

Analysis of Electromagnetic Radiation Characteristics of Bare Busbar Discharge in High Voltage Switchgear

Xianghui Kang, Hongfu Guo*

Xidian University, Xi'an Shaanxi
Email: hfguo@xidian.edu.cn

Received: Nov. 2nd, 2018; accepted: Nov. 15th, 2018; published: Nov. 22nd, 2018

Abstract

In the operation of high voltage switchgear, electrical discharge is the main phenomenon which occurs in the knife gate, contact or when contact failure happens. The non-contact electrical discharge measurement method is the preferred method to realize the condition monitoring. Therefore, it is of great value to study the electromagnetic radiation caused by busbar insulation defects in the high voltage switchgear. In this paper, based on the antenna principle and electromagnetic field theory, the electromagnetic radiation simulation model of busbar is established by HFSS. The electromagnetic radiation field strength and frequency distribution of the bare busbar in the high voltage switchgear are analyzed to obtain the radiation and frequency characteristics when the busbar failure happens. The simulation results show that the frequency corresponding to the maximum field strength at the non-contact measurement point will decrease with the increase of the width and length of the busbar. The busbar has the strongest radiation in the vertical direction. When the busbar width increases, the busbar's radiation gradually weakens. When the length of the bare busbar increases, the radiation of the busbar will gradually increase. According to the analysis results, the recommendations for the measurement position and frequency selection are given, which provides an important guiding direction and theoretical basis for the state detection design of the high voltage switchgear.

Keywords

High Voltage Switchgear, Busbar, Discharge, Electromagnetic Radiation, Fault Detection

高压开关柜裸露母线放电时的电磁辐射特性分析

康向辉, 郭宏福*

*通讯作者。

西安电子科技大学, 陕西 西安
Email: hfguo@xidian.edu.cn

收稿日期: 2018年11月2日; 录用日期: 2018年11月15日; 发布日期: 2018年11月22日

摘要

运行中高压开关刀闸、触点或接点发生故障时产生放电是主要现象, 使用非接触的放电电磁测量法是实现状态监测的优选方法, 因此研究高压开关柜中母线绝缘缺陷带来的放电电磁辐射具有重要的应用价值。本文利用天线原理和电磁场理论, 采用HFSS仿真软件, 建立母线的电磁辐射仿真模型, 分析放电情况下, 高压开关柜中裸露母线的电磁辐射场强分布和频率分布, 以求得到母线发生故障时的辐射特性和频率特性。仿真结果表明: 在非接触的测量点场强最大值对应的频率会随着母线宽度和长度的增加而逐渐减小; 母线在垂直方向上的辐射最强, 当母线宽度增加时, 母线的辐射逐渐减弱; 当裸露母线长度增加时, 母线的辐射会逐渐增强; 根据分析结果, 给出了测量位置和频率选择的建议, 为高压开关柜的状态检测设计提供了重要的指导方向和理论依据。

关键词

高压开关设备, 母线, 放电, 电磁辐射, 故障检测

Copyright © 2018 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

高压开关柜作为分配和接受电能的重要电力设备, 广泛应用于输、配电网的每一个环节, 它的安全运行直接关系到整个电网的安全和电力系统对用户的供电质量, 是电力系统中最重要电气设备之一。但由于开关柜本身设计的缺陷、制造过程中工艺不完善、设备安装运行维护要受实际操作环境影响等因素, 事故率一直在一个相对较高的水平。长期的运行和检修经验表明, 开关柜运行故障事故的发生究其原因绝大多数是由于开关柜内部的绝缘破坏造成的[1] [2] [3]。绝缘性故障是高压开关柜的主要故障, 对局部放电检测可以得到绝缘故障的信息。

