

文章编号: 2095-4980(2020)05-0863-07

基于 XFDTD 的箱变开孔金属外壳雷电电磁脉冲防护

张子恒, 田杨萌, 王彩霞

(北京信息科技大学 理学院, 北京 100192)

摘要: 为研究户外配电设备对雷电电磁脉冲(LEMP)的防护能力, 利用基于时域有限差分法(XFDTD)的全波三维电磁场模拟仿真软件对近场 LEMP 与户外箱变金属开孔外壳的耦合情况进行仿真模拟, 得到 3 种正面具有不同形状散热孔阵的箱变在距回击点 30 m 处, 其内部距开孔位置 5 cm, 50 cm 和 100 cm 处的耦合电场强度与电磁功率密度。研究表明, 能量主要集中在低频段(2 MHz 以下)的 LEMP 与正面有散热孔阵的变电站腔体发生耦合时, 耦合进内部的电磁能量主要集中在开孔附近; 对于相同排列方式的孔阵, 腔内耦合电磁能量按照长方形、正方形和圆形顺序依次减小, 具有圆形孔阵的变电站电磁屏蔽效能最佳; 腔体内远离开孔处的电磁危害要小于开孔位置附近, 耦合电磁能量可能会严重干扰变电站的正常工作, 但不会损坏其内部电子元件。

关键词: 电磁损伤; XFDTD 仿真软件; 雷电回击; 耦合电场

中图分类号: TN78

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019220

Lightning electromagnetic pulse protection ability of box-type substation with slots based on XFDTD

ZHANG Ziheng, TIAN Yangmeng, WANG Caixia

(College of Applied Sciences, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The ability of outdoor power distribution equipment to protect against the Lightning Electromagnetic Pulse(LEMP) is studied by XFDTD full wave 3D electromagnetic field simulation software based on Finite Difference Time Domain(FDTD) method, including simulating the coupling of the near-field lightning electromagnetic pulse with the cabinet of outdoor box-type substation, which is characterized with slots. The coupling electric field strength and the electromagnetic power density of the three types of substations with different shapes of aperture array are obtained at 30 m from the return point, and at 5 cm, 50 cm and 100 cm from the opening position. It is concluded that when the LEMP whose energy is mainly concentrated on the low frequency band(below 2 MHz) couples on the anterior aperture array, the coupled electric field energy in the substation is mainly focused near the opening. The electromagnetic energy coupling into the substation with rectangular, square and circular aperture arrays decreases in turn, and the substation with circular aperture array has optimum shielding effectiveness. The electromagnetic hazard in the cavity far away from the aperture array is less than that near the opening position. The coupled electromagnetic energy will have impacts on the normal operation of the substation, but will not damage its internal electronic components.

Keywords: electromagnetic damage; XFDTD; lightning return stroke; coupled electric field

近年来, 有关电磁脉冲与开孔屏蔽体耦合的研究^[1-4]成为人们关注的焦点, 但多针对高频段电磁脉冲, 对雷电、工频段的强电磁脉冲的毁伤效应尚缺乏系统性研究。一些含电磁敏感元件的设备露天放置, 如电力设备、通信设备、气象站等, 其工作环境多处于户外或较为空旷的地带, 设备体积大, 无墙体防护, 为保证其良好的散热、通风, 设备外壁通常有散热孔、通风孔, 这样设备便成为不完全屏蔽体。强雷电发生时的电磁脉冲能够

收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41375012); 北京市自然科学基金资助项目(KZ201411232037)

作者简介: 张子恒(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷电电磁脉冲防护、电磁兼容。email: zhangziheng@mail.bistu.edu.cn

