

屏蔽多芯线缆在HEMP环境下耦合特性的仿真与实验

雷涛¹, 刘磊², 黄远宽¹, 欧阳进¹, 莫蔚¹, 冯瑞发², 祁沛晗²

(1. 广西电网有限责任公司柳州供电局, 广西 柳州 545001; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 通过仿真和实验研究了屏蔽多芯线缆在高空电磁脉冲(high-altitude electromagnetic pulse, HEMP)辐照环境下的耦合特性。首先仿真研究了屏蔽多芯线缆在不同条件下的耦合特性, 给出了线缆接线方式、线缆参数对耦合特性的影响。然后搭建了水平极化辐射波电磁脉冲模拟器, 进行了辐照测试。结果表明, 屏蔽层开路会导致芯线耦合到与屏蔽层相同的高电压, 而屏蔽层接地会显著降低芯线上的耦合电压。此外, 线缆高度、长度的增加都会导致耦合电流水平的增大。测试结果验证了仿真模型的有效性和仿真结果的准确性。

关键词: 高空电磁脉冲(HEMP); 线缆耦合; 屏蔽层; 多芯线缆; 接地

Simulation and Experiment of Coupling Characteristics of Shielded Multi-Core Cable in HEMP Environment

LEI Tao¹, LIU Lei², HUANG Yuankuan¹, OUYANG Jin¹, MO Wei¹, FENG Ruifa², QI Ruihan²

(1. Liuzhou Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545001, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The coupling characteristics of shielded multi-core cables in high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) irradiation environments are investigated through simulation and experiments. Firstly, the coupling characteristics of shielded multi-core cables under different conditions are studied via simulation, revealing the effects of cable wiring methods and parameters on coupling characteristics. A horizontally polarized radiating wave electromagnetic pulse simulator is then constructed for irradiation testing. The results show that an open-circuit shielding layer leads to high voltages coupled onto the core wires, matching the shield voltage, while the grounding shielding layer significantly reduces the coupled voltage on the core wires. Additionally, increases in cable height and length result in higher levels of coupled current. The test results verify the validity of the simulation model and the accuracy of simulation results.

Key words: high-altitude electromagnetic pulse (HEMP); cable coupling; shielding layer; multi-core cables; grounding

0 引言

高空电磁脉冲(high-altitude electromagnetic pulse, HEMP)由爆炸高度30 km以上的核爆炸或电磁脉冲弹产生, 其覆盖范围可广达数千千米, 攻击强度可达几十kV/m, 是所有电磁脉冲中威胁最为

严重的^[1-4]。若未采取预先防御措施, 一旦遭受HEMP攻击, 大量电力电子系统将出现功能紊乱与器件内部损伤, 进而导致电力系统大范围性能降级、失效, 广域分布的关键基础设施陷入瘫痪。

屏蔽多芯线缆广泛应用于电力系统的各类变电站, 用于供电与信号传输。当受到HEMP影响时线缆可能耦合高电压与大电流, 从而引发信号采集失败, 甚至造成绝缘击穿与设备损坏。因此, 研究屏蔽多芯线缆在HEMP环境下的耦合水平具有重要意义。

许多研究致力于解决电磁场与线缆的耦合问

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U23B20132); 广西电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20210266)。

Foundation item: Supported by the Joint Found of National Natural Science Foundation of China (U23B20132); the Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Co., Ltd. (GXKJXM20210266).

题。基于传输线理论,研究人员建立了传输线模型以分析多芯传输线相关问题^[5-9]。随着计算机技术的发展,时域全波算法被应用于线缆耦合分析^[10-11]。此外,众多研究还广泛探讨了各类多芯线缆^[12-17]与屏蔽线缆^[18-22]的耦合特性^[23-27]。然而,现有研究仅聚焦于理想的线缆接线形式,尚未考虑实际接线情况,且不同接线形式下的耦合效应也缺乏相关报道。

本文研究了屏蔽多芯线缆在HEMP下的耦合特性。通过仿真分析总结了不同条件下的耦合特性,包括线缆接线方式和线缆参数。然后,搭建了水平极化辐射波模拟器,并将线缆置于HEMP实验环境中。最后,进行了现场辐照测试^[15],验证了仿真模型的有效性和仿真结果的准确性。

1 线缆耦合特性仿真

1.1 仿真模型搭建和仿真参数设置

本文采用CST线缆工作室对典型屏蔽多芯线缆进行建模仿真。CST线缆工作室的核心方法是基于经典的传输线理论,采用有限积分技术(finite integration technique, FIT)和传输线矩阵(transmission line matrix, TLM)法进行计算。因此,线缆的几何特性和材料特性被转化为等效电路,可以在电路模拟器中进行时域和频域的模拟。

本文针对型号为KVVP2-22-1-4×4的屏蔽多芯线缆的耦合特性开展仿真研究。该线缆的横截面如图1所示,其芯线采用铜材料,导电率为 5.8×10^7 S/m;4根带有PVC绝缘层的芯线被半径4.7 mm的铜带屏蔽层包裹,外部的钢带铠装层则为线缆提供机械支撑。

