

Analyses on Measurement and Simulation of Electromagnetic Environment of 10 kV/0.4 kV Box Type Transformer by Using FEM Method

Yahong Ma^{1,2}, Zhuo Xing¹, Xiaojiao Fan¹, Lin Cheng³

¹Department of Information Engineering Internet of Things and Big Data Research Center, XiJing University, Xi'an Shaanxi

²Department of Radiation Medicine, The Fourth Military Medical University, Xi'an Shaanxi

³State Grid Shannxi Electric Power Research Institute, Xi'an Shaanxi

Email: yahongma@sina.com

Received: Nov. 15th, 2017; accepted: Nov. 29th, 2017; published: Dec. 5th, 2017

Abstract

With the rapid development of Chinese city modernization and the constant updating of city distribution network, box type transformer has been widely used in residential, commercial center, airport, enterprises, hospitals or schools and other places, closed to people's daily lives. In order to clear the electromagnetic radiation distribution characteristics of box type transformer, this paper selected the 10 kV/0.4 kV box type transformer in a certain area by using the FEM simulation and then compared it with the measurement data, in order to study the power frequency electromagnetic distribution characteristics and provide theoretical and experimental basis for assessing the electromagnetic environment level of box type transformer. The result of simulation analysis is in a good agreement with the actual monitoring data. In the actual operation condition of box type transformer, the electric field strength is more than 1.0 V/m and the maximum magnetic flux density is 10 μ T at the distance of 20 cm away from box, which mainly concentrate in the import line, the gap and windows and decrease with the increase of the distance. Thus, it can be concluded that the electromagnetic environment level is far below the recommended China residential environmental standard limits, in which the electric field strength is 4 kV/m and the magnetic induction intensity is 100 μ T. And it could not cause adverse effects on the surrounding environment, residents' life and physical and mental health.

Keywords

Box Transformer, Power Frequency, Electromagnetic Environment, FEM Simulation

基于有限元方法的10 kV/0.4 kV箱式变电站电磁环境仿真分析与测量

马亚红^{1,2}, 邢卓¹, 范小娇¹, 成林³

¹西京学院信息工程学院, 物联网与大数据研究中心, 陕西 西安

²第四军医大学预防医学系放射医学教研室, 陕西 西安

³国家电网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安

Email: yahongma@sina.com

收稿日期: 2017年11月15日; 录用日期: 2017年11月29日; 发布日期: 2017年12月5日

摘要

随着中国城市现代化建设的飞速发展,城市配电网的不断更新改造,箱式变电站已广泛应用于住宅小区、商业中心、机场、企业、医院或学校等场所,与人们的日常生活息息相关。为了明确箱式变电站周围电磁环境的分布特征,本文选取了某小区10 kV/0.4 kV箱式变电站进行有限元仿真分析,并与实测数据对比,研究箱式变电站产生的工频电磁场分布特征,为合理评估箱式变电站的电磁环境水平提供理论和实验依据。结果表明:电磁环境仿真分析与实际监测数据具有很高的一致性。在箱式变电站实际运行状态下,距离箱体20 cm处最大工频电场强度超过1.0 V/m,最大磁感应强度值为10 μ T,主要集中在进出线、缝隙和窗体附近,且随着距离增大均急剧下降,因此箱式变电站工频电磁环境水平远远低于中国环境标准中推荐的居民区的场强限值,即电场强度4 kV/m,磁感应强度100 μ T,该参数对周围环境、居民生活和身心健康不会造成不良影响。

关键词

箱式变电站, 工频, 电磁环境, 有限元仿真

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

箱式变电站将传统的变压器集中设计在箱式壳体中,是集保护、监视、控制和通信等功能于一体的智能化配电设备,可直接向用户提供电源。箱式变电站是电网运行中的关键设备之一,其能投安全、可靠、经济运行将对整个电网和社会环境产生至关重要的影响。