通过这些孔耦合进入设备内部, 干扰、损坏其内电磁敏感元件, 影响设备的正常运行, 这种孔缝耦合的强电磁脉冲, 是电磁脉冲防护的难点之一^[5-7]。

对于雷电防护, 人们多关注的是雷击设备时避雷针接闪后有有线传输浪涌带来的危害^[8-11], 由于三维空间传输的雷电电磁脉冲(LEMP)不易观测, 人们对 LEMP 带来的电磁危害关注较少, 但随着微电子技术的发展, 电子设备的电磁敏感度大幅上升, 当雷电回击近场区, LEMP 直接作用在未加屏蔽的电子电气系统上, 会严重干扰其正常工作, 甚至会对其造成永久性破坏。鲍永波等已针对 LEMP 对小型电子设备(便携计算机)的电磁危害进行研究^[12-13], 得出 LEMP 对便携计算机的电磁危害不足以损坏其内部电子元器件, 但能干扰其正常运行的结论。但对于许多大中型电子电气设备, 一方面由于环境密封要求, 会存留一些未完全密封的门缝隙, 可能成为电磁脉冲干扰源的耦合路径或产生电磁泄露对设备运行造成威胁^[14-16]; 另一方面, 设备自身能耗较高, 设备体外壁常需要开具较大面积通风散热孔阵, 以保证其正常工作, 这样的大型不完全屏蔽体更容易受到来自 LEMP 的电磁危害。对于大中型设备的 LEMP 防护能力亟待进行系统性研究。雷电回击过程中近场 LEMP 是波形复杂的电磁脉冲, 与大中型开孔屏蔽腔体的耦合可利用电磁数值计算方法进行求解, 目前常用的电磁计算方法主要有矩量法、时域有限差分法、有限元法等^[17], 但计算量大, 对于复杂开孔屏蔽腔体的耦合计算一般需借助仿真软件完成。XFDTD 是一款基于时域有限差分法(FDTD)^[18]的全波三维电磁场模拟仿真软件, 计算功能强大, 具有建模方便、可视化的优点, 能够实现对复杂物体的几何建模与电磁环境的时域分析。

本文基于 XFDTD 电磁仿真软件, 针对大中型设备金属外壳具有通风散热孔的特征, 研究其对 LEMP 的防护能力。选择一款大中型配电设备——箱式变电站作为研究对象, 建立外壁具有散热孔阵的箱变三维模型, 对人工引雷实测 LEMP 波形进行拟合, 并将其作为平面波激励源导入, 通过研究变电站内部耦合场强来分析 LEMP 与箱变的电磁耦合特性; 并通过其内部电磁功率密度研究箱变对近场雷电电磁脉冲的电磁防护能力, 进而为大中型电子设备的雷电电磁场防护评估提供相关依据。

1 近场区 LEMP

强 LEMP 为快速变化的闪电回击电流产生, 因此 LEMP 波形与回击电流波形之间存在内在联系, 文献[19]针对两者相关性进行了研究, 得出近场区 LEMP 波形与回击通道基电流的波形近似的结论。基于上述结论, 为简化工程计算, 本文使用双指数函数模拟近场区 LEMP。1941 年, Bruce 和 Golder 提出了双指数函数^[20]的数学表达式:

$$E(T) = A_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (1)$$

式中: A_0 为峰值电压; α 为决定场强衰减的时间常数; β 为决定场强上升的时间常数。

利用式(1)拟合了 2009 年山东滨州一次人工触发闪电 30 m 处先导—回击电场强度^[21], 拟合参数见表 1, 先导—回击电场波形快速变化部分的拟合曲线见图 1。

对 30 m 处实测电场波形进行快速傅里叶变换, 可以得到近场 LEMP 电场分量时域波形对应的频谱图, 如图 2 所示。由图可知雷电电磁脉冲为低频电磁脉冲, 频率范围主要分布在 2 MHz 以下, 这与电场观测仪器的带宽范围相吻合。

对于 LEMP, 其电磁能量主要集中在场强迅速变化的部分, 也正是这部分瞬变电场才有可能对电子设备造成损伤。因此, 本文对拟合波形进行截断, 如图 1 所示, 只保留电场变化较快且相对完整的波形, 并将截断后的波形作为平面波激励源。当入射波极化方向平行于孔缝短边时, 孔缝长宽比越大, 则耦合进入腔体内部电场强度越大^[22], 故设置激励源极化方向为 E_y 方向。

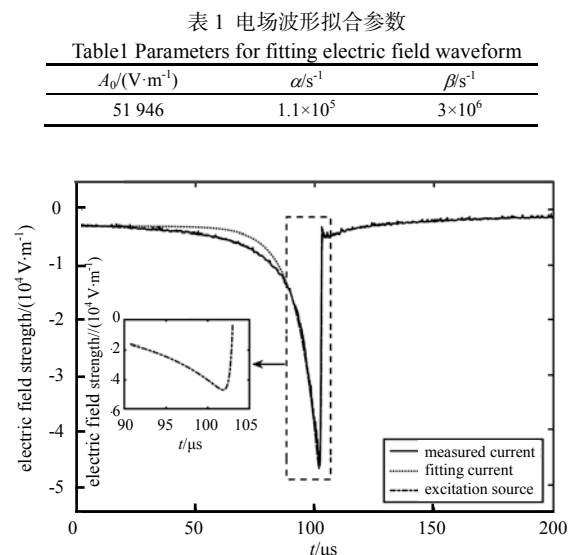


Fig.1 Comparison of measured data and fitted waveform of artificially triggering lightning leader-return electric field at 30 m