线缆平行于地面放置,同时受到E1 HEMP辐

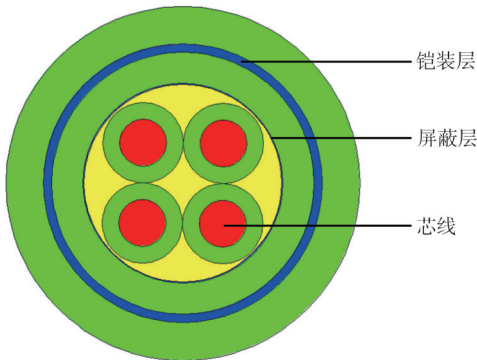


图1 KVVP2-22-1-4×4型线缆的横截面

Fig. 1 Cross section of KVVP2-22-1-4×4 cable

照,其双指数波形可表示为:

$$E = kE_0(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1)$$

式中: E 为电场, kV/m; k 为波形修正系数, $k = 1.3$; E_0 为电场幅值系数, $E_0 = 50$ kV/m; a 为慢衰减常数, $a = 4 \times 10^7$ s⁻¹; b 为快衰减常数, $b = 6 \times 10^8$ s⁻¹。E1 HEMP波形如图2所示,波形峰值 $U_{\max} = 50$ kV/m,上升时间(10%~90%) $t_r = 2.5 \pm 0.5$ ns,半宽 $t_{\text{FWHM}} = 23 \pm 5$ ns^[15]。

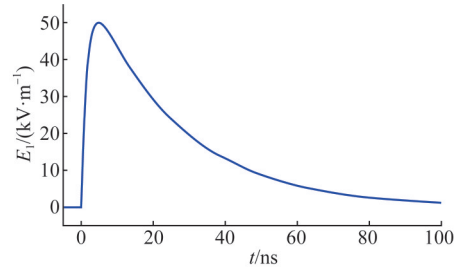


图2 E1 HEMP标准波形

Fig. 2 E1 HEMP standard waveform

本文始终保持入射角 $\psi = 90^\circ$,入射电磁波始终为水平极化以确保电场方向与线缆平行。对于地面参数,设定地面相对介电常数 $\epsilon_r = 10$,地面电导率 $\sigma = 0.01$ S/m。

1.2 线缆端口接线对耦合特性的影响

为研究线缆耦合的普遍规律,确保铠装层始终开路,芯线设置为开路状态以模拟变电站的实际情况。线缆端口接线形式分为3种:屏蔽层开路、短路接地、两端匹配。具体来说,屏蔽层开路的接线方式通常用于建筑物内的供电或信号传输。屏蔽层接地的接线方式通常用于室外传输数据或信号以保证良好的传输性能。而屏蔽层匹配是指屏蔽层通过匹配电阻接地,匹配电阻的阻值设置为与屏蔽层的波阻抗相等。屏蔽层的波阻抗计算公式为:

$$Z = 60 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \ln \frac{2h}{r} \quad (2)$$

式中: r 为屏蔽层半径, $r = 4.7 \times 10^{-3}$ m; h 为屏蔽层高度; ϵ_r 为相对介电常数, $\epsilon_r = 1$; μ_r 为相对磁导率, $\mu_r = 1$ 。

图3为屏蔽层开路的仿真设置示意图,图4为线缆长度 $L = 8$ m、线缆高度 $h = 1$ m时屏蔽层的开路电压波形和芯线电压波形。

从图4可见,开路电压的峰值高达-120 kV左右,对应波形的第二个峰值。该波形具有稳定的振

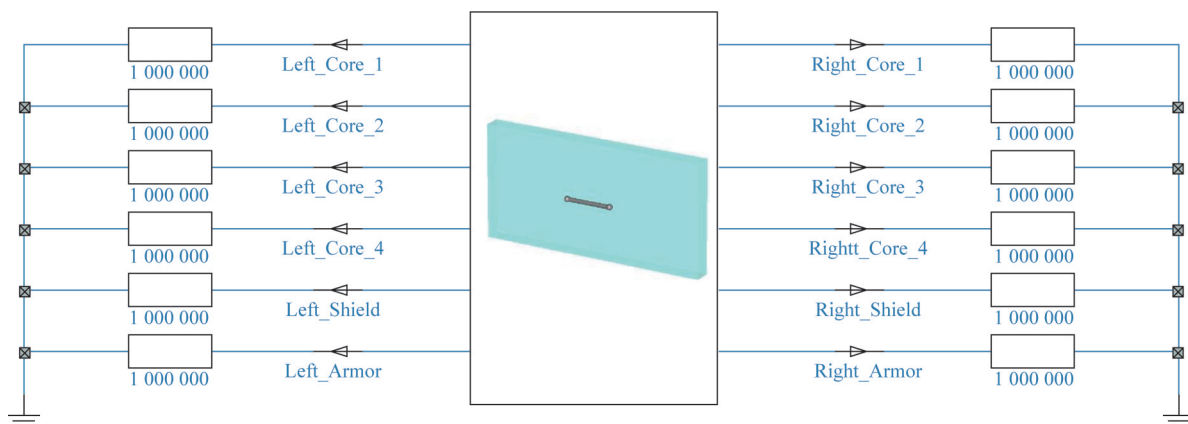


图3 屏蔽层开路的仿真设置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the simulation settings for the open circuit shielding layer