自其问世以来,发展极为迅速,在欧洲发达国家已占配电变压器的70%,美国已占90%。中国自20世纪70年代后期,先后从法国、德国、美国引进了箱式变电站。随着中国城市现代化建设的飞速发展,城市配电网的不断更新改造,目前已广泛应用于住宅小区、商业中心、机场、企业、医院或学校等居民集中的场所[1][2]。电磁环境问题日益凸显,引起公众对电力建设项目的质疑甚至阻挠,成为社会所关注的公共卫生问题[3]-[8]。

鉴于公众人群与职业人群的不同特点,需要制定不同的暴露限值。国际非电离辐射委员会(ICNIRP)导则推荐的公众24 h居住环境允许暴露限值(电场强度5 kV/m、磁感应强度100 μ T)以及受控环境中的暴露限值(10 kV/m, 500 μ T) [9]。我国在《电场、磁场、电磁场防护规定》(征求意见稿)中规定50 Hz频率下电场强度限值为4 kV/m,磁感应强度限值为0.022 mT。世界卫生组织(WTO)早在1997年就启动了“国际电磁场计划”项目,目的在于通过电磁健康风险评估、电磁限值标准建立和公众电磁健康知识传播,

提高公众对环境电磁场健康影响的正确认识。据文献报告, 2005 年某院内 630 kV/10 kV 箱式变电站产生的电磁环境污染研究影响了周围人群的身心健康, 测试结果显示距离箱式变电站 1 m 处的电场强度大于 1 kV/m, 超过了国家 GBZ1-2002 排放标准[10] [11], 该项目通过后期整改已经符合国家标准。根据大量的现场实测数据表明, 箱式变电站较大的工频电场强度集中在进出线附近, 其他方位均在 2 kV/m 以下[12]。但是由于人们对居住环境质量的要求越来越高, 同时对电磁知识缺乏全面的认识, 部分居民因惧怕输变电设备产生电磁辐射, 阻挠电网建设, 导致一些地方的变电站、输电线路路径选址工作受阻, 在一定程度上影响经济社会发展和百姓安居乐业, 因此有必要对生活环境中的电磁环境水平进行探讨和分析[13]-[18]。

为了明确箱式变电站电磁场的空间分布特征, 本文选取了某小区的 10 kV/0.4 kV 箱式变电站进行建模仿真与实测对比分析, 研究箱式变电站工频电磁场的分布特征, 为合理评估箱式变电站的电磁环境水平提供理论和试验依据。

2. 工频电磁场物理基础

任何电磁场问题都满足麦克斯韦方程组, 揭示了电磁的本质及它们之间的相互转化关系, 如下式所示:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

对于工频电磁场而言, 求解电场时, 可忽略 $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$, 认为电场主要由源电荷 ρ 产生; 求解磁场时, 可忽略 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$, 认为磁场主要由传导电流 \mathbf{J} 产生。

3. 有限元仿真模型的建立

3.1. 工程电磁场的有限元方法

有限元法是将场域划分为有限个单位, 同时用一个简单的函数作为场变量模型(插值函数), 构成每个单元中场的试探解。有限元法将单元中任一点的待求量, 用该单元便捷和其他单元便捷的交点上的场量值计算, 即将无穷维自由度问题转化为有限个自由度的问题。

3.2. 10 kV/0.4 kV 变压器模型参数

箱式变电站是由变压器和高、低压电压控制设备两者进行有机结合形成的整套的配电设备。本文选用了已投入使用的 10 kV/0.4 kV ZBW1-10 箱式变电站。主要部分包括电源侧高压室、变压器室、低压室, 从低压母排上引出线路对用户供电。高压进线为铠装屏蔽电缆, 对外的产生电场和磁场可忽略不计。高压母排贯穿于高压室和变压器室, 其上载有高电压, 是电场的主要来源; 低压母排贯穿于变压器和低压室, 其上载有大电流, 是磁场的主要来源。除此之外, 箱式变电站内部还有计量、电容补偿等功能模块电路, 但相比高电压、大电流的母排而言, 产生工频电场和磁场环境可忽略不计。