图 1 一次人工触发闪电 30 m 处先导—回击电场实测数据与拟合波形对比图

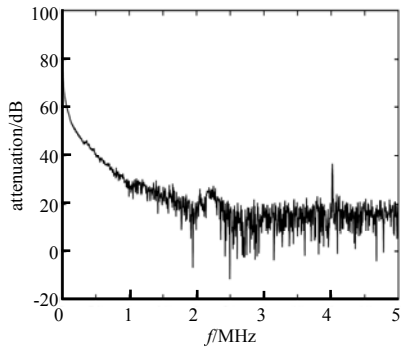


Fig.2 Frequency spectrogram of the leader-return measured electric field waveform at 30 m from the channel
图 2 距离通道 30 m 处先导-回击实测电场波形频谱图

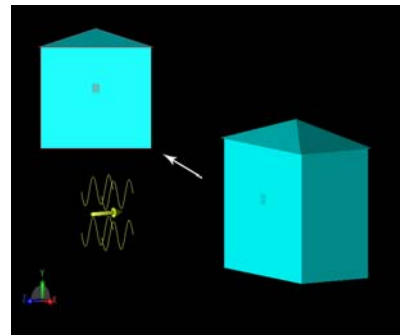


Fig.3 3D model of box substation
图 3 箱式变电站三维模型

2 XFDTD 电磁仿真环境中的箱变的开孔屏蔽体建模

2.1 箱变腔体的模型建立

按照某型号户外箱式变电站(箱变)实际尺寸建立箱变(空腔)模型,如图 3 所示。其外部尺寸为 $360\text{ cm} \times 300\text{ cm} \times 200\text{ cm}$,箱变壁厚度为 4 mm ;设置箱体材料的电导率为 $1.03 \times 10^7\text{ S/m}$,相对磁导率为 1。在箱变腔体模型的基础上,根据箱变实际开孔情况在其侧壁开具长方形散热孔阵,孔阵由 14 个单孔组成,相邻单孔垂直间距为 25 mm ,水平间距为 20 mm 。为研究孔阵形状对箱变内部耦合电场的影响,分别选择 3 种形状的单孔(开孔面积相同)组成孔阵^[23]进行研究,长方形开孔规格为 $100\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,正方形开孔规格 $31.6\text{ mm} \times 31.6\text{ mm}$,圆形开孔直径为 35.6 mm ,3 种散热孔阵如图 4 所示。

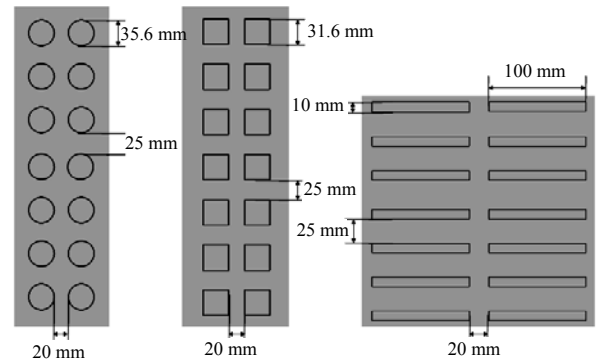


Fig.4 Schematic diagram of round, square and rectangular aperture arrays
图 4 圆形、正方形和长方形孔阵示意图

2.2 XFDTD 电磁仿真环境的参数设置

2.2.1 Courant 稳定条件的确定

在使用 XFDTD 软件对开孔屏蔽体建模过程中遇到的主要问题是确定 Yee 元胞^[18]大小以及时间步长,这是保证 FDTD 求解的数值稳定性,也是实现电磁数值仿真的高效性与稳定性的必要条件。

$$\Delta t = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 分别为沿坐标轴方向的空间步长。该式给出了空间和时间离散间隔之间应当满足的关系,又称为 Courant 稳定条件^[24]。

2.2.2 元胞尺寸与时间步长设置

有效地设置元胞的尺寸是获得准确仿真结果的必要条件,元胞划分越精细,仿真模型中的电磁传播特性就越精确,但计算所需的内存和运行时间增加。本文相关参数设置如图 5 所示,使用 15 个元胞表征一个波长,目标元胞尺寸为 19.9862 mm ,最小特征尺寸为 3.33 mm ,时间步长为 6.4946 ps 。

XFDTD 仿真软件具备“智慧型”网格划分功能,可以针对模型结构的特殊性,对其相关区域进行网格非均匀化处理,确保计算空间中电场分量、磁场分量沿 Yee 网格路径更加准确地更新,图 6 为不同形状单孔的网格划分情况。