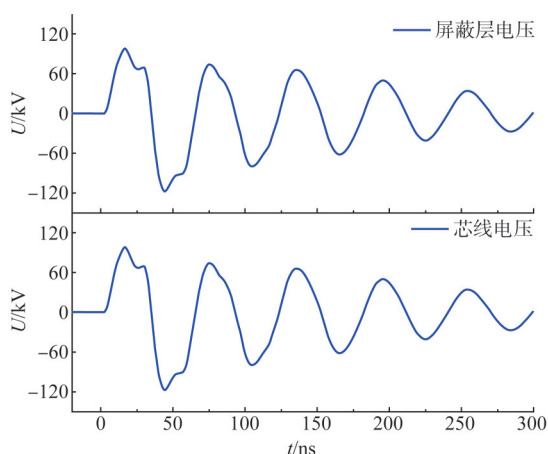


图4 屏蔽层开路时的电压和芯线电压

Fig. 4 Shielding layer open-circuit voltages and core wire voltages

荡特性, 振荡周期约为 60 ns, 与反射波的到达时间完全一致。同时, 芯线耦合到 -120 kV 的高压, 其电压波形与屏蔽层上的波形相同。研究结果表

明, 当屏蔽层处于开路状态时, 屏蔽层与芯线均会耦合高压, 可能导致线缆末端向设备放电, 进而对设备造成损坏。因此, 开路的屏蔽层无法对芯线起到保护作用。

图 5 为屏蔽层短路接地的仿真设置示意图, 图 6 为线缆长度 $L=8$ m、线缆高度 $h=1$ m 时屏蔽层的短路电流波形和芯线电压波形。

从图 6 可以看出, 短路电流的波形在约 13 ns 时达到峰值, 振幅约为 160 A。由于在原始波形的下降沿叠加了反射波引起的耦合电流, 负峰值小于正峰值。与屏蔽层的开路状态不同, 当屏蔽层对地短路时芯线耦合的最大电压约为 400 V。结果表明, 屏蔽层接地有利于耦合电磁能的耗散, 从而降低芯线上的电压, 进而为连接设备提供有效保护。

图 7 为屏蔽层匹配的仿真设置示意图, 线缆高度 $h=1$ m, 根据式(2)计算得匹配电阻阻值约为 350

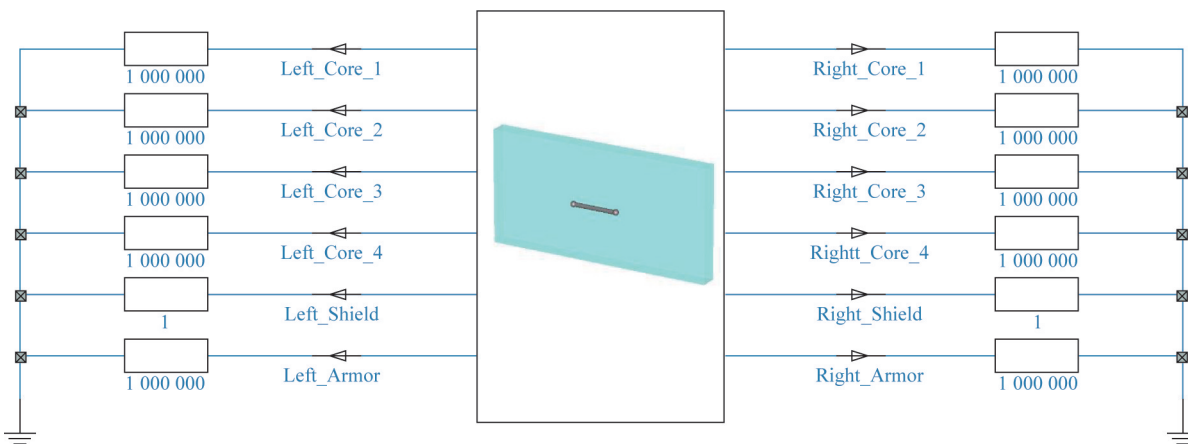


图5 屏蔽层短路接地的仿真设置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the simulation settings for the short-circuit grounding of the shielding layer

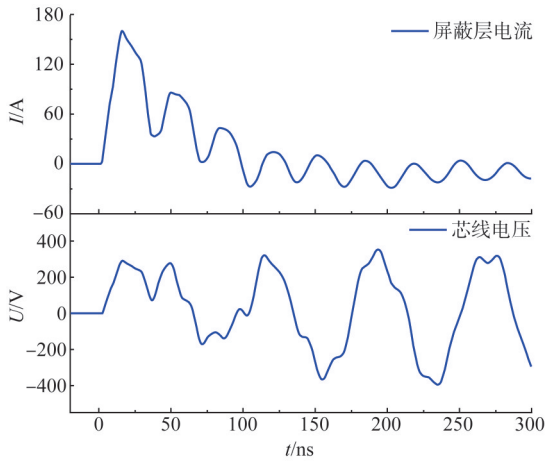


图6 屏蔽层短路接地时的屏蔽层短路电流和芯线电压

Fig. 6 Shielding layer short-circuit currents and core voltages when the shielding layer is short-circuited to ground