高压开关柜中在发生局部放电时, 会产生特高频电磁波信号, 而研究这种特高频电磁波信号的辐射特性对开关柜的局放检测有着重要的意义。在实际工程中, 局部放电发生后, 电磁波信号一部分从放电处直接辐射到空间, 而另一部分通过母线传输, 再从母线的裸露处辐射到空间。郭宏福等人研究了 GIS 设备中局部放电信号的电磁波传播和泄露特性[4]。常文治、唐志国等人利用时域有限差分法(FDTD)对特高频电磁波在变压器内部的传播特性进行了仿真分析[5]。纪鹏对变压器中局部放电特高频电磁波的传播特性进行了研究[6]。仇祺沛仿真研究了 GIL 内 UHF 信号的传播特性[7]。黄诗敏对开关柜局部放电产生的电磁波在开关柜缝隙处的传播特性、电场强度分布等进行了理论分析[8]。华侨大学的许超在其硕士论文中运用 FDTD 对高压开关柜内的局放电磁波传播特性进行了仿真分析[9]。以上都是对局放产生的电磁波信号传播特性的研究, 并没有对其辐射特性做研究。另外, 虽然陈仕修、郭宏福等人根据天线等效放电辐射的过程, 基于电磁波理论建立了天线模型, 利用天线等效模型研究了局部放电的电磁辐射[10] [11]。

也有研究人员采用一个短振子天线来等效放电辐射[12] [13]。这是目前主要的放电电磁辐射场等效分析。但上述研究人员所研究的重点是电磁波信号直接从放电处辐射到空间的情况, 而对电磁波信号通过母线传输再从母线裸露处辐射到空间的情况研究分析较小。本文针对此问题, 基于传输线和天线辐射理论, 对高压开关柜中裸露的母线在放电情况下的电磁辐射特性做详细的研究。

本文根据开关柜现有结构, 模拟仿真高压开关柜中一小段裸露母线放电时的电场分布情况以及母线尺寸变化时的影响, 用非接入的方式来测量母线辐射, 研究母线绝缘缺陷带来放电的电磁辐射, 根据仿真结果对开关柜内母线的辐射进行准确的测量, 进而对母线的绝缘性能做出判断, 实现高压开关柜的绝缘性故障检测, 解决长期运行的隐患, 确保开关柜运行的可靠性和安全性。

2. 裸露母线放电时的电磁辐射仿真模型

为研究高压开关柜中母线的电磁辐射场强分布, 本文以高压开关柜中一小段裸露的母线作为研究对象, 利用理论分析方法, 结合 HFSS 仿真软件, 对这一小段母线发生放电时的电磁辐射场进行仿真分析, 得到其频率特性和场分布特性。

说明: X 轴方向为厚度, Y 轴方向为宽度, Z 轴方向为长度。

开关柜中的母线表面会有电流通过, 根据电磁辐射理论, 母线周围会产生电磁辐射, 但开关柜中的母线大部分被绝缘套管或其他结构遮住, 而被遮住的部分其电磁辐射很弱, 只有裸露的一小部分会有较强的电磁辐射。这部分裸露母线的表面电流类似于天线理论中的无数个电流元叠加而向外辐射。因此, 在利用 HFSS 软件进行仿真与分析时, 只选取裸露的一小段母线作为研究对象, 将这段母线的辐射类比为线天线的辐射进行研究。另外, 局部放电信号的频谱比较宽, 大约在 300 MHz~5000 MHz 之间, 而经过实际测试, 振幅较大的频段在 500 MHz~3 GHz 之间。因此, 在研究母线的频率特性时, 将 500 MHz 至 3 GHz 作为研究的重点范围。

建立母线的电磁辐射三维仿真模型如下: 高压开关柜中母线感生的空间电磁场可以按似稳恒电场来处理(即: 可以忽略空间电荷和位移电流的影响)。在仿真分析中, 只研究母线的辐射场, 假设母线周围空气绝缘, 母线室内空气均匀, 不存在其它杂质。假设母线的几何参数为 200 mm (长) × 60 mm (宽) × 5 mm (厚), 如图 1(a), 根据辐射边界条件的满足关系, 设定边界的几何参数为 500 mm (长) × 400 mm (宽) × 320 mm (厚), 如图 1(b)。设定母线的材质为理想导体(pec), 并设激励方式为电流源激励, 使母线表面通过 1 A 的电流, 边界条件设定为全吸收的辐射边界条件, 测定母线的频率分布时测量点选在 X 轴上距母线表面 2 cm 处(P 点), 如图 1(c)。建立的仿真模型如图 1 所示。