2.2.3 计算区域与吸收边界条件

为在有限计算区域内模拟无界空间中的电磁场问题,必须在计算区域边界处设置吸收边界条件。本文在 XFDTD 中设置计算区域的截断边界处的吸收边界条件为 7 层完全匹配层(P Perfectly Matched Layer, PML),PML 层为有耗介质,进入 PML 层的透射波将迅速衰减^[24]。

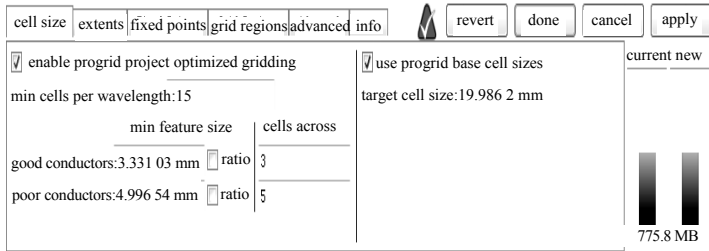


Fig.5 Setting of calculation parameters
图 5 计算参数设置

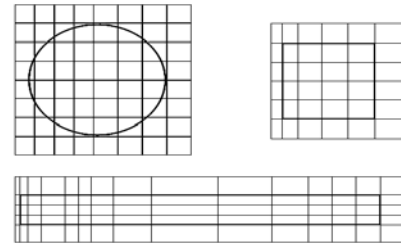


Fig.6 Meshing at the apertures
图 6 开孔处网格划分

3 仿真结果及分析

3.1 箱变腔体内部电磁耦合特性

通过箱变内部 3 个观测点(分别位于距离侧壁开孔位置 5 cm, 50 cm 与 100 cm 处)的耦合场强分布情况分析 LEMP 与箱变的电磁耦合特性。根据孔缝效应可知, 当 LEMP 发生辐射并传播到金属外壁处时, 金属屏蔽体中会产生感应电流, 并产生相应的“散射”场来抵消 LEMP 的影响^[25]。当金属屏蔽体存在散热孔时, 其内部所产生的感应电流被切断, 从而导致屏蔽效能有所下降。而进入箱变内部的电磁脉冲实则则为开孔处等效磁流所产生的电磁辐射。

图 7 为具有长方形孔阵的箱变内部各观测点处耦合场强分布情况。由图可知, 箱变内部耦合电场强度随时间的增加而逐渐衰减。在 LEMP 发生入射的 88 μs 附近, 首先在距孔阵 5 cm 处产生强度较高的振荡电场波形; 随着 LEMP 在箱变腔体内部继续传播, 在 90 μs 附近箱变内部距孔阵 50 cm 处产生了强度较高的振荡波形; 同样的, 在 92 μs 附近, 箱变内部距孔阵 100 cm 处也产生了高强度振荡波形。

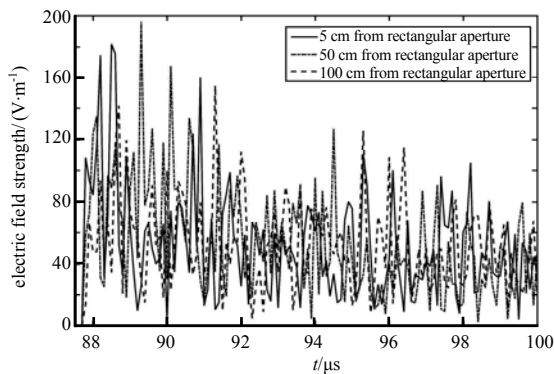


Fig.7 Coupling field strength distribution at the internal observation point of the substation with rectangular aperture array
图 7 长方形孔阵箱变内部观测点处耦合场强分布图

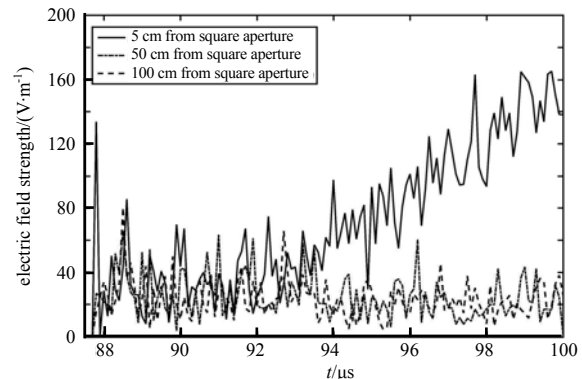


Fig.8 Coupling field strength distribution at the internal observation point of the substation with square aperture array
图 8 方形孔阵箱变内部观测点处耦合场强分布图

