

# Study on the Power Frequency Electromagnetic Environment of Accessory Substation and the Relevant Shielding Measures

Xuefeng Zhang<sup>1</sup>, Youwei Huang<sup>1</sup>, Keru Jiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shenzhen Power Supply Planning Design Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: [jiangkeru@163.com](mailto:jiangkeru@163.com)

Received: Feb. 8<sup>th</sup>, 2015; accepted: Feb. 20<sup>th</sup>, 2015; published: Feb. 25<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 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

---

## Abstract

As a novel type of substation, the accessory substation puts forward strict requirements to the power frequency electromagnetic environment. In this paper, the novel accessory substation was taken as the research project. Transformer and bare busbar were confirmed as main electromagnetic disturbance sources. Simulation by using of Ansoft/Maxwell was developed to describe the spatial distribution of the power frequency electromagnetic field and its property that the filed intensity delays with the increase of the distance. In order to further weaken the electromagnetic field, some shield materials were set inside the wall of substation. The shielding effectiveness of the different structures and different electrical characteristics of shield materials were compared and analyzed. Eventually the guidances for the design of power frequency electromagnentic shielding of accessory substation were proposed.

## Keywords

Accessory Substation, Power Frequency Electric Field, Power Frequency Magnetic Field, Spatial Distribution, Shielding Measures

---

# 附建式变电站工频电磁环境及屏蔽措施研究

张雪峰<sup>1</sup>, 黄有为<sup>1</sup>, 姜克儒<sup>2</sup>

<sup>1</sup>深圳市供电规划设计院有限公司, 广东 深圳

<sup>2</sup>重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆

Email: [jiangkeru@163.com](mailto:jiangkeru@163.com)

收稿日期: 2015年2月8日; 录用日期: 2015年2月20日; 发布日期: 2015年2月25日

## 摘要

作为一种全新形式的附建式变电站, 对工频电磁环境提出严苛的要求。本文以新型附建式变电站为研究对象, 确定变压器及裸露母排为主要电磁骚扰源, 采用Ansoft Maxwell软件对附建式变电站的工频电磁场空间分布和距离衰减特性进行了仿真分析。为进一步削弱电磁场强度, 在变电站墙体内部设置屏蔽体, 对比研究了具有不同结构、不同电气特性的屏蔽材料对工频电场和磁场的屏蔽效果, 提出了附建式变电站工频电磁屏蔽设计的指导意见。

## 关键词

附建式变电站, 工频电场, 工频磁场, 空间分布, 屏蔽措施

## 1. 引言

近年来, 深圳市国民经济和社会发展取得了举世瞩目的巨大成就, 城市用电负荷也屡创新高, 亟需在负荷中心修建大型变电站。然而由于地理位置的限制, 深圳市存在巨大的用地压力, 城区中心负荷密度大、无线路走廊、变电站站址选择困难等现实矛盾日益突出。这种供电现状直接限制了深圳供电网络的建设步伐, 同时也严重制约着城市建设和经济发展, 已成为特区经济发展的瓶颈问题。走“室内化、小型化”道路是破解变电站用地瓶颈的有效手段, 为此深圳市供电规划设计院提出了修建“附建式变电站”的设想, 即将常规变电站设备集约为一个整体模块附设到建筑综合体中。这样做最大的优点是节约用地, 但与之形成尖锐矛盾的是变电站贴近公众活动区域, 可能引发公众对电磁环境问题的质疑。

随着国家的经济发展和人们生活水平的提高, 公众对变电站产生的电磁可能对健康造成的危害日益重视, 并且存在一些恐慌心理, 这使得一些位于市内或靠近居民区的变电站的规划和建设遇到了极大困难和阻碍。

人们对于变电站电磁环境的关注始于 1972 年前苏联学者在大电网会议上发表的关于超高压变电站对于工作人员身体影响的报告。随后四十多年, 国内外学者对输变电工频电磁场对生物体的影响开展了大量的研究, 包括流行病学研究、动植物实验和暴露量值统计分析等。其中大量研究结果存在非一致性或不能证实极低频电磁场对生物体存在健康危害, 而极少数声称“证实有害”的报道恰恰最吸引眼球, 给公众造成了巨大的心理压力, 产生了对变电设施电磁污染的担忧和恐惧, 这使得一些位于市内或靠近居民区的变电站的规划和建设遇到了极大困难和阻碍。