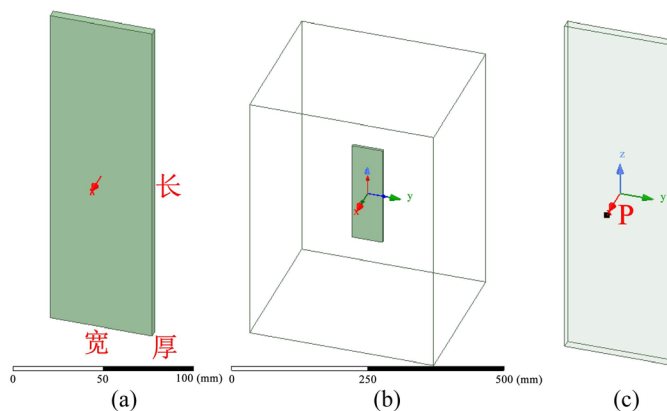


Figure 1. Electromagnetic radiation model of busbar, (a) busbar model, (b) Boundary size, (c) Measuring point position
图 1. 母线的电磁辐射模型, (a) 母线模型, (b) 边界尺寸, (c) 测量点位置

3. 裸露母线放电时的电磁辐射特性仿真分析

3.1. 母线尺寸固定时的电磁辐射特性

在母线几何参数固定为 200 mm (长) × 60 mm (宽) × 5 mm (厚)的条件下, 经仿真, 得到测量点(P 点)处的频率分布图如图 2。

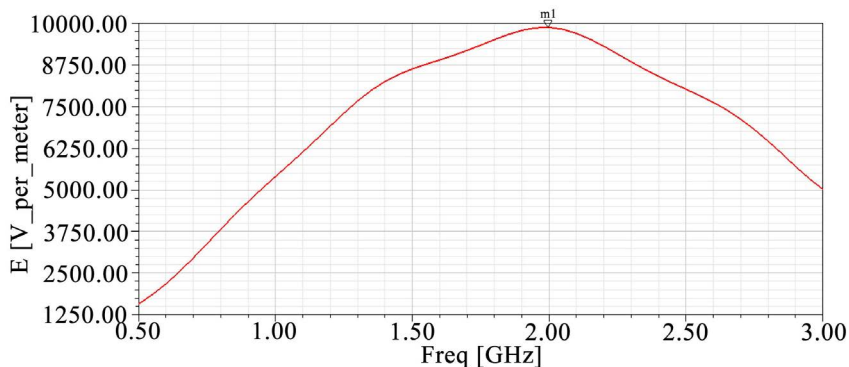


Figure 2. Frequency distribution of point P
图 2. P 点处的频率分布图

从图 2 的频率分布图中可以看出, 在 0.5 GHz~2 GHz 范围内, 测量点的电场强度会随着频率的增加而不断增大, 在 2 GHz 时辐射场最强, 在 2 GHz~3 GHz 范围内, 测量点的场强随着频率的增加又逐渐减小。在 2 GHz 工作频率条件下, 得到 XOY 面, XOZ 面, YOZ 面的场强分布图如图 3, E 面、H 面的方向图及三维方向图如图 4。从图 3 的场强分布图中可以看出, ±X 轴方向的辐射最强, ±Y 轴方向次之, ±Z 轴方向最弱。图 4 中, 在 E 平面, $\theta = \pm 90^\circ$ 方向上辐射最大, 且在这个方向上有两个左右对称的主瓣, 另外, 在 $\theta = \pm 30^\circ$ 方向和 $\theta = \pm 150^\circ$ 方向上各有一个副瓣; 在 H 平面, $\varphi = 0^\circ$ 方向和 $\varphi = 180^\circ$ 方向上辐射最大, 且在这两个方向上有两个上下对称的波瓣; 三维方向图中, 中间有一个大的主瓣, 主瓣上下两侧有两个对称的副瓣。

