)及一些高压端离地高度较低的设备(如避雷器)下方电场强度较大。其中 500 kV 变电站电场强度较高区域主要在 500 kV 区

域隔刀母线下方(11.573 kV/m);在 220 kV 变电站内,测得的某乙线避雷器 C 相(某乙线避 C 相)构架下方的电场强度达到 9.039 kV/m。

磁感应强度较大区域主要位于 500 kV 变电站内 35 kV 低压区电抗器附近,测得的磁感应强度达到 767.79  $\mu$ T。在 220 kV 变电站内,主要巡视路线的磁感应强度较低,较大区域也处于电抗器附近,测得的 1#和 2#电抗器附近磁感应强度分别为 81.89  $\mu$ T 和 28.23  $\mu$ T。

### 2.2 个体磁场暴露情况

从佩戴个体磁场测量仪的职工写实记录表看出,所有办公室人员一个工作周期内(24 h),均在办公室和休息区域活动,未进入高磁感应强度区域。变电站运行人员均需进行 3 次巡视作业,时间从 0.5 h 至 2 h 不等,未在变电站变电区域长久作业。所测得个体磁场暴露水平见表 2。

表 2 不同电压等级变电站工人 1 个工作周期个体磁场暴露水平结果

| 作业人员         | 编号 | 测量时间(h) | 均值<br>( $\bar{x} \pm s, \mu$ T) | 最大值<br>( $\mu$ T) | 各区域值所占比例比(%) |               |              |
|--------------|----|---------|---------------------------------|-------------------|--------------|---------------|--------------|
|              |    |         |                                 |                   | <4 $\mu$ T   | 4~100 $\mu$ T | >100 $\mu$ T |
| 办公室人员        | 1  | 24.99   | 0.02 $\pm$ 0.23                 | 21.80             | 100.0        | 约 0           | —            |
|              | 2  | 24.12   | 0.07 $\pm$ 0.05                 | 1.06              | 100.0        | —             | —            |
|              | 3  | 24.50   | 0.13 $\pm$ 0.22                 | 1.89              | 100.0        | —             | —            |
|              | 4  | 23.59   | 0.02 $\pm$ 0.70                 | 5.06              | 100.0        | 约 0           | —            |
|              | 5  | 24.03   | 0.11 $\pm$ 0.10                 | 2.60              | 100.0        | —             | —            |
|              | 6  | 23.99   | 0.04 $\pm$ 0.03                 | 1.98              | 100.0        | —             | —            |
| 110 kV 变电站人员 | 1  | 25.13   | 0.28 $\pm$ 4.00                 | 13.00             | 100.0        | —             | —            |
|              | 2  | 23.49   | 0.27 $\pm$ 0.50                 | 8.90              | 100.0        | —             | —            |
| 220 kV 变电站人员 | 1  | 23.89   | 0.32 $\pm$ 0.60                 | 22.00             | 99.3         | 0.7           | —            |
|              | 2  | 21.46   | 0.50 $\pm$ 4.30                 | 55.25             | 98.2         | 1.8           | —            |
| 500 kV 变电站人员 | 1  | 24.04   | 1.50 $\pm$ 0.01                 | 379.00            | 97.5         | 2.4           | <0.1         |
|              | 2  | 24.03   | 3.90 $\pm$ 1.32                 | 517.00            | 92.6         | 7.4           | 约 0          |

[注]—:未出现该段数据。

本研究测得办公室人员个体磁场暴露水平较低,磁感应强度介于(0.02  $\pm$  0.23)~(0.11  $\pm$  0.10)  $\mu$ T,最大磁感应强度为 21.8  $\mu$ T,该值可能出现在家用电器附近<sup>[4-5]</sup>,在 4~100  $\mu$ T 段数据所占比例接近 0%。变电站人员个体磁场暴露水平随电压等级的增高而增加。在一个测试周期内,110 kV 变电站人员均值最低,磁感应强度最大值也最小,24 h 测得所有数据中,接近 100% 数据低于 4  $\mu$ T。由于 220 kV 和 500 kV 变电站电压等级高,部分电气设备电流大,其附近的磁感应强度大,500 kV 个体磁场暴露水平介于(1.50  $\pm$  0.01)~(3.90  $\pm$  1.32)  $\mu$ T,其中最大值达到 517  $\mu$ T,低于 4  $\mu$ T 的值分别占 97.5% 和 92.6%。

## 3 讨论

随着电网规模扩大、输变电工程电压等级不断提高,变电站及输电线路的电磁环境对人体健康影响越来越受到关注<sup>[6-9]</sup>。本次对某供电局办公区域及 3 个不同电压等级变电站区域进行工频电磁场测量,并测试了办公人员及变电站运行人员个体磁场暴露水平。结果发现,不同工作区域工频电磁场强度差异较大,特别是 500 kV 变电站,部分区域的电场强度较大。

若按照我国国家标准《工作场所有害因素职业接触限值第 2 部分:物理因素》(GBZ 2.2—2007)规定 5 kV/m 的要求,隔刀母线正下方、隔离开关以及耦合电容器附近的测点均超出该值。若按国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)导则推荐的工频电场职业暴露导出限值 10 kV/m 的要求,仅有部分测点超出规定该限值。相对而言,220 kV 和 110 kV 变电站内电场强度较小,但 220 kV 变电站仍有部分区域的电场强度超出 5 kV/m 的限值。对于磁感应强度较大区域主要出现在漏磁较大的电抗器设备附近,测得 500 kV 变电站内 35 kV 并联电抗器最大磁感应强度为 767.79  $\mu$ T,超过我国电力行业标准《电力行业劳动环境监测技术规范》(DL/T 799—2010)中暴露限值 500  $\mu$ T。电压等级最低的 110 kV 变电站内电磁场强度最低,这与国内相关研究类似<sup>[10-12]</sup>。因此,在变电站职业环境执行职业暴露限值是较合理的。