从保护环境和维护公众健康安全角度出发, 相关国际组织和许多国家都发布了输变电设施工频电磁场限值标准。同时, 许多文献对多种电压等级变电站的工频电场、工频磁场分布做了研究。国外针对高压变电站进行过一些仿真和测量分析[1]-[4], 国内也有许多文献通过实测给出了高压变电站内工频电场和磁场的监测值[5] [6], 或者采取 Ansoft、COMSOL Multiphysics、CDEGS、IES-Coulomb 等软件仿真给出了变电站内的工频电场、磁场水平[7]-[10], 这些研究都对本文的工作有很好的参考意义。然而对变电站电磁场工程屏蔽措施的研究[11]还比较少见。

为了消除公众的顾虑,建设绿色环保、环境友好的附建式变电站,本文结合以往变电站电场和磁场实测数据,建立仿真模型,评估了附建式变电站的工频电磁环境。鉴于附建式变电站的特殊性,加强防护措施,特别在变电站墙体内设置屏蔽体,对比研究了具有不同结构、不同电气特性的屏蔽材料对工频电场和磁场的屏蔽效果,以期对附建式变电站的规划建设提供参考。

## 2. 附建式变电站主要工频电磁骚扰源及电磁环境控制标准

考虑到附建式变电站紧凑型布局和贴近公众活动区域的特点,附建式变电站的规划设计中采用的是气体绝缘式变压器,进出线为屏蔽电缆。结合已有对室内变电站电磁环境的实测和仿真研究成果,本文将变压器、裸露母排确定为变电站内的主要工频电磁骚扰源。

以变电站墙体外侧和楼板上层作为电磁环境控制区域,控制标准参考 ICNIRP 提出的《限制时变电场、磁场和电场磁暴露(300Hz 以下)导则》和我国国家环保局发布的《500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》(HJ/T24-1998),即公众曝露区域的工频电场强度应低于 4 kV/m,工频磁感应强度应低于 100  $\mu$ T。

## 3. 仿真模型

图 1 所示模型中,变电站的空间尺寸是 63 m  $\times$  25 m  $\times$  25 m;内设 4 台 220 kV 变压器,每台变压器尺寸为 6.84 m  $\times$  2.75 m  $\times$  7 m,容量为 75 MVA,高低压绕组匝数比为 11:1,额定电流为 118 A/1300 A;母排 8 m  $\times$  0.52 m  $\times$  0.07 m;

在变电站墙体内加设不同结构和电气特性的屏蔽材料,屏蔽板的厚度为 4 cm,另外还设置了 4 cm 厚的屏蔽网格,结构如图 2(a)~(c)所示。

## 4. 仿真结果及分析

### 4.1. 工频电场空间分布及屏蔽效果

图 3 所示为未设置屏蔽体时变电站内、外的工频电场空间分布三视图(注:变电站空间尺寸 63 m  $\times$  25 m  $\times$  25 m)。

从图 3 可以看到,变电站内变压器和母排附近的工频电场强度较高,达到了 1 kV/m 量级,而随着观测点与变压器、母线间距离的增大,电场强度在不断地衰减。为了更加清晰地说明变电站外的电场分布和强度大小,特别以三维模型显示了变电站外围 10 m 范围内的电场,如图 4 所示。

从图 4 可以看到,在变电站墙体处不采用任何屏蔽措施时,变电站外的电场强度已经衰减了很多,其最大值  $E_{\max}$  仅为 78.9 V/m,远小于现有标准中工频电场的公众曝露限值。从图 4 中还可以看到,变电站外的空间,靠近变压器和母排的位置,电场强度相对较大,离变压器和母排较远的位置,电场强度较小约为 20~30 V/m,站外大部分区域的电场强度在 10~30 V/m 的范围内。

但是考虑到对于附建式变电站更为严苛的电磁环境要求,在此基础上,进一步研究不同屏蔽材料和屏蔽结构的屏蔽效果。首先在变电站外围设置厚度为 4 cm 的屏蔽板,仿真分析不同屏蔽材料对工频电场的屏蔽作用,得出了站外电场强度与屏蔽板材料相对介电常数的关系,统计结果如表 1 所示。