3.3. 箱式变电站仿真模型

箱式变电站除了门和窗的缝隙之外, 所有墙壁都夹层了金属屏蔽材料, 这个对于电场具有明显的屏

蔽作用。IEC/TR62271-208:2009 中也提到,在电场计算中,金属构架可以等效为表面具有单一电压(如果接地就是零)的模型,而不是赋予它们的预期材料特性,完全被金属外壳包围的设备模型的外部电场可能接近零,如果连接到设备的电缆没有屏蔽和接地,则它们就是电场的唯一场源。所以,仿真中需将箱变内、外墙体当作金属模型处理。考虑到强电设备大电流,高电压对箱体外部的电磁场分布起决定性。所建三维仿真模型包括变压器、高低压母线排等激励源、屏蔽以及孔缝等影响电磁场分布的主要因素。箱式变电站几何模型如图 1 所示。

3.4. 电气仿真设置

该箱式变电站是额定电压 10 kV,总容量为 800 KVA 的中低压设备,其高、低压的具体额定参数如下:1) 高压侧额定电压:10 KV;2) 高压侧额定电流:80 A;3) 低压侧额定电压:0.4 KV;4) 低压侧额定电流:1250 A。但在实际工作中,通常负荷不饱满,高压和低压电流值均无法达到额定值。因此本文仿真模型根据实际运行情况,设置高压线圈电压为 10 kV,低压线圈电压为 0.4 kV,铁心、屏蔽等组件电压为 0.0 V;高压母排上的电流为 4.0 A,低压母排上的电流为 100.0 A。

3.5. 有限元网格剖分

建立箱式变电站计算模型并设置频率范围,通过利用 CST Studio Suite 2016 软件中正四面体有限元网格对模型进行剖分,实现模型离散化。该模型总共被剖分为 346,335 个网格,如图 2 所示。

4. 仿真分析

4.1. 电场仿真结果

图 3 为电场仿真云图。从图 3 中可以看出,箱式变电站周围的电场泄漏较高区域主要集中在门、窗等缝隙位置。最强电场强度在变压器室的窗体位置,这主要是因为变压器室内敷设的裸露高压进线较长,是最主要电场源。变压器室的窗户位置如图 3 中位置 4、位置 6 所示,在垂直距离窗面中心 20 cm 处,最大电场强度已超过 1 V/m,而随着该距离逐渐增大,电场强度将急剧衰减,当该距离达增大到 5 倍后,电场衰减至 0.037 V/m,降低了 27 倍,该数据呈现出电场随距离平方成反比,与近区场理论一致。尽管箱式变电站内部敷设了高、低压母线等裸露铜排,但由于金属夹层箱体对电场的有效屏蔽,使其在正常运行时周围的电场环境水平完全达到国家标准范围[5]。