在个体磁场暴露水平的测量中发现,办公室人员工频磁场暴露水平最低,工作日均磁感应强度介于 0.02~0.13  $\mu$ T。而随着变电站电压等级升高,个体磁场暴露水平逐渐升高,其中,500 kV 变电站个体磁感应强度分别为(1.50  $\pm$  0.01)  $\mu$ T 和(3.90  $\pm$  1.32)  $\mu$ T,其中一个班次瞬时最大值达到 517  $\mu$ T。从写实表中可以看出,该值可能出现在运行人员对设备巡视时较近距离经过电抗器附近,这也与国内其他研究报道水平一致<sup>[10, 13]</sup>。

本次调查发现,由于不同工作环境电磁场强度存在差异,不同岗位的工频磁场暴露水平不同。在电压等级较高的 500 kV 变电站内存在工频磁感应强度较高区域,运行人员存在高水平暴露风险。有调查研究表明,高强度工频电磁场可能影响作业人员的健康<sup>[14-15]</sup>,虽然大部分研究是未确定或未证实的危害。世界卫生组织(WHO)在 2007 年发布了针对低频电磁场健康风险的全面评估结论,确认了极低频电磁场的短期、高水平暴露相关的神经肌肉刺激效应<sup>[8]</sup>,指出遵循国际暴露标准限值可以保护公众免受此类急性效应的危害。针对工频磁场潜在的长期健康风险,WHO 建议在考虑新项目建设或设备设计时,采用低成本有效措施优化变电站和线路,降低变电站和线路附近公众环境中的工频电磁场强度。这些低成本的措施包括优化选址、设备布置、优化相序等<sup>[16]</sup>。变电站属于公众不可随意进入的职业环境,WHO 向各国推荐的两个国际标准的职业暴露限值分别为:ICNIRP 国际导则电场强度限值为 10 kV/m,磁场限值为 500  $\mu$ T(2010 年 ICNIRP 国际导则修订版电场强度限值为 10 kV/m,磁场限值为 1 000  $\mu$ T);IEEE/ICES 国际标准电场强度限值为 20 kV/m,磁场限值为 2 710  $\mu$ T。对照国际标准的职业(受控环境)暴露限值,本次测试的变电站电磁场水平并非异常,对于变电站内高电场局部区域的作业人员,应按照作业规程采取适当的防护措施,以缓解作业人员的电场效应影响;对于变电站内电抗器类设备近旁局部高磁场区域,可通过合理安排作业工人在高压变电站巡视路线及设置遮拦等措施,以减少工频

磁场暴露的潜在风险。

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

#### 参考文献:

- [1] 李丽. 关于 500 kV 变电站工频电磁场强度的研究[J]. 广东电力, 2006, 19(3): 42-45.
- [2] 刘嘉文, 李丽. 变电站 220 kV 及以上区域工频电磁场强度特性分析[J]. 广东电力, 2011, 24(1): 6-9, 19.
- [3] 陈青松, 杨晓瑛, 李润琴, 等. 供电企业工频电磁场职业暴露现状[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2012, 30(8): 575-578.
- [4] 沈春琳, 唐传喜, 高树森, 等. 上海市居民居室工频电磁场水平[J]. 环境与职业医学, 2010, 27(10): 585-589.
- [5] 刘武忠, 艾自胜, 秦景香, 等. 上海市宝山区居民住宅工频电磁场的接触水平[J]. 环境与职业医学, 2011, 28(6): 366-368.
- [6] LIN IF, LI CY, WANG JD. Analysis of individual and school-level clustering of power frequency magnetic fields[J]. Bioelectromagnetics, 2008, 29(7): 564-570.
- [7] OLDEN K, BOOMAN GA, BEMHEIM NJ. Niehs report on health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields[M]. Research Triangle Park, NC: National Institution of Environmental Health Sciences, 1999.
- [8] World Health Organization. Extremely low frequency fields: environmental health criteria monograph No.238 Geneva[R]. Switzerland: World Health Organization, 2007.
- [9] WERTHEIMER N, LEPPER E. Electrical wiring configurations and childhood cancer[J]. Am J Epidemiol, 1979, 109(3): 273-284.
- [10] 徐禄文, 李永明, 刘昌盛, 等. 重庆地区 500 kV 变电站内工频电磁场分析[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 66-70.
- [11] 饶章权, 郭启贵, 赵殿全, 等. 500 kV 变电站工频电磁场分布测量[J]. 高电压技术, 2004, 30(9): 41-43.
- [12] 陈震平, 林凌. 典型 110 kV 变电站站界电磁环境现状分析[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 94-98.
- [13] 陈青松, 晏华, 徐国勇, 等. 50 家企业工频电磁场职业暴露现状调查[J]. 中国职业医学, 2009, 36(1): 27-29.
- [14] AHLBOM A, CARDIS E, GREEN A, et al. Review of the epidemiologic literature on EMF and health[J]. Environ Health Perspect, 2001, 109(Suppl 6): 911-933.
- [15] FARAG AS, DAWOUD MM, CHENG TC, et al. Occupational exposure assessment for power frequency electromagnetic fields[J]. Electric power systems research, 1999, 48(3): 151-175.
- [16] 李妮, 郭雄, 裴春明. 工频电磁场长期暴露健康风险的预防性政策分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 2930-2936.

(收稿日期: 2013-05-13)

(英文编审: 金克峙; 编辑: 张晶; 校对: 洪琪)