为了更好地比较屏蔽材料的相对介电常数与电场屏蔽效能间的关系,绘制了图 5,从图中可以清楚看到,随着屏蔽材料相对介电常数的增大,屏蔽效果变得越来越好。

建筑中所用的钢筋混凝土墙的相对介电常数一般在 6~8 左右,这种材料对电场也有一定的屏蔽效能。为了研究变电站墙体对电场的屏蔽效果,取墙体的相对介电常数为 8,分别设置墙体的厚度为 0 cm、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm,研究了其对电场的屏蔽效果,得到的仿真结果如表 2 所示:

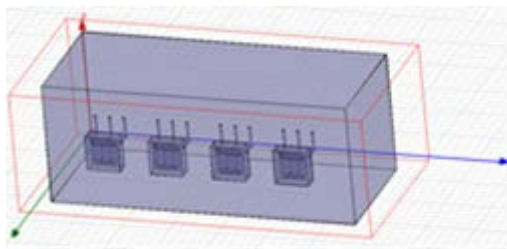
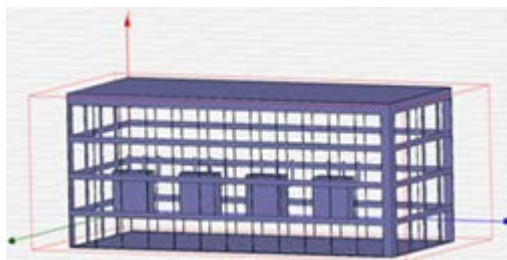


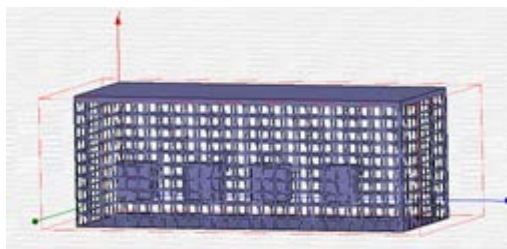
Figure 1. The simulation model of substation for electromagnetic environment  
图 1. 变电站电磁环境仿真模型



(a) 10 m × 10 m



(b) 5 m × 5 m



(c) 2 m × 2 m

Figure 2. The structure of shielding grid  
图 2. 屏蔽网格结构

可以看出：随着变电站墙体厚度的增加，其对电场的屏蔽效果逐渐变好。当然，混凝土墙体的电场屏蔽作用是有限的，为了获得更好的屏蔽效果，还要结合其他屏蔽措施。

下面分析了不同网格大小的金属网格对工频电场的屏蔽作用，仿真得到的统计结果如表 3 所示。

由表 3 可以看到，屏蔽网格的屏蔽效果要弱于屏蔽板。一般来说，金属网格尺寸越小，屏蔽效果越好，但是二者之间并非线性关系，在金属网格加密的过程中，屏蔽效果逐渐趋于稳定。