Ω 。图8为线缆长度 $L=8$ m、线缆高度 $h=1$ m时屏蔽层的匹配电流波形和芯线电压波形。

从图8可以看出,屏蔽层的电流波形呈现单个正负峰值,峰值约为100 A,与短路情况类似。芯线上的耦合电压波形与屏蔽层中的电流波形相同,幅值约为36 kV。

1.3 线缆特性参数对耦合特性的影响

线缆特性参数包括线缆高度和长度。考虑到在匹配状态下屏蔽层两端没有反射,便于线缆耦合规律,线缆接线方式都采用了屏蔽层匹配的接线方式。图9显示了线缆高度不同时的匹配状态电流。

从图9可以看出,电流随着线缆高度的增加而增大。因为线缆与地面之间形成的环形面积增大,等效为环形天线,所以耦合电流增大。不同线缆长

度下屏蔽层匹配状态电流如图10所示。

从图10可以看出,随着线缆长度的增加,耦合电流的峰值也相应增加。然而,当线缆长度达到临界长度时耦合电流的峰值不再增加。此外,随着线缆长度的延长,波形的波长也在不断增加。

2 实验平台与实验设置

水平极化辐射波电磁脉冲模拟器可模拟强电磁环境并产生E1 HEMP波形。此外,水平极化电磁脉冲模拟器也可模拟地面反射,有效反映电磁波入射的实际情况。实验中使用的双锥-线栅模拟器可产生水平极化电磁波。双锥线栅模拟器如图11所示。

模拟器在(0 m, 0 m, 5 m)处产生IEC定义的E1 HEMP波形^[15],如图12所示。波形的峰值电场强度 $E_{\max}=51.16$ kV/m,上升时间 $t_r=2.28$ ns,半宽 $t_{\text{FWHM}}=20.13$ ns。与IEC波形相比,实验波形的半宽较小。这是因为原始波形的下降沿叠加了地面反射。尽管如此,实验波形仍符合IEC波形标准,更接近实际的HEMP入射波形。

图13显示了 $h=0.5$ m时模拟器范围内水平电场强度的峰值分布。

由图13可以看出,靠近模拟器中心的位置显示出较高的电场强度,从而产生较高的耦合电压和电流。但是,电场的均匀性较差,导致线缆两端和中间部分的电场强度不同。相反,当位置远离模拟器时,情况则相反。因此,线缆两端的坐标分别选在(4 m, 7 m, h)和(-4 m, 7 m, h),以确保高电场和更好的场均匀性。在这种配置下,线缆中段的

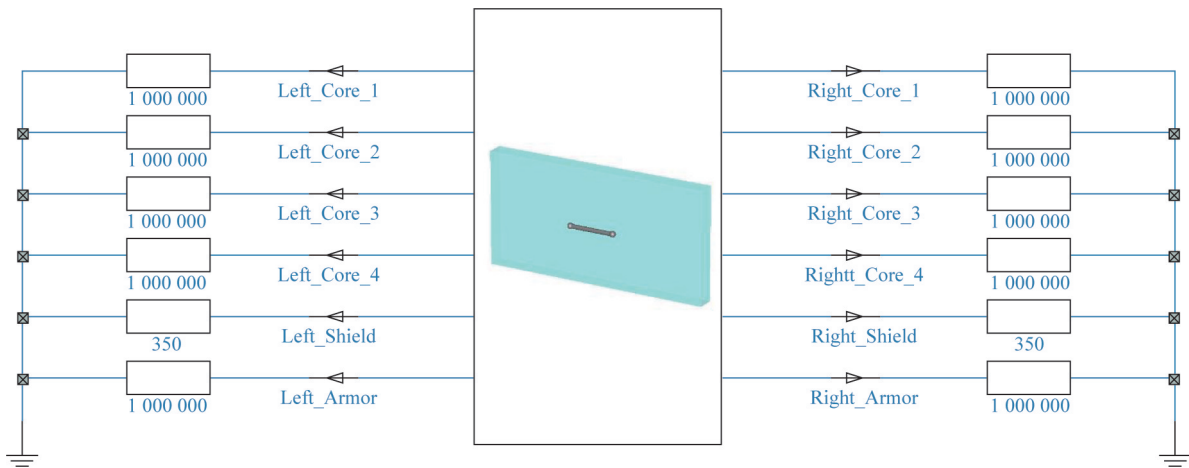


图7 屏蔽层匹配的仿真设置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the simulation setup for shielding layer matching

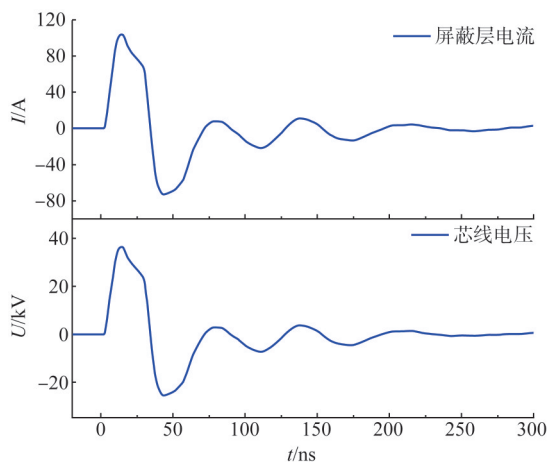


图 8 屏蔽层匹配时的屏蔽层电流和芯线电压

Fig. 8 Shielding layer currents and core voltages when the shielding layer is matched