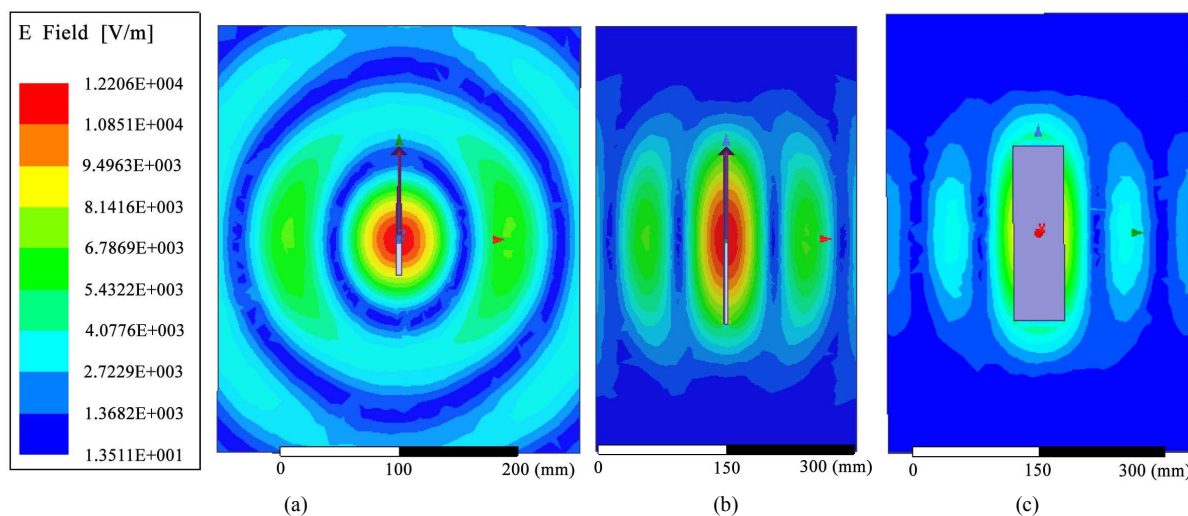


Figure 3. Electric field intensity distribution map of fixed busbar size, (a) XOY face electric field intensity distribution map, (b) XOZ face electric field intensity distribution map, (c) YOZ face electric field intensity distribution map
图 3. 母线固定尺寸的场强分布图, (a) XOY 面场强分布图, (b) XOZ 面场强分布图, (c) YOZ 面场强分布图

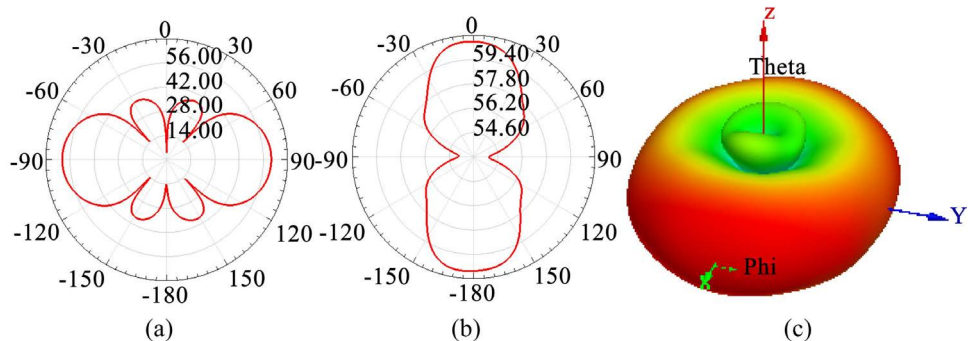


Figure 4. Radiation pattern of fixed busbar size, (a) E-plane pattern, (b) H-plane pattern, (c) 3D pattern
图 4. 母线固定尺寸的方向图, (a) E 面方向图, (b) H 面方向图, (c) 三维方向图