#### 4.2. 工频磁场空间分布及屏蔽效果

从图 6 可以看到，变压器线圈的磁通大多都被限制在铁芯内，因此变压器附近磁场强度比其他区域

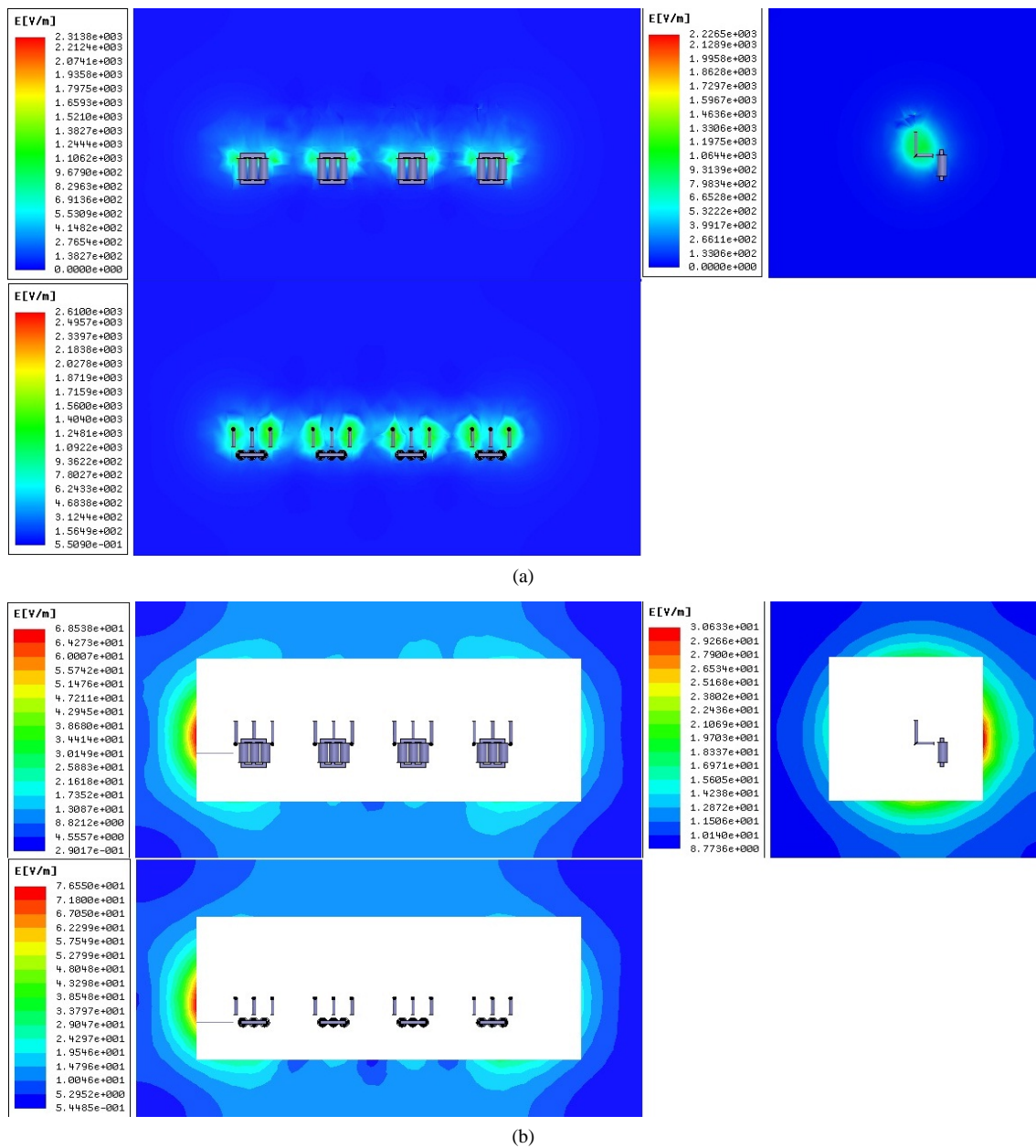


Figure 3. Three views for the power frequency electric field distribution of substation unshielded; (a) The power frequency electric field distribution in the substation; (b) The power frequency electric field distribution outside the substation

图 3. 无屏蔽时变电站工频电场空间分布三视图; (a) 变电站内工频电场分布; (b) 变电站外工频电场分布

的磁场强度大很多。随着观测点与变压器和母线的距离增大，磁场强度不断衰减。由图 6(b)可看出，变电站外的磁场强度已经比较低了。同样的，为了清楚地查看变电站外的磁感应强度，以三维模型显示了变电站外围 5 m 范围内的磁场，如图 7 所示。

图 7 显示，在变电站墙体处不采用任何屏蔽措施时，变电站外的磁感应强度最大值  $B_{\max}$  达到了 911 nT，并未超出了工频磁场的公众暴露限值。从图 7 中还可以看到，对变电站外的空间，靠近变压器和母排的变电站正面磁感应强度相对较大，磁感应强度在 300~900 nT 左右，离变压器和母排较远的侧面和背面位置磁感应强度相对较小约为 150~350 nT，而站外大部分区域的磁感应强度大小在 50~400 nT 之间。