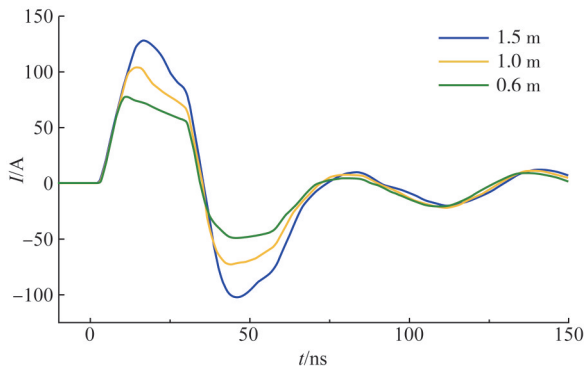


图 9 不同线缆高度时的屏蔽层电流

Fig. 9 Shielding layer currents at different cable heights

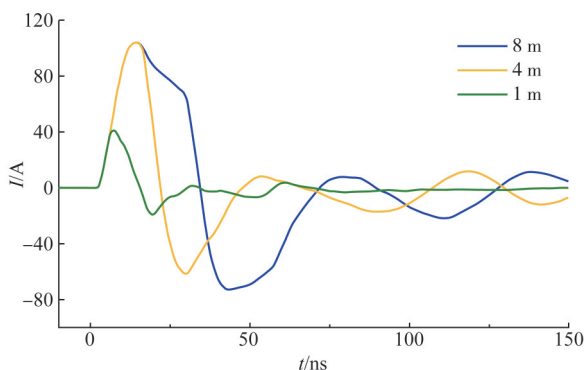


图 10 不同线缆长度时的屏蔽层电流

Fig. 10 Shielding layer currents at different cable lengths

电场强度峰值为 18.44 kV/m，均匀度为 0.76 dB。线缆耦合实验布置如图 14 所示。

3 实验结果分析与讨论

屏蔽层开路时不同线缆高度的电压如图 15 所



图 11 双锥-线栅模拟器

Fig. 11 Double-cone line grid simulator

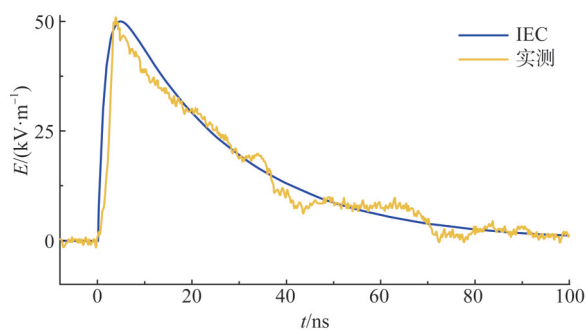
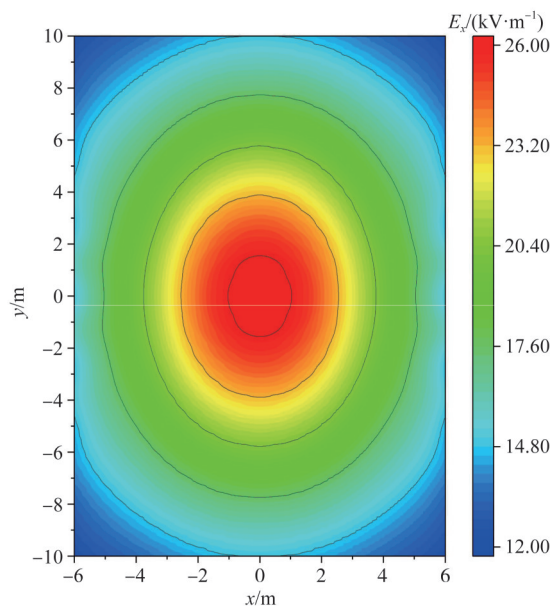


图 12 模拟器在(0 m, 0 m, 5 m)处产生的电场波形

Fig. 12 Waveforms of the electric fields generated by the simulator at (0 m, 0 m, 5 m)

图 13 $h=0.5$ m 水平电场强度的峰值分布Fig. 13 Peak distribution of electric field intensities at 0.5 m level for $h=0.5$ m