近场区高强度 LEMP 发生辐射时, 箱变内部形成的耦合电场强度峰值较入射波已有很大的衰减; 且由观测点采样数据可知, 耦合电场强度随时间呈衰减趋势, 这可能与入射波极化方向有关, 本文设置极化方向与孔缝短边平行, 箱变内部虽能产生较强的耦合电场, 但因为长方形孔阵宽度较窄, 其宽度明显小于入射波波长, LEMP 并不能完全耦合进入箱变内部, 使箱变内部探测点处耦合电场波形与入射波波形不一致。

图 8 为具有正方形孔阵的箱变内部观测点处耦合场强分布情况。由图可知, 箱变内部距离开孔处 5 cm 观测点处耦合电场强度随时间的增加先衰减再逐渐增强, 且其幅值要明显大于另外 2 个观测点处耦合电场强度, 距离开孔位置 50 cm 与 100 cm 处耦合电场强度随时间的增加而逐渐减小。

图 9 为具有圆形孔阵的箱变内部观测点处耦合场强分布情况。由图可知, 箱变内部距开孔位置 5 cm 观测

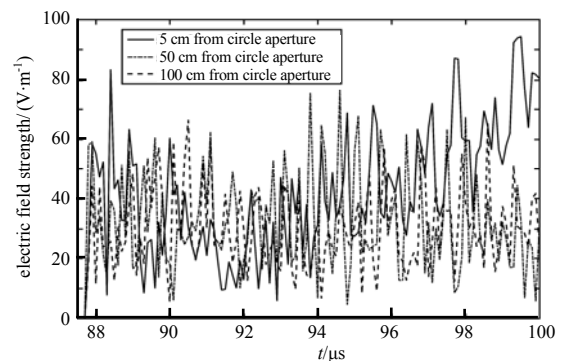


Fig.9 Coupling field strength distribution at the internal observation point of the substation with circular aperture array
图 9 圆形孔阵箱变内部观测点处耦合场强分布图

点处耦合电场强度变化规律与图 8 相似，两者都随时间的增加，电场强度先衰减后增强，其电场强度峰值要高于另外 2 个观测点处场强幅值，而另外 2 个观测点处耦合电场强度并没有明显的变化规律，幅值变化不大。

图 8 与图 9 中距离开孔 5 cm 处耦合电场强度波形变化规律相似，即随时间的增加先衰减后增强。观察 92~100 μs 时间段内的 2 条曲线波形，发现其与入射 LEMP 激励源波形变化规律相似，都随时间的增加，场强幅值逐渐增强。这是由于正方形孔阵和圆形孔阵垂直孔宽度大于长方形孔阵，其次 LEMP 极化方式为垂直极化，箱变内部会形成较强的耦合电场，且对于距离开孔处较远的位置，当 LEMP 发生入射时，其最先在距离开孔处较近位置产生耦合电场，且受到内壁电磁场反射的影响较小。

3.2 箱变内部耦合电场分布

为更加直观地理解箱变腔体内部耦合电场的分布情况，分别截取长方形开孔模式的箱变内部 3 个典型时刻的 XOZ 截面场强分布情况，如图 10 所示。颜色越深，对应场强越小；颜色越浅，对应耦合电场越大。由图可知，箱变内部耦合电场强度较辐射源处场强已有大幅度衰减。图 10(a)为 88.4 μs 时电场强度 XOZ 截面图，由图可知，LEMP 刚发生初始入射，电场能量由散热孔进入箱变内部。结合图 7~图 9 可以发现，在 LEMP 进入箱变腔体内部后，首先在最靠近开孔位置附近形成较强的耦合电场强度。图 10(b)为 90.9 μs 时电场强度 XOZ 截面图，进入箱变内部的电场能量以波的形式在其内部传播，在遇到内壁时，发生反射现象，反射波与后续进入内部的 LEMP 电场分量相遇，这可能是导致观测点处耦合电场出现振荡波形的主要原因。图 10(c)为 97.2 μs 时电场强度 XOZ 截面图，为 LEMP 入射末期箱变内部耦合电场分布情况。此阶段中，箱变内部电场强度幅值较图 10(a)与图 10(b)中存在很大程度的衰减。为进一步观察并研究内部耦合电场的分布规律，选取场强参考值-70~-60 dB 作为场强幅值的显示范围。由图可知：箱变内部耦合电场分布较为均匀，电磁能量在箱变内部扩散开来，此时耦合电磁能量分布较为均匀。这一现象解释了 3.1 节中部分耦合电场变化波形没有明显的变化规律，主要是由于变电站内部空间较为空旷，LEMP 会在其内部发生复杂的反射现象，LEMP 会在箱体的金属壁之间不断反射，直到电磁波衰减为零。