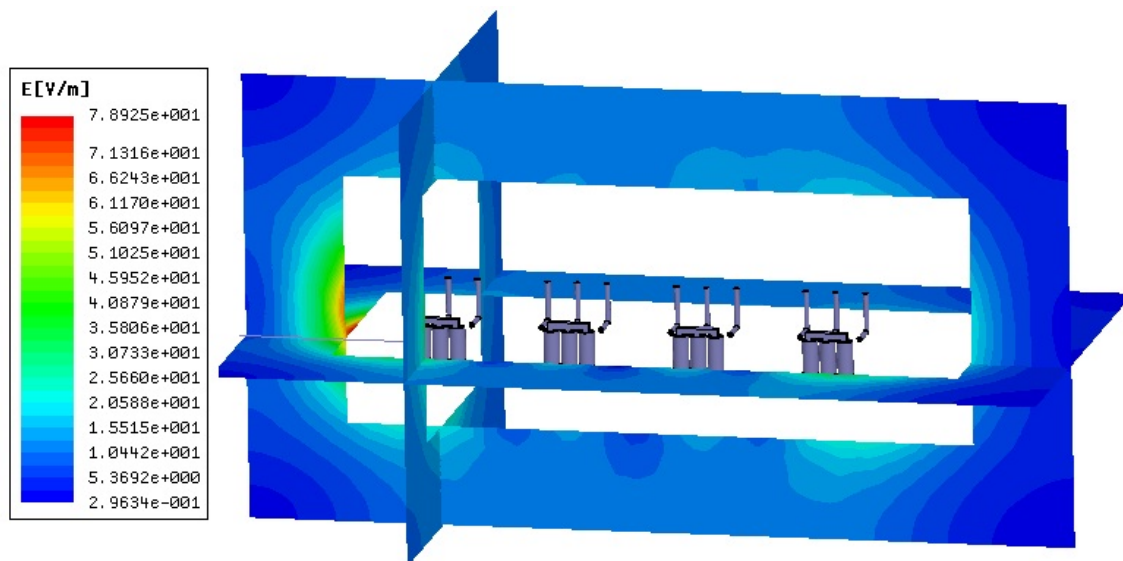


Figure 4. The power frequency electric field distribution outside unshielded substation within 10 m

图 4. 无屏蔽变电站外 10 m 范围内工频电场的空间分布

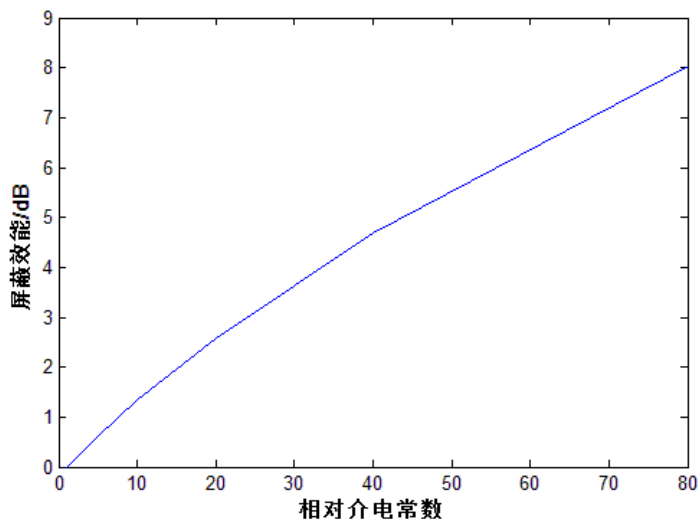


Figure 5. The relationship between the relative dielectric constant of shielding material and shielding property

图 5. 屏蔽材料相对介电常数与屏蔽性能的关系

Table 1. The maximum electric field strength outside substation under various shielding materials

表 1. 多种屏蔽材料下变电站外电场强度最大值

相对介电常数 $\epsilon_r$	1	5	10	20	40	80
$E_{max}/(V/m)$	78.9	76.3	73.6	69.2	62.3	52.7