根据天线理论, 母线的宽度、长度和厚度变化时, 对母线的场强分布和频率分布都会有影响, 因此下文对母线尺寸变化时的频率分布和场强分布做进一步的研究分析。

3.2. 母线宽度变化时对辐射特性的影响

3.2.1. 母线宽度变化对频率分布的影响

分别在母线宽度为 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、100 mm 时, 得到母线在测量点(P 点)处的频率分布图如图 5:

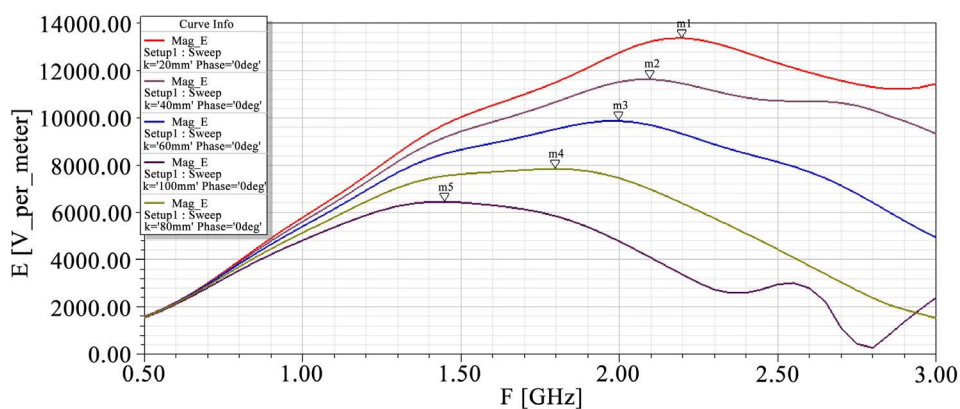


Figure 5. Frequency distribution diagram when the busbar width changes
图 5. 母线宽度变化时的频率分布图

由频率分布图可以看出, 随着频率的增加, 测量点的电场强度基本都是先增大到最大值然后逐渐减小。随着母线宽度的增加, 测量点的最大场强值会逐渐减小, 并且最大场强值对应的频率也随着母线宽度的增加呈递减趋势。

3.2.2. 母线宽度变化对场强分布的影响

在分析母线宽度变化对其电磁辐射场强分布有什么影响时, 将工作频率统一设置为 2 GHz, 母线电磁辐射仿真模型的长度和厚度保持不变, 宽度分别设为 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、100 mm 时, 研究其电磁辐射场强分布。

经仿真, 得到母线在三个坐标平面内的场强分布形态与图 3 类似, 只是 X 轴和 Y 轴方向上场强值的大小不同, 在表 1 中列出了母线宽度变化时 X 轴和 Y 轴方向上场强最大值的变化, 从图 6 的归一化方向图中也可以看出场强分布的变化。

Table 1. Comparison of electric field strength when busbar width changes

表 1. 母线宽度变化时场强的比较

母线宽度/mm	20	40	60	80	100
X 轴方向上场强的最大值(V/m)	1.5178×10^4	1.4040×10^4	1.2105×10^4	9.9348×10^3	7.4758×10^3
Y 轴方向上场强的最大值(V/m)	1.4522×10^4	1.1700×10^4	8.3890×10^3	6.0005×10^3	5.0725×10^3

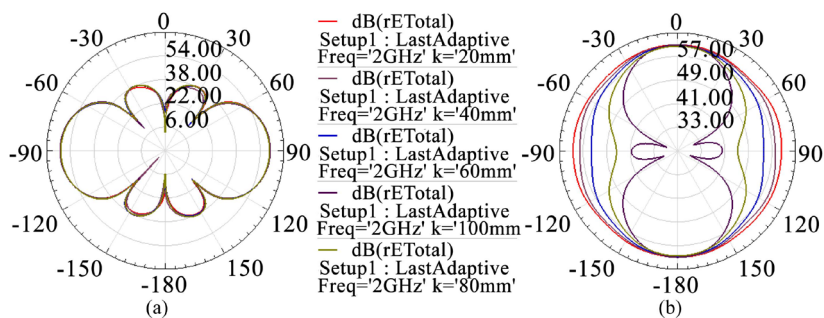


Figure 6. Comparison of radiation pattern when busbar width changes, (a) E-plane pattern, (b) H-plane pattern