示，其中线缆长度为 8 m。

从图 15 可见，当线缆高度为 1.5 m、1 m 和 0.6 m 时开路电压的峰值分别约为 60 kV、45 kV 和

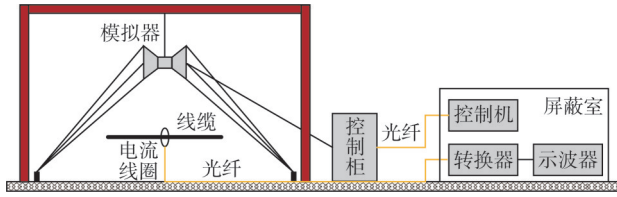


图14 线缆耦合实验布置图

Fig. 14 Layout of cable coupling experiment

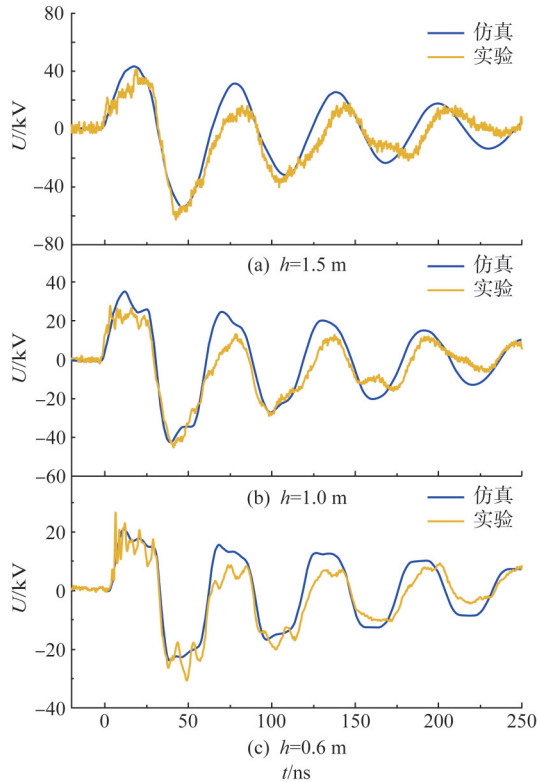


图15 屏蔽层开路时不同线缆高度的屏蔽层电压

Fig. 15 Shielding layer voltages at different cable heights when the shield layer is open-circuited

30 kV。这表明,随着线缆高度降低,开路电压的峰值也相应降低。同时,电压振荡周期约为60 ns,振荡峰值呈逐渐衰减趋势,这与前文的仿真分析结果一致。对比仿真波形与实验波形可知,二者的峰值、振荡衰减趋势及振荡频率均保持一致。不过,实验开路电压波形的振荡峰值衰减速度更快,这可能是由于线缆反射及接地条件的差异导致能量耗散加快所致。

图16—17分别显示了不同线缆高度下屏蔽层对地短路和匹配时的电流。

从图16可见,当线缆高度分别为1.5 m、1 m和0.6 m时,短路电流的峰值依次约为100 A、80 A和60 A。这表明屏蔽层对地短路时电流峰值随线

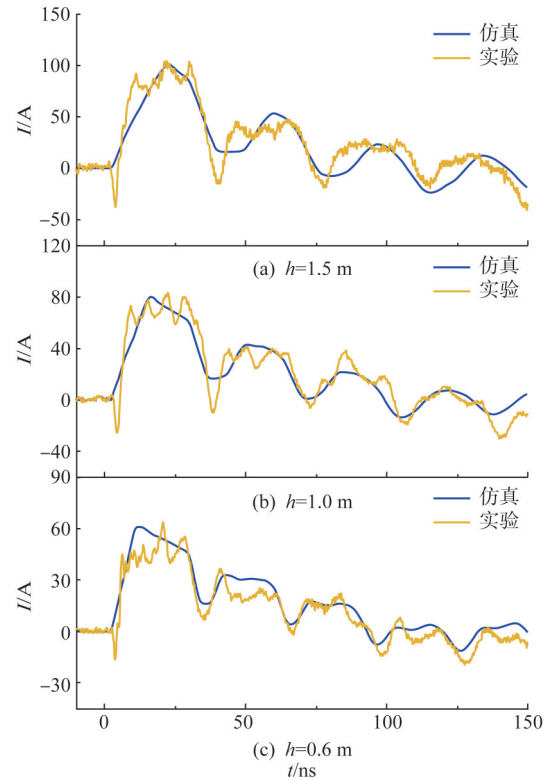


图16 不同高度下屏蔽层短路接地的屏蔽层电流

Fig. 16 Shielding layer currents for short-circuit grounding of shields at different heights

缆高度降低而减小,与数值分析结果一致。图16还显示,电流达到峰值后,波形呈双指数衰减并伴有振荡,振荡周期约为30 ns。波形振荡由终端反射引起,且随着线缆高度增加,反射电流波的振幅和宽度也相应增大。这是因为线缆高度升高会导致其特征阻抗上升,进而加剧终端的阻抗不匹配程度,最终使反射电流波增强。

从图17可见,当屏蔽层匹配时线缆高度为1.5 m、1 m和0.6 m时的电流峰值分别约为50 A、40 A和30 A。与接地短路的情况类似,屏蔽层匹配时,电流峰值随线缆高度降低而下降。值得注意的是,当仿真结果的电流波形经历两个峰值并衰减至较低水平时,实验结果的电流波形仍处于振荡状态。产生振荡的原因在于匹配电阻末端存在一根垂直接地线,该垂直接地部分与模拟器产生的垂直电场分量 E_z 相耦合,由此阻抗不匹配引发的反射导致了波形后沿的振荡。

从图15—17可见,模拟与实验的波形具有显著一致性,这证实了模拟模型的有效性及其数值结果的准确性。模拟与实验结果存在差异的原因在于实

验过程中可能存在接地参数变化、模拟器误差、电场分布不均匀等误差,尤其是测量设备的测量误差。此外,实验中的垂直接地部分会与模拟器产生的垂直电场分量 E_z 相耦合,进而导致波形反射。