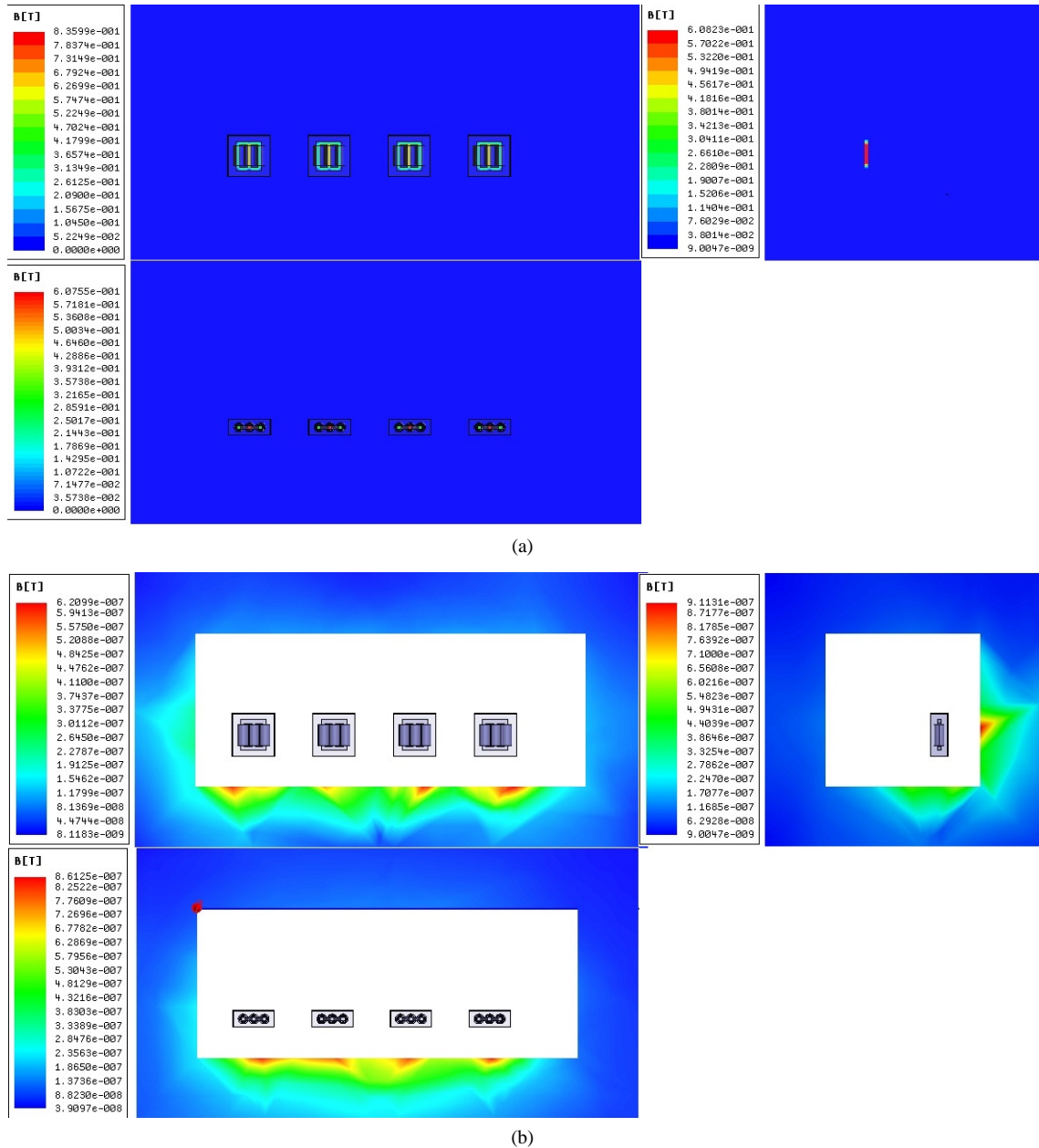
Table 2. The maximum electric field strength outside substation under various thickness of wall

表 2. 不同墙体厚度下变电站外最大电场强度

墙体厚度	0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm
$E_{max} (V/m)$	78.9	76.3	73.1	69.8	67.2	64.5	61.5
降低百分比/%	0	3.30	7.35	11.5	14.8	18.25	22.1

**Table 3.** The maximum electric field strength outside substation with different shielding grids ( $\epsilon_r = 80$ )  
**表 3.** 不同屏蔽网格( $\epsilon_r = 80$ )下变电站外电场强度最大值

网格大小/(m <sup>2</sup> )	10 × 10	5 × 5	2 × 2	屏蔽板
$E_{\max}$ /(V/m)	74.9	67.3	58.9	52.7



**Figure 6.** Three views for the power frequency magnetic field distribution of substation unshielded; (a) The power frequency magnetic field distribution in the substation; (b) The power frequency electric field distribution outside the substation  
**图 6.** 无屏蔽时变电站工频磁场空间分布三视图; (a) 变电站内工频磁场分布; (b) 变电站外工频磁场分布

为了进一步减小变电站外的磁场强度，研究在站外设置屏蔽体的屏蔽效果，在变电站外墙体处设置了具有一定厚度的屏蔽板材。为了使结果简单直观，经过多次尝试，最终采用厚度 4 cm 的屏蔽板，通过改变板材的相对磁导率  $\mu_r$ ，仿真得到了  $\mu_r$  与  $B_{\max}$  之间的对应关系，如表 4 所示。