4.2. 磁场仿真结果

图 4 为磁感应强度云图。图 4 中可以看到,箱式变电站周围的磁感应强度较高区域同样集中在门、

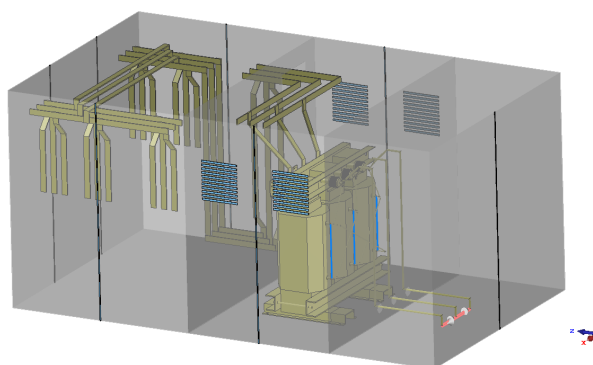


Figure 1. Simulation model diagram
图 1. 仿真模型图

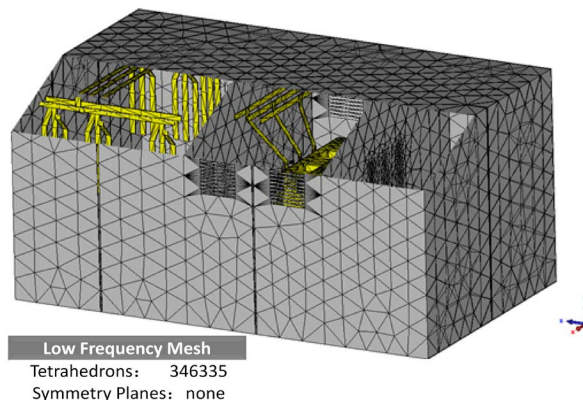


Figure 2. Model mesh gridding
图 2. 模型网格剖分

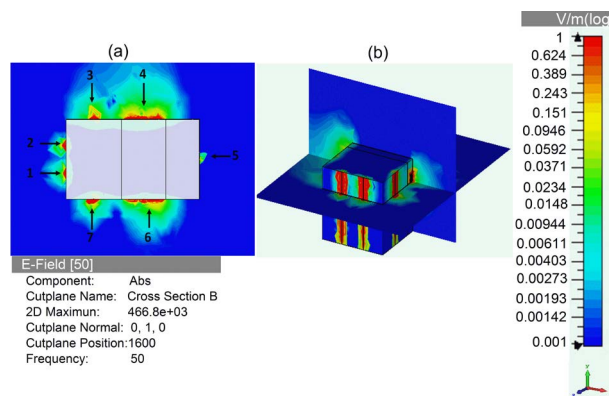


Figure 3. Electric field intensity nephogram. (a) XOZ plane = 1600 mm; (b) Whole
图 3. 电场强度云图。(a) XOZ 面 $y = 1600$ mm; (b) 整体

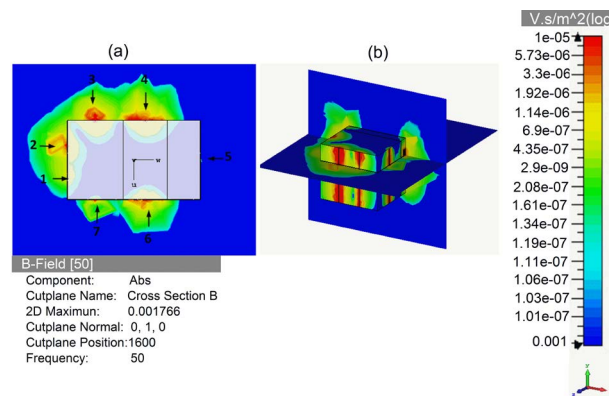


Figure 4. Magnetic flux intensity nephogram. (a) XOZ plane = 1600 mm; (b) Whole
图 4. 磁感应强度云图。(a) XOZ 面 $y = 1600$ mm; (b) 整体

窗等缝隙位置。其中，图 3 中位置 3、位置 4 磁感应强度尤为突出，主要是因为载有大电流的低压母排回路靠近该侧敷设，是主要的磁场源。从图 4 中位置 3 可以看出，在距离箱体 20 cm 处，磁感应强度 B 的最大值达到 $10 \mu\text{T}$ ；而随着距离增大，磁感应强度会急剧减小，距离箱体面板 1 m 距离下磁感应强度衰减至 $0.435 \mu\text{T}$ ，减小了 23 倍，呈现出磁场随距离平方成反比的规律，完全符合近区场理论。

上述仿真结果是按照所选箱式变电站实际运行负荷设定的参数,即在低压侧输出电流 100 A 情况下的计算结果。客观评估时需要考虑其最恶劣状态,即满负荷状态,可参考上述仿真值,根据满负荷条件下低压侧电流值进行外推计算,得到距离箱体 20 cm 处最大磁感应强度为 125 μT , 1 m 处最大磁感应强度为 5.438 μT 。对照 ICNIRP 导则中对 50 Hz 的公众磁场辐射限制 100 μT 要求,只要与箱式变电站保持 30 cm 以上距离,所承受的暴露磁场均在标准限值以下。

5. 测量验证及讨论分析

遵循我国现行《交流输变电工程电磁环境监测方法》(HJ681-2013) [19]中的具体要求展开对 10 kV/0.4 kV 箱式变电站周围电磁环境的监测工作。根据箱式变电站平面布置、工频电场、工频磁场在距箱体 20 cm 处的门窗缝隙处布设 7 个监测点。