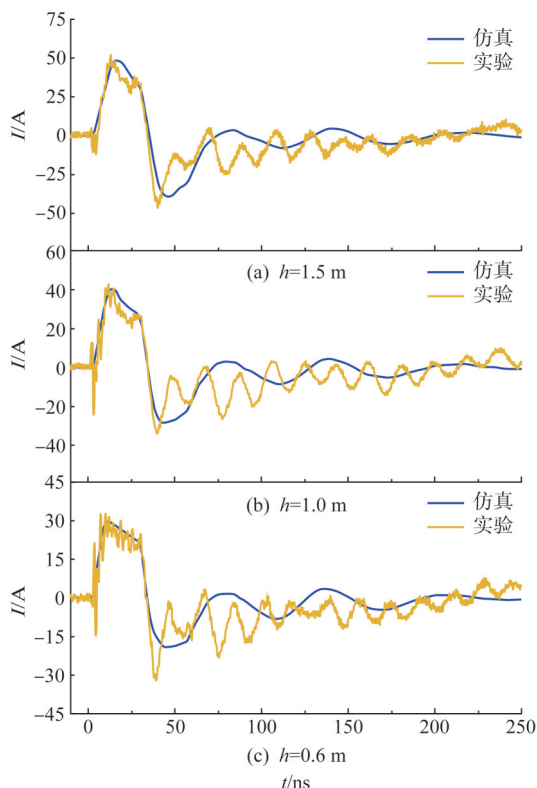


图 17 不同高度下屏蔽层匹配的屏蔽层电流

Fig. 17 Shielding layer currents matched by shields at different heights

4 结论

本文对屏蔽多芯线缆的耦合特性进行了理论和实验研究。通过仿真分析研究了具有代表性的屏蔽多芯线缆在不同情况下的耦合特性。然后搭建了一个水平极化混合电磁脉冲模拟器,并将线缆置于实验 HEMP 环境中。最后进行了一些辐照实验以验证仿真研究得出的一些结论。从仿真和实验结果中可以得出以下结论。

1)不同接线方式的仿真结果表明:当屏蔽层开路时,屏蔽层与芯线均可能耦合到同等高的电压,对连接设备构成潜在损坏风险;当屏蔽层对地短路时,电磁能量通过屏蔽层向地耗散,芯线上的耦合电压大幅降低,此时屏蔽层可提供有效保护;当屏蔽层接匹配阻抗时,虽能有效降低屏蔽层的短路电

流水平,但会抬高屏蔽层与芯线的电压,增加线缆末端所接设备的损伤概率。因此,在实际接线中应确保屏蔽层良好接地,以降低芯线所接设备的损伤概率。

2)仿真分析结果表明当入射电磁波为水平极化且屏蔽层两端匹配时,线缆高度的增加与线缆长度的增加均会导致屏蔽层耦合电流的放大。

3)仿真结果与实验结果的波形呈现出显著的一致性,这有力证实了仿真模型的有效性与数值结果的准确性。两者之间的差异主要源于接地参数的变化、模拟器的固有误差、实验中电场的不均匀分布以及垂直接地段的存在,其中测量设备的测量误差尤为关键。

通过本文的研究揭示了屏蔽多芯线缆在高功率电磁脉冲(HEMP)环境下的耦合特性。此外,还明确了 HEMP 环境下变电站电力设备的潜在威胁等级,为提升设备在 HEMP 环境下的防护能力及变电站 HEMP 防护体系的建设提供了理论依据和参考。

参考文献

- [1] 冯一民. 高空核爆电磁脉冲的特点及其机理[J]. 军事通信技术, 1984(3): 109 - 119.
- [2] MCGIVERN P L. Electromagnetic pulse effects on tactical communications[J]. Signal, 28(8): 29 - 32
- [3] STEIN D L. Electromagnetic pulse-the uncertain certainty[J]. Bulletin of the Atomic Scientists, 1983, 39(3): 52 - 56.
- [4] 厉天威, 刘磊, 贾磊, 等. 电网设备防御强电磁脉冲试验平台建设[J]. 南方电网技术, 2025, 19(1): 12 - 19.
LI Tianwei, LIU Lei, JIA Lei, et al. Construction of the strong electromagnetic pulse defense test platform for power grid equipment[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(1): 12 - 19.
- [5] TAYLOR C, SATTERWHITE R, HARRISON C. The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965, 13(6): 987 - 989.
- [6] AGRAWAL A K, PRICE H J, GURBAXANI S H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1980, 22(2): 119 - 129.
- [7] RACHIDI F. Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993, 35(3): 404 - 407.
- [8] BAUM C E, LIU T K, TESCHE F M. On the analysis of general multiconductor transmission-line networks[J]. Interact Note, 1978, 350(6): 547 - 567.
- [9] TESCHE F M, IANNOZ M V, KARLSSON T. EMC analysis methods and computational model[J]. IEE Review, 1997, 43(4): 174 - 174.
- [10] 毛从光, 孙东阳, 孙蓓云. 架空线缆电磁脉冲响应的统计特