另一方面，材料的屏蔽效能与其相对磁导率之间存在对应关系，这一点在图 8 中可以清楚地看到。

结合表 4 和图 8，可以看出，相对磁导率的增大使得屏蔽效果逐渐改善，采用铁作为屏蔽层，屏蔽效果将非常好，在 4 cm 厚的铁板屏蔽下，变电站外磁场的最大值从原先的 911 nT 下降到了 15 nT。而通过图 8，我们可以清楚地看到，随着屏蔽材料相对磁导率的增加，屏蔽效果在不断改善，当相对磁导率达到 1000 时，屏蔽效果变得比较理想，为 36 dB。

另外，从表 5 可以看到，屏蔽网格的磁场屏蔽效果要弱于屏蔽板。一般来说，金属网格尺寸越小，

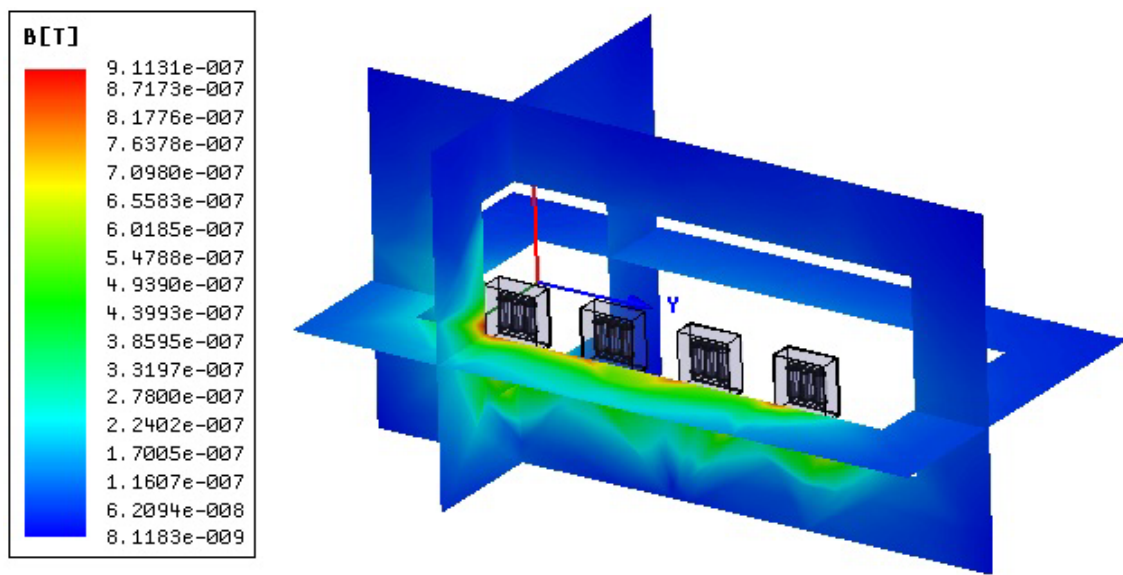


Figure 7. The power frequency magnetic field distribution outside unshielded substation within 10 m  
图 7. 无屏蔽变电站外 10 m 范围内磁场的空间分布

Table 4. The maximum magnetic field strength outside substation under various shielding materials  
表 4. 多种屏蔽材料下变电站外磁感应强度最大值

相对磁导率	1	10	60	100	250	600	1000	4000	10,000
$B_{max}/nT$	911	867	686	594	408	241	169	53	15

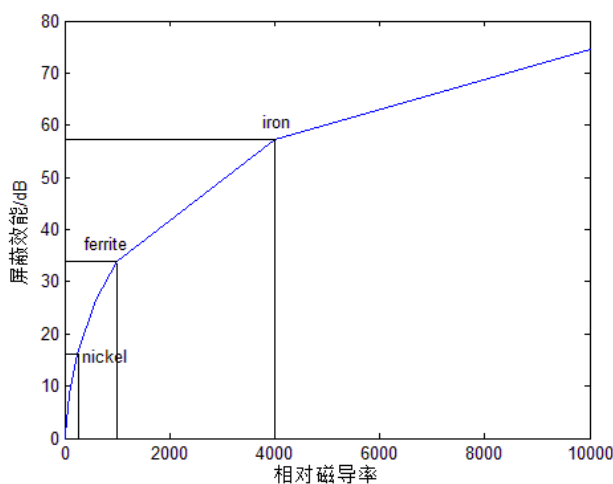


Figure 8. The relationship between the relative permeability of shielding material and shielding property  
图 8. 屏蔽材料相对磁导率与屏蔽效能的关系