采用工频电磁辐射监测仪(Narda EHP-50F, 德国)监测箱式变电站的电磁场空间分布,频率范围 5 Hz~500 Hz。该仪器使用前均通过计量部门检定或校准。通过 Narda EHP-50F 控制软件分别测量电场和磁场分量。

选择 Electric 1 kV/m 档位进行电场测试,典型测试曲线如图 5 所示,第一个峰值点是 50.05 Hz,幅度为 1.3874 V/m。选择 Magnetic100 μT 档位进行磁场测试,典型测试曲线如图 6 所示,第一个峰值点是 50.05 Hz,幅度为 0.6283 μT 。从图 5 和图 6 中也可观察到存在高次谐波,其中 3 次(150 Hz)、5 次(250 Hz)以及 7 次(350 Hz)等均较为明显,所测箱变为工频中低压设备,其内部母排上的电压、电流均为 50 Hz 交流信号,根据傅里叶级数,频谱主要为 50 Hz 及其奇次倍频。因此,箱变对外辐射电场、磁场在 50 Hz 及其奇次谐波频率上存在明显峰值。

图 7 和图 8 分别为箱式变电站电场强度、磁感应强度的计算值与测试值之间的对比曲线。从图中可以看出,同一位置的测量值略大于计算值,不同位置的变化趋势两者一致性很好。图 4 和图 5 中位置 5 的电场强度和磁感应强度值最低,即周围环境中产生的电磁场最弱。10 Kv/0.4 Kv 箱式变电站周围的电磁环境主要由于电力变压器的初级和次级绕组之间所产生的磁场涡流形成,辐射范围大小与强度取决于其容量与工作电流。