图 6. 母线宽度变化时的方向图比较, (a) E 面方向图, (b) H 面方向图

从图 6 可以看出, 母线宽度变化时, E 面方向图基本保持不变, H 面方向图中, 随着母线宽度的增加, $\varphi = \pm 90^\circ$ 方向上电场强度在逐渐减弱, 100 mm 时又有两个幅度较小的波瓣出现。 $\varphi = 0^\circ$ 方向和 $\varphi = 180^\circ$ 方向上电场强度一直最大且保持不变。从表 1 也中可以看出, 当母线宽度增加时, X 轴方向上和 Y 轴方向上场强的最大值都会逐渐减小, 说明宽度增加时, 母线的辐射在逐渐减弱。

3.3. 母线长度变化时对辐射特性的影响

3.3.1. 母线长度变化对频率分布的影响

分别在母线长度为 120 mm、140 mm、160 mm、180 mm、200 mm 时得到母线在测量点(P 点)的频率分布图如图 7。

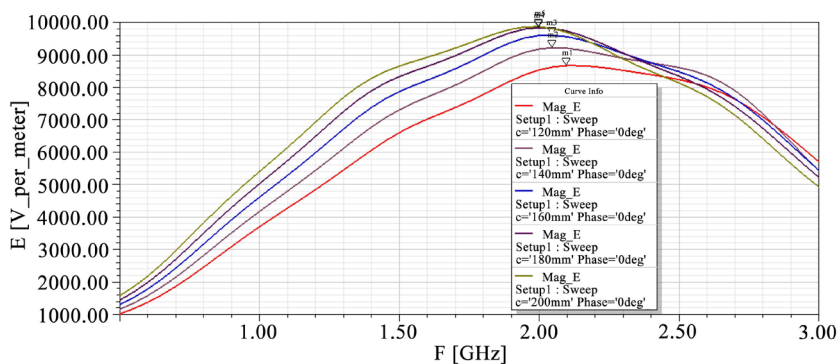


Figure 7. Frequency distribution diagram when the length of the busbar changes

图 7. 母线长度变化时的频率分布图

由频率分布图可以看出, 随着频率的增加, 测量点的电场强度会逐渐增大, 达到一个最大值后又随着母线长度的增加而逐渐减小。另外, 测量点最大场强值对应的频率随着母线长度的增加呈递减趋势。

3.3.2. 母线长度变化对场强分布的影响

在 2 GHz 工作频率条件下, 母线电磁辐射仿真模型的宽度和厚度保持不变, 长度分别设为 150 mm、

300 mm、450 mm、600 mm 时, 研究其电磁辐射场强分布。

经仿真, 得到母线在三个坐标平面的分布形态与图 3 基本一致, 只是 X 轴和 Y 轴方向上场强的大小不同, 在表 2 中列出了母线长度在 200 mm 内变化时 X 轴和 Y 轴方向上场强最大值的变化, 从图 8 的三维方向图中可以看出场强分布的变化。

Table 2. Comparison of electric field strength when busbar length changes

表 2. 母线长度变化时场强的比较

母线长度/mm	120	140	160	180	200
X 轴方向上场强的最大值(V/m)	1.0206×10^4	1.1000×10^4	1.1550×10^4	1.1882×10^4	1.2105×10^4
Y 轴方向上场强的最大值(V/m)	7.7220×10^3	7.8553×10^3	8.2887×10^3	8.3759×10^3	8.3890×10^3