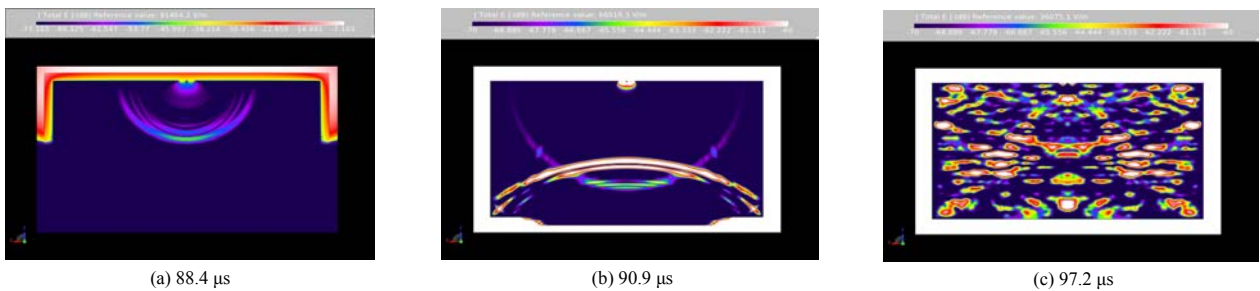


Fig.10 Internal electric field intensity distribution of XOZ cross-section
图 10 箱变内部 XOZ 截面电场强度分布

3.3 电磁屏蔽效能及毁伤分析

电磁屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)是指未加屏蔽时的场强(E_0, H_0)与加屏蔽后的场强(E_s, H_s)之比^[26]，通常用来衡量屏蔽技术的好坏。屏蔽效能值愈大，屏蔽效果愈好。其多用对数的形式表示：

$$SE = 20 \lg \frac{E_0}{E_s} \tag{3}$$

通过对具有不同形状孔阵的箱变内部观测点的场强峰值进行分析，根据式(3)计算其对应的屏蔽效能，结果如表 2 所示。对于外壁具有孔阵的箱变，圆形孔阵屏蔽效能最佳，长方形孔阵屏蔽效能最差。

表 2 不同开孔模式箱变内部各观测点屏蔽效能

| Table2 Shielding effectiveness of each observation point in different substation cabinets with openings | | | |
|---|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| distance from aperture/cm | SE of rectangle aperture/dB | SE of square aperture/dB | SE of circle aperture/dB |
| 5 | 113 | 113 | 126 |
| 50 | 111 | 133 | 130 |
| 100 | 116 | 129 | 133 |

表 3 为箱变与 LEMP 发生耦合时，其内部探测点处电磁功率密度峰值。随着与开孔处间隔的增加，箱变内部电磁能量逐渐减弱。对比箱变内部探测点处的电磁功率密度峰值，可知从长方形、正方形和圆形孔阵耦合进入箱变内部的电磁能量逐渐减小，与表 1 所述屏蔽效能相吻合。

表 3 箱变腔体内部观测点电磁功率密度峰值

| distance from aperture/cm | SE of rectangle aperture/(W·m ⁻²) | SE of square aperture/(W·m ⁻²) | SE of circle aperture/(W·m ⁻²) |
|---------------------------|---|--|--|
| 5 | 87.5 | 83.7 | 23.6 |
| 50 | 101.9 | 11.3 | 15.6 |
| 100 | 63.2 | 17.1 | 11.7 |

目前尚缺乏单次强电磁脉冲对电子设备造成损伤的专用标准,文献[27]给出的是持续高功率电子脉冲对电子设备的电磁损伤阈值,见表 4。将表 3 数据与表 4 中电磁危害阈值进行比对可知,箱变腔体耦合电磁功率密度达到“降能”的危害阈值,此时 LEMP 极有可能导致电子设备发生误动作,从而影响变电站的正常运行。

表 4 高功率电子脉冲对电子设备电磁损伤阈值

Table4 High power electromagnetic hazard threshold

| damage degree | threshold/(W·m ⁻²) | description |
|---------------|----------------------------------|---|
| interference | 10 ⁻³ -10 | Equipment cannot work temporarily. After the interference source disappears, the system will return to normal. |
| degrading | 10-10 ⁴ | Resulting in system locked or protected status, must be restarted or repaired. |
| damage | 10 ⁴ -10 ⁶ | Causing moderate damage to electronic systems and may have permanent effects. |
| destruction | 10 ⁶ -10 ⁹ | Causing fatal and permanent damage to the electronic system. Need to fully replace the entire system, equipment and hardware. |