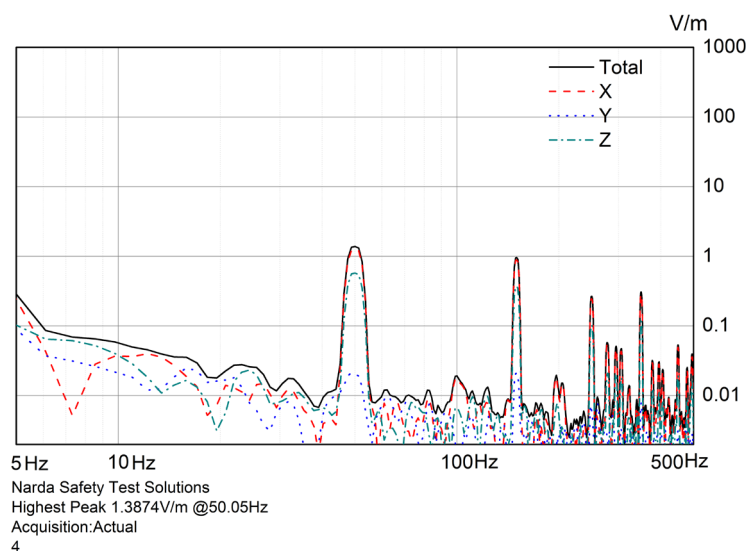


Figure 5. Measurement curve of electric field strength

图 5. 电场强度测试曲线

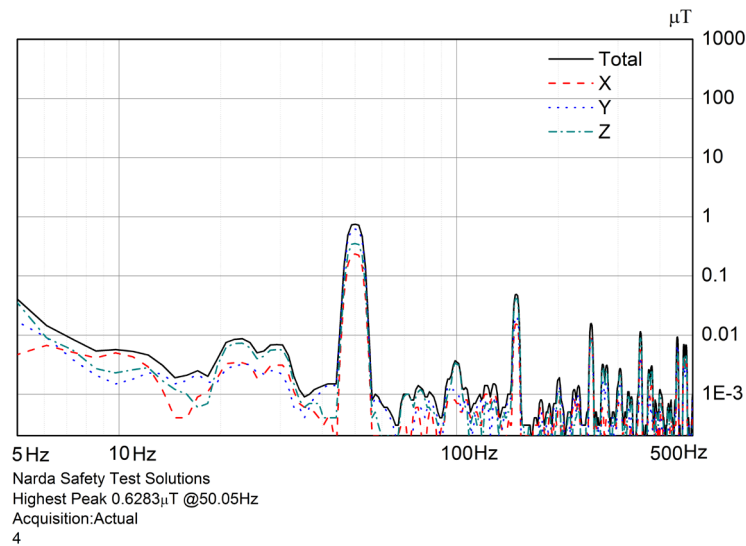


Figure 6. Measurement curve of magnetic field strength
图 6. 磁场测试曲线

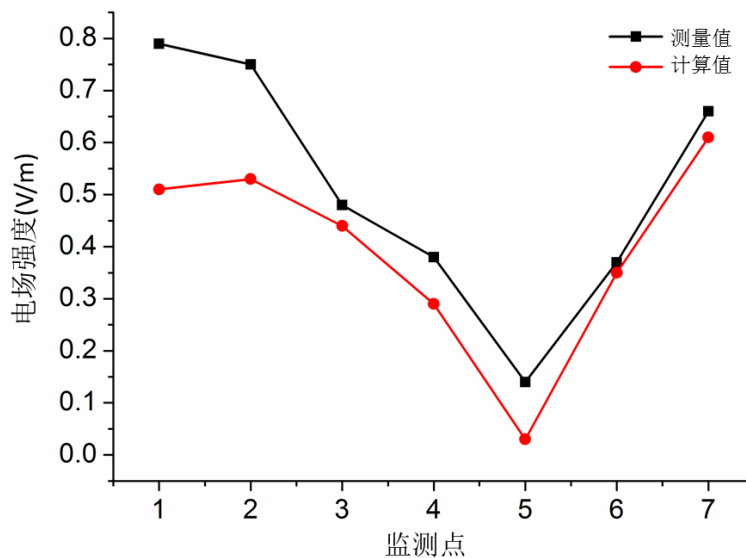


Figure 7. Comparison of simulation and test values of electric field strength
图 7. 电场强度仿真与测试对比

6. 结论

箱式变电站采用全户内布置的型式，同时所有电气设备均布置在一栋建筑物内，经过建筑物的屏蔽后，极大地降低了其辐射水平。本文通过理论仿真分析和实际环境监测对比分析，结果表明箱式变电站工频电磁辐射水平远远低于国家标准，对周围环境、居民生活和身心健康不会造成不良影响。究其原因主要有：1) 箱式变电站电压等级较低，工频电磁辐射的影响范围十分有限，周边工频电场强度均控制在较小范围内；2) 箱体起到了很好的屏蔽作用，较大的工频电场强度集中在进出线附近，其它方位的工频电磁场强度远低于《电磁环境控制限值 GB8702-2014》公众暴露限值电场强度 4 kV/m 和磁感应强度 100 μ T；3) 高低压进出线均采用电缆，减少了输电线路的电磁辐射；4) 距居民住宅远大于安全距离。

近几十年来国际大电网(CIGRE)发表的大量科学证据表明，在 20 KV/m 以下的工频电磁环境对人体

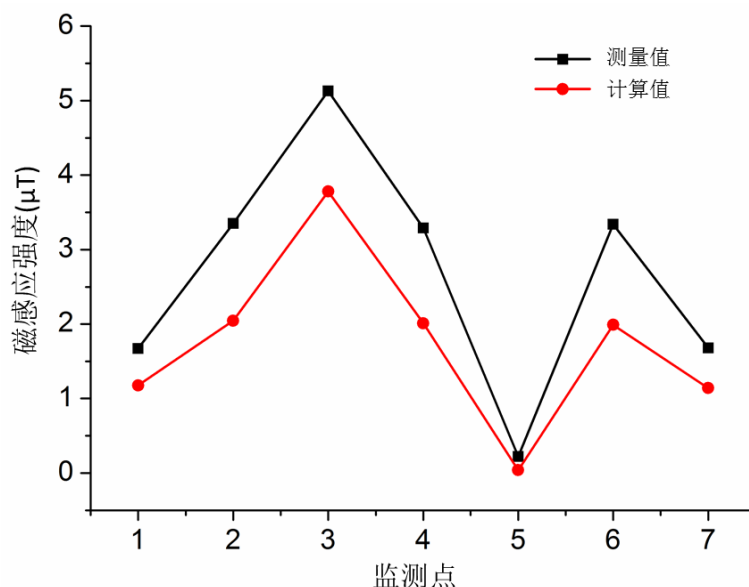


Figure 8. Comparison of simulation and test values of magnetic field strength
图 8. 磁感应强度仿真与测试对比