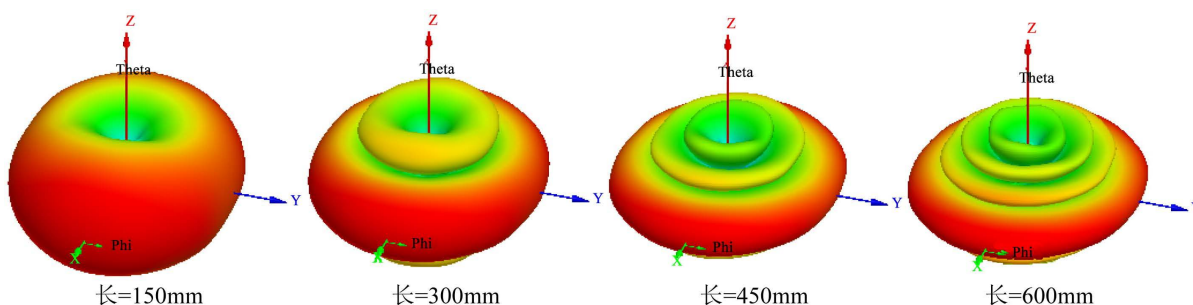


Figure 8. Comparison of radiation patterns when the length of the busbar changes

图 8. 母线长度变化时的方向图比较

从图 8 中可以看出, 在 2 GHz 工作频率条件下, 母线长度每增加 150 mm, 就会在上下两侧各增加一个完整的副瓣, $\theta = \pm 90^\circ$ 方向上场强一直最大, 即 $\pm X$ 轴方向上辐射一直最强; 从表 2 中可以看出随母线长度的增加, X 轴和 Y 轴方向上场强的最大值随母线长度的增加而不断变大, 说明母线长度增加时, 母线辐射增强。

3.4. 母线厚度变化对辐射特性的影响

由于在实际生活中的母线不会太厚, 因此本文只对母线厚度在 10 mm 以内的情况作以研究, 经研究发现, 由于母线厚度不足 1 cm, 相比于长度和宽度来说比较小, 因此厚度变化对母线频率分布和辐射分布的影响都比较小, 其频率分布和场强分布都比较接近, 结果如图 9 和如图 10 所示。

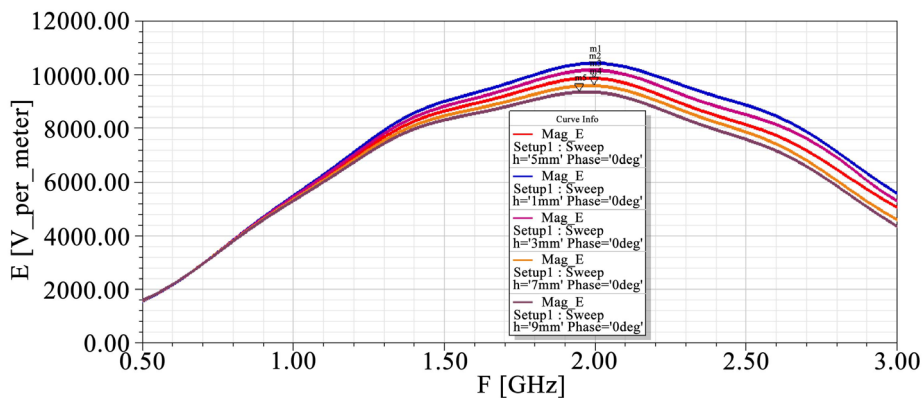


Figure 9. Frequency distribution diagram when the thickness of the busbar changes