4 结论

利用雷电回击过程近场 LEMP 作为平面波激励源对箱变腔体进行耦合,研究近场 LEMP 与户外箱变的电磁耦合特性与其对 LEMP 的防护能力,得出以下结论:

1) 近场 LEMP 在箱变内部形成的耦合电磁能量主要集中在开孔位置附近,腔体中心耦合电场强度相对较弱,比较长方形、正方形和圆形 3 种孔阵,由长方形孔阵进入箱变内部的电场能量最大,圆形孔阵对应的电场能量最小;

2) 利用电磁屏蔽效能进一步评估不同开孔模式的屏蔽性能,在等面积的 3 种开孔模式中,圆形孔阵的箱变屏蔽效能最佳,正方形孔阵次之,长方形孔阵箱变屏蔽效能最差;

3) 对照 2005 年 IEC1000-2-13 给出的电磁危害标准,近场 LEMP 通过散热孔阵耦合进入大中型电子、电力等设备的电磁能量,极有可能影响其正常运行,但不会对内部电子设备造成不可逆转的损伤。

随着专用集成电路技术和工业控制的智能化发展,低功耗集成电路电磁敏感度不断提升,实际危害阈值相对于 2005 年标准中的数值大幅降低。因此,户外配电设备中高电磁敏感微电子元件很有可能受 LEMP 的严重影响,LEMP 对电子电气设备的危害仍不容小觑。LEMP 与具有散热孔阵的箱变的电磁耦合亟需通过雷电发生器实验模拟、人工引雷外场实验等方法进行验证。此外,单次高功率电磁脉冲对电子设备毁伤标准也有待进一步研究制定。

参考文献:

- [1] 陈修桥,胡以华,张建华,等. 计算机机箱的电磁脉冲耦合模拟仿真[J]. 系统仿真学报, 2004,16(12):2786-2788. (CHEN Xiuqiao,HU Yihua,ZHANG Jianhua,et al. Electromagnetic pulse coupling simulation of computer chassis[J]. Journal of System Simulation, 2004,16(12):2786-2788.)
- [2] 赵建鹏,侯德亭,胡涛,等. PCB 电路电磁脉冲效应混合仿真方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(2):263-267. (ZHAO Jianpeng,HOU Deting,HU Tao,et al. Hybrid simulation for electromagnetic pulse effects on PCB circuits[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(2):263-267.)
- [3] ARANEO R,LOVAT G. Fast MoM analysis of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures,metal plates,and conducting objects[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009,51(2):274-283.
- [4] ANSARI M S,RATHAVINDRAN S V G,BHATIA M S,et al. Electromagnetic coupling through apertures and shielding effectiveness of a metallic enclosure housing electro-optic pockels cell in a high power laser system[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013,42(2):191-199.
- [5] 金滇黔,何刚. 500 kV 变电站二次系统的防雷措施[J]. 广西电力, 2007(1):5-8. (JIN Dianqian,HE Gang. Lightning protection measures for secondary system of 500 kV substation[J]. Guangxi Electric Power, 2007(1):5-8.)
- [6] 周彩玲,周扬天. 综合自动化变电站防雷技术分析[J]. 气象研究与应用, 2011,32(1):76-78. (ZHOU Cailing,ZHOU Yangtian. Analysis of lightning protection technology for integrated automation substation[J]. Meteorological Research and Application, 2011,32(1):76-78.)