**Table 5.** The maximum magnetic field strength outside substation with different shielding grids ( $\mu_r = 250$ )  
**表 5.** 不同屏蔽网格( $\mu_r = 250$ )下变电站外磁感应强度最大值

网格大小/(m <sup>2</sup> )	10 × 10	5 × 5	2 × 2	屏蔽板
$B_{\max}/(\text{nT})$	763	610	569	408

磁场屏蔽效果越好，但是二者之间不是线性关系，在金属网格加密的过程中，屏蔽效果逐渐趋于稳定。

## 5. 结论

1) 在变电站内靠近变压器线圈和高压母线的位置工频电场和磁场强度较高(但是仍然低于国家限值标准)，但是在观测点远离的变压器和母线的过程中，电场和磁场强度显著衰减。在附建式变电站墙体边界处，工频电场和磁场已经衰减到较低水平，远远低于国家限值标准。也就是说只要预留一定的空间距离，即使未采取屏蔽措施，也可使变电站外的电场和磁场衰减至较低水平；

2) 混凝土墙体对工频电场具有一定屏蔽作用，墙体厚度增加屏蔽效果增强，但总体而言屏蔽效果有限；

3) 相对介电常数越大的材料对工频电场的屏蔽效果越好；相对磁导率越大的材料对工频磁场的屏蔽效果越好。

4) 随着屏蔽网格尺寸减小，屏蔽效能有所提高，但是改善的效果逐渐趋于稳定；屏蔽板的屏蔽效果优于屏蔽网格，但是兼顾屏蔽效果和工程造价，推荐采用屏蔽网格。本文在上述内容中已详细介绍故障设备定位系统的结构、功能以及定位原理，下面对本系统功能进行功能测试。

## 参考文献 (References)

- [1] Krajewski, W. (2004) Numerical modelling of the electric field in HV substations. *IEE Proceedings of Science, Measurement and Technology*, **151**, 267-272.
- [2] Safigianni, A.S. and Tsompanidou, C.G. (2005) Measurements of electric and magnetic fields due to the operation of indoor power distribution substations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **20**, 1800-1805.
- [3] Nicolaou, C.P., Papadakis, A.P., Razis, P.A., Kyriacou, G.A. and Sahalos, J.N. (2012) Experimental measurement, analysis and prediction of electric and magnetic fields in open type air substations. *Electric Power Systems Research*, **90**, 42-54.
- [4] Munteanu, C., Pop, L.T., Tapa, V., Hangea, C., Gutiu, T. and Lup, S. (2012) Study of the magnetic field distribution inside very high voltage substations. *2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 25-27 October 2012, Iasi, 660-663.
- [5] 云玉新, 赵笑笑, 罗壬彤, 杨帆 (2009) 采用 BEM 计算高压变电站工频电场. *山东电力技术*, **5**, 17-20.
- [6] 林秀钦, 梁家盛, 吴沃生 (2008) 220 kV 变电站电磁环境实测分析. *电网技术*, **2**, 85-87.
- [7] 杜志叶, 阮江军, 干喆渊, 阮祥勇, 荣荣, 聂靓靓, 周鑫, 廖才波 (2012) 变电站内工频电磁场三维数值仿真研究. *电网技术*, **4**, 229-235.
- [8] 牟秋谷, 周凯, 肖先勇 (2011) 3 种典型 220 kV GIS 变电站进线方式的电磁场分析. *四川电力技术*, **5**, 30-33.
- [9] 张熠 (2003) 500 kV 变电站电磁环境分析与保护小间屏蔽技术的研究. 硕士论文, 华北电力大学, 北京.
- [10] 杨帆, 姚德贵, 彭卉, 何为 (2010) 高压变电站工频电磁场屏蔽效能测试及分析. *高压电器*, **1**, 85-88.
- [11] 张广洲, 路遥, 万保权, 张小武, 鄂雄 (2007) 1000 kV 变电站保护小室屏蔽措施研究. *高电压技术*, **12**, 62-65.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源（Open Access）电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