图 9. 母线厚度变化时的频率分布图

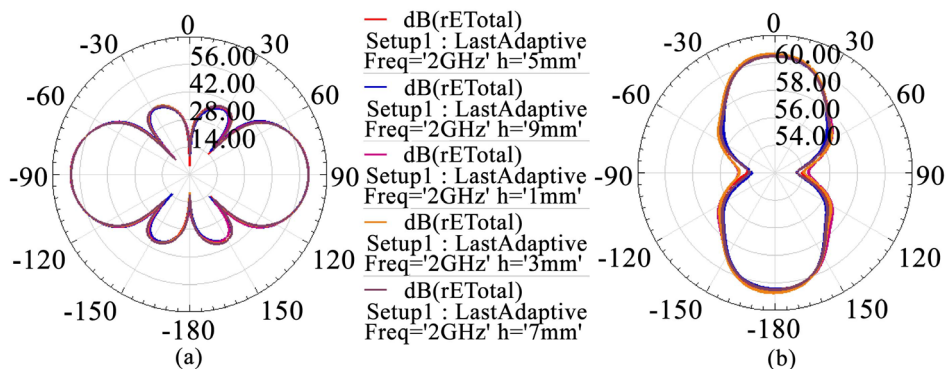


Figure 10. Comparison of radiation patterns when the thickness of the busbar changes, (a) E-plane pattern, (b) H-plane pattern

图 10. 母线厚度变化时的方向图比较, (a) E 面方向图, (b) H 面方向图

3.5. 总结与结论

本文利用电磁场理论和天线原理, 并结合 HFSS 仿真软件, 通过建立高压开关柜中一小段裸露母线的电磁辐射仿真模型, 对母线长度、宽度和厚度变化时, 母线的辐射场强分布和频率进行了仿真分析, 获得了母线的辐射场的分布特性和频率特性, 并对辐射场的最佳测量位置提出建议, 主要结论如下:

1) 测量频率选择的建议: 通过频率分布图的对比得到, 最大场强对应的频率基本在 2 GHz 左右, 因此测量时为了得到最大的辐射场强, 频率应该接近这个值, 当宽度或长度较大时, 要适当减小, 反之则要适当增大。

2) 测量位置选择的建议: 通过分析总结, 得到母线在 $\pm X$ 轴方向上 3 cm 范围内的辐射场最强。因此, 测量的位置要选在母线宽度所在平面的垂直方向上, 并且距母线中心的距离在 3 cm 内, 另外, 测量时, 场强值会随着电流相位的变化而改变, 在多个测量值中需要选择最大值。

上述结论对于母线产生故障时的检测与定位具有理论指导意义, 并对改善高压开关柜内部电场分布, 进行局部电场优化, 提高整体的绝缘水平, 以及指导现场运行检修具有一定参考价值。

参考文献

- [1] 张国光. 电气设备带电检测技术及故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 国网公司运维检修部. 电网设备带电检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 何肖军, 徐志斌. 高压开关柜绝缘性能检测与故障诊断技术研究[J]. 浙江电力, 2010(5): 6-10.
- [4] Guo, H.F., Mi, F. and Tang, J.F. (2012) Electromagnetic Leakage Characteristics Simulation of PD with the Specific Structure GIS Disc Insulator. *IEEE Conferences*, 551-554.
- [5] 常文治, 唐志国, 李成榕, 王彩雄. 变压器局部放电 UHF 信号传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1629-1634.
- [6] 纪鹏. 局部放电特高频信号的传播特性研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2017(16): 0011-0013.
- [7] 仇祺沛. 局部放电 UHF 电磁波信号在 GIL 内传播特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [8] 黄诗敏. 10 kV 开关柜局部放电带电检测技术应用与仿真分析研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [9] 许超. 基于 UHF 的 10 kV 高压开关柜局部放电在线监测研究[D]: [硕士学位论文]. 泉州: 华侨大学, 2017.
- [10] 陈仕修, 沈远茂, 吴远利, 蔡伟. 针-板电极电晕放电辐射电磁波的等效模型[J]. 高电压技术, 2002(S1): 9-11.
- [11] 郭宏福, 吕福胜. 放电脉冲电磁信号的时频特性测量与分析[J]. 应用光学, 2012, 33(S): 90-94.

-
- [12] 胡小锋, 刘尚合, 王雷, 魏明, 刘卫东. 尖端导体电晕放电辐射场的计算与实验[J]. 高压电技术, 2012(9): 2266-2272.
- [13] 常天海, 尹俊勋, 汪志成, 琴曦. 静电放电电磁辐射模式的建立与仿真[J]. 安全, 2006(6): 20-22.

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