- 性[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(7): 156 – 161.
- MAO Congguang, SUN Ddongyang, SUN Beiyun. Statistical characteristics of electromagnetic pulse response of overhead cables [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(7): 156 – 161.
- [11] 谢秦川, 刘顺坤, 陈雨生. 细线结构时域电场积分方程的有限差分求解[J]. 电波科学学报, 2000(1): 45 – 48.
- XIE Qinchuan, LIU Shunkun, CHEN Yunsheng. Finite difference solution of time-domain electric field integral equation for thin-wire structures[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000(1): 45 – 48.
- [12] 王川川, 朱长青, 周星, 等. 有限长度埋地多导体电缆对外界电磁场响应特性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2836 – 2842.
- WANG Chuanchuan, ZHU Changqing, ZHOU Xing, et al. Analysis of external electromagnetic field response characteristics of finite-length buried multi-conductor cables [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2836 – 2842.
- [13] 杜子韦华, 谢彦召. 架空及埋地多导体线缆对HEMP辐照的瞬态响应[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(7): 21 – 29.
- DU Ziweihua, XIE Yanzhao. Transient response of overhead and buried multi-conductor cables to HEMP irradiation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(7): 21 – 29.
- [14] 周星, 王川川, 朱长青, 等. 外场辐照下埋地电缆瞬态响应规律研究[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 7 – 12.
- ZHOU Xing, WANG Chuanchuan, ZHU Changqing, et al. Study on transient response of buried cables under external field irradiation [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 7 – 12.
- [15] IEC Technical Committee 77. Electromagnetic compatibility (EMC) -Part 4 – 25: Testing and measurement techniques-HEMP immunity test methods for equipment and systems: IEC 61000 – 4–25[S]. London: International Electrotechnical Commission, 2019.
- [16] IEC Technical Committee 77. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance: IEC 61000 – 2–9 [S]. London: International Electrotechnical Commission, 1996.
- [17] 陆佳政, 李波, 彭继文, 等. 电力系统二次设备高功率电磁脉冲防护技术研究[J]. 南方电网技术, 2020, 14(3): 1 – 8.
- LU Jiazhang, LI Bo, PENG Jiwen, et al. Research on high-power electromagnetic pulse protection technology for secondary equipment in power systems [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(3): 1 – 8.
- [18] 周凯, 李志钊, 胡军, 等. 变电站二次电缆电磁脉冲耦合规律试验研究[J]. 南方电网技术, 2021, 15(4): 55 – 62.
- ZHOU Kai, LI Zhizhao, HU Jun, et al. Experimental study on electromagnetic pulse coupling characteristics of secondary cables in substations [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(4): 55 – 62.
- [19] 毛从光, 孙蓓云, 谢彦召. 多导体传输线电磁脉冲响应统计特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(4): 43001.1 – 43001.9.
- MAO Congguang, SUN Beiyun, XIE Yanzhao. Statistical characteristics analysis of multi-conductor transmission line responses to electromagnetic pulses [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(4): 43001 – 43001.9.
- [20] 党智伟, 李士锋, 王战亮, 等. Ka波段同轴多注相对论速调管的电子束引入[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(4): 82 – 87.
- DANG Zhiwei, LI Shifeng, WANG Zhanliang, et al. Electron beam introduction of Ka-band coaxial multi-beam relativistic klystron amplifier [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(4): 82 – 87.
- [21] 孙蓓云, 陈向跃, 毛从光. 电磁脉冲对线缆耦合效应的实验方法研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1521 – 1528.
- SUN Beiyun, CHEN Xiangyue, MAO Congguang. Experimental methodology for studying electromagnetic pulse coupling effects on cables [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1521 – 1528.
- [22] 赵敏, 周璧华, 陈彬. 屏蔽电缆对高空电磁脉冲耦合电流的抑制效能[J]. 电波科学学报, 2021, 36(1): 89 – 96.
- ZHAO Min, ZHOU Bihua, CHEN Bin. Suppression efficiency of shielded cables on high-altitude electromagnetic pulse coupled currents [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(1): 89 – 96.
- [23] 李爽, 王庆国, 李永明. 基于时域有限差分法的屏蔽电缆电磁耦合仿真[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 3055 – 3064.
- LI Shuang, WANG Qinguo, LI Yongming. Electromagnetic coupling simulation of shielded cables based on finite-difference time-domain method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 3055 – 3064.
- [24] 肖凯, 李炎新, 李亚维. 电力电缆屏蔽层结构对HEMP耦合电压的影响[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4309 – 4316.
- XIAO Kai, LI Yanxin, LI Yawei. Influence of power cable shielding structure on HEMP-induced coupling voltage [J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4309 – 4316.
- [25] 黄文韬, 陆国俊, 李志钊. 智能变电站通信线缆的电磁脉冲防护设计[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 38 – 44.
- HUANG Wentao, LU Guojun, LI Zhizhao. Electromagnetic pulse protection design for communication cables in smart substations [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2): 38 – 44.
- [26] 张建功, 何金良, 曾嵘. 高空核电磁脉冲作用下电缆终端电场分布特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2503 – 2511.
- ZHANG Jiangong, HE Jinliang, ZENG Rong. Electric field distribution characteristics of cable terminals under high-altitude nuclear electromagnetic pulse [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2503 – 2511.
- [27] PAUL D, SMITH J, HOFSTRA S. Electromagnetic coupling to multiconductor cables in HEMP environments [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(3): 789 – 798.

收稿日期: 2024-04-25; 网络首发日期: 2025-03-24

作者简介:

雷涛(1972), 男, 工程师, 学士, 从事电力系统及自动化分析工作;

刘磊(1982), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 从事高电压外绝缘技术与电磁环境、复合横担、架空导线研究工作;

祁沛晗(1991), 女, 通信作者, 高级工程师, 博士, 研究方向为高电压与绝缘、电磁暂态分析, jiuxuhh@163.com。