- [7] 陈洋. 变电站二次系统防雷电涌措施探讨[J]. 电气技术与经济, 2018(6):3-5. (CHEN Yang. Discussion on lightning protection surge measures for secondary system of substation[J]. Electric Technology and Economy, 2018(6):3-5.)
- [8] 王道洪, 郗秀书, 郭昌明. 雷电与人工引雷[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000. (WANG Daohong, QIE Xiushu, GUO Chanming. Lightning and artificial lightning[M]. Shanghai, China: Shanghai Jiaotong University Press, 2000.)
- [9] 黄志成, 罗淑英. 电子信息设备的雷害保护探讨[J]. 中国科技信息, 2009(20):123-125. (HUANG Zhicheng, LUO Shuying. Discussion on thunder protection of electronic information equipment[J]. Science China Information, 2009(20):123-125.)
- [10] KHALID A, NOR N M, AMANINA S. Study on the usage of structural building as main lightning protection[C]// Power Engineering and Optimization Conference. Malaysia: IEEE, 2011:432-435.
- [11] 杨剑锋, 牛育忠, 吕安璞, 等. 配电变压器低压侧负载雷电浪涌防护研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(1):110-114. (YANG Jianfeng, NIU Yuzhong, LYU Anpu, et al. Research on lightning surge protection of distribution transformer low-voltage side[J]. Electric Porcelain Arrester, 2018(1):110-114.)
- [12] 鲍永波, 田杨萌, 王彩霞, 等. 雷电电磁脉冲对便携计算机终端的损伤分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12):83-87. (BAO Yongbo, TIAN Yangmeng, WANG Caixia, et al. Damage analysis of lightning electromagnetic pulse on portable computer terminal[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(12):83-87.)
- [13] 鲍永波, 田杨萌, 王彩霞, 等. 核电磁脉冲与开孔金属腔体耦合特性研究[J]. 微波学报, 2017, 33(6):75-80. (BAO Yongbo, TIAN Yangmeng, WANG Caixia, et al. Study on the coupling characteristics of nuclear electromagnetic pulse and open-cell metal cavity[J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(6):75-80.)
- [14] 陈海林, 陈彬, 段艳涛, 等. 地下工程中金属门非核电磁脉冲屏蔽效能研究[J]. 电波科学学报, 2007(2):336-341. (CHEN Hailin, CHEN Bin, DUAN Yantao, et al. Shielding effectiveness of metal door of underground engineering to non-nuclear EMP[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007(2):336-341.)
- [15] 沈卫东, 谭坚文, 伍虹霖, 等. 电磁脉冲对方舱门缝耦合效应的数值分析[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(11):1346-1349. (SHEN Weidong, TAN Jianwen, WU Honglin, et al. Numerical analysis on electromagnetic pulse coupling to the door aperture of square cabin[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(11):1346-1349.)
- [16] 卢新科, 沈华春, 胡超. 电磁屏蔽门屏蔽效能分析及仿真[J]. 电子质量, 2008(11):76-78. (LU Xinke, SHEN Huachun, HU Chao. Analysis and simulation of the shielding effectiveness of the electromagnetic shielding door[J]. Electronics Quality, 2008(11):76-78.)
- [17] 曾嵘, 周旋, 王泽众, 等. 国际防雷研究进展及前沿述评[J]. 高压电技术, 2015, 41(1):1-13. (ZENG Rong, ZHOU Xuan, WANG Zezhong, et al. Progress in international lightning protection research and frontier review[J]. High Voltage Power Technology, 2015, 41(1):1-13.)
- [18] YEE K S. Numerical solution of initial & boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1966, 14(3):302-307.
- [19] 陈亚洲, 肖雪荣. 地表近场 LEMP 与回击电流的近似性[J]. 高压电技术, 2007(33):23-26. (CHEN Yazhou, XIAO Xuerong. Approximation of LEMP and return current in surface near field[J]. High Voltage Power Technology, 2007(33):23-26.)
- [20] BRUCE C E R, GOLDE R H. The lightning discharge[J]. Philosophical Magazine, 1989, 88(6):487-505.
- [21] 王彩霞, 杨虹, 田杨萌, 等. 一次人工触发闪电中的脉冲特征分析[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(1):81-87. (WANG Caixia, YANG Hong, TIAN Yangmeng, et al. Analysis of pulse characteristics in a manually triggered lightning[J]. Journal of Beijing University of Information Science and Technology(Natural Science), 2012, 27(1):81-87.)
- [22] 安小鹤. 基于 FDTD 的电磁脉冲不规则孔缝耦合特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2014. (AN Xiaohu. Research on the coupling characteristics of irregular apertures of electromagnetic pulse based on FDTD[D]. Shenyang, China: Shenyang Aerospace University, 2014.)
- [23] 张茂磊. 电磁脉冲对屏蔽机箱孔缝耦合及毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009:30-34. (ZHANG Maolei. Study on the effect of electromagnetic pulse on the coupling and damage of shielded chassis[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2009:30-34.)
- [24] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011. (GE Debiao, YAN Yubo. Finite-Difference Time-Domain method for electromagnetic waves[M]. Xi'an, China: Xi'an University Press, 2011.)
- [25] PAUL C R. Introduction to electromagnetic compatibility[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [26] YOUWEN Z, GUANGBIN L. Research on electromagnetic shielding of cavity with complex aperture structure[C]// 12th IEEE International Conference on Communication Technology. Nanjing, China: IEEE, 2010:440-442.
- [27] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-2-13 Electromagnetic compatibility(EMC)[S]. 2005.