健康没有不良影响[20], 因此对于居住在箱式变电站或输电线路上述距离以外的居民而言, 完全没有必要担心箱式变电站或输电线路产生的电磁环境对人体的伤害, 同时为以后城区变电站的设计、电力设备的选型以及改善人们居住环境提供理论和实验依据。

所以, 需要针对人们对健康需求的不断变化及健康风险问题的不断出现, 努力加强政府部门、公共卫生单位、电磁学与生物学专业机构科研人员的交流与沟通, 确保各项环保措施的有效落实, 降低、减少变电站建设对环境带来的负面效应, 努力做到经济、社会、生态和环境效益的科学发展与协调统一。

基金项目

国家自然科学基金(51407187), 陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK1155)和西京学院特区人才科研启动专项基金(XJ17T03)。

参考文献 (References)

- [1] 周海. 箱式变电站在电力工程施工中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2014(6): 51-52.
- [2] 刘君. 箱式变电站应用优势和发展趋势[J]. 科技创新导报, 2013(9): 105.
- [3] Liorni, I., Parazzini, M., Fiocchi, S., et al. (2014) Dosimetric Study of Fetal Exposure to Uniform Magnetic Fields at 50 Hz. *Bioelectromagnetics*, **35**, 580-597. <https://doi.org/10.1002/bem.21878>
- [4] 宋福根, 林韩, 兰生. 特高压输电线路交叉跨越区域工频电场分布计算[J]. 电气技术, 2016, 17(1): 6-10.
- [5] 王琴, 苏海峰, 包家立, 等. 高压输电线环境电磁场暴露健康效应的原初作用[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 193-200.
- [6] 陈鑫. 变电站开关动作瞬间电磁干扰的研究与分析[J]. 电气技术, 2016, 17(5): 118-121.
- [7] Chen, X. (2016) Research and Analysis of Transient Electromagnetic Interference. *Electrical Engineering*, No. 5, 118-121.
- [8] 彭陈亿, 金立军. 基于匀场等效的非匀磁场暴露评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 181-186.
- [9] 袁海燕, 傅正财. 基于有限元法的±800 kV 特高压直流输电线路离子流场计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 139-146.
- [10] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2010) Guidelines for Limiting Exposure to

Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, **99**, 818-836.

- [11] 中华人民共和国卫生部. 中华人民共和国国家职业卫生标准 GBZ1-2002 [S].
- [12] 中华人民共和国卫生部. 工业企业设计卫生标准 GBZ1-2002 [S].
- [13] 李群. 箱式变压器噪音与电磁辐射的治理[J]. 上海铁道科技, 2005(1): 11.
- [14] 王东来, 卢铁兵, 崔翔, 等. 两回高压直流输电线路交叉跨越时地面合成电场计算[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 77-84.
- [15] 贾宏艳. 不同等级变电站电磁辐射对周围环境的影响及防治措施[D]: [博士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
- [16] 是凡, 靳朝喜. 变电站电磁辐射监测及防治措施[J]. 环境与发展, 2017, 29(3): 232-233.
- [17] 汤紫霖. 变电站工频电磁环境信息监测系统设计[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [18] 陈宝才, 吴慧体, 许明发. 城区中全户内变电站电磁辐射环境影响分析研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(2): 182-185.
- [19] 交流输变电工程电磁环境监测方法(HJ681-2013) [S].
- [20] Ryan, H.M. and Williams, C. (1994) A Review of the Biological EMF/Health Effects Controversy. *Ninth International Conference on Electromagnetic Compatibility*, Manchester, 5-7 September 1994, 1-5.
<https://doi.org/10.1049/cp:19940667>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org