

变电站典型控制线缆高空电磁脉冲耦合特性仿真方法

夏小飞¹, 刘磊², 俸波¹, 苏毅¹, 祁沛晗², 芦宇锋¹, 冯瑞发², 梁学诚¹

(1. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室(广西电网有限责任公司电力科学研究院), 南宁 530023; 2. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院), 广州 510663)

摘要: 强电磁脉冲(high-altitude electromagnetic pulse, HEMP)的E1阶段场强高、上升时间快、持续时间短, 通过变电站内部控制线缆耦合的能量对末端智能化设备造成损伤, 因此对变电站内部控制线缆的HEMP耦合响应特性分析显得尤为重要。通过对典型变电站实际线缆工况开展调研, 仿真研究了HEMP环境下站内开关量和模拟量传输线缆的末端耦合响应水平。当屏蔽层不接地时, 线缆末端会感应到大约 70 kV 的高电压, 芯线接地时短路电流为 4 A 左右, 屏蔽层的接地电流幅值大约为 60 A。最后搭建了双锥-线栅天线作为水平极化 HEMP 模拟器对控制线缆进行了现场试验与仿真结果进行对比, 验证了仿真方法的有效性。

关键词: HEMP; 耦合响应; 控制线缆; 双锥-线栅天线; 水平极化辐射波模拟器

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

XIA Xiaofei¹, LIU Lei², FENG Bo¹, SU Yi¹, QI Ruihan², LU Yufeng¹, FENG Ruifa²,
LIANG Xuecheng¹

(1. Guangxi key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The E1 phase of the high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) has a high field strength, a fast rise time, and a short duration. It will damage the end of the intelligent equipment through the substation internal control cable coupling. Therefore, it is of particular importance to analyze the HEMP coupling response characteristics of the substation internal control cable. Through conducting research on the actual cable conditions of typical substations, the end coupling response level of switching and analog transmission cables in a substation under HEMP environment are simulated and investigated. The study reveals that when the shield is not grounded, the end of the cable induces a high voltage of approximately 70 kV. Additionally, when the core wire is grounded, the short-circuit current is approximately 4 A. The amplitude of the shield's grounding current is approximately 60 A. Finally, a biconical-linear-grid antenna is constructed as a horizontally polarised HEMP simulator. The control cable is tested in the field and compared with the simulation results to verify the validity of the simulation method.

Key words: HEMP; cable coupling response; control cable; biconical-linear-grid antenna; horizontally polarized radiation wave simulator

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U23B20132); 广西电网公司科技项目(GXKJXM20210264)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China Joint Foundation Program (U23B20132); the Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Co., Ltd. (GXKJXM20210264).

0 引言

高空电磁脉冲 (high-altitude electromagnetic pulse, HEMP) 的影响范围可达上千公里, 可以在几纳秒的时间里迅速升高到最高 50 kV/m 的电场强度峰值, 从而积累大量的能量^[1-2]。正因为 HEMP 的特性, 导致其容易通过线缆耦合大量的能量, 进而影响末端连接的设备^[3-7]。随着变电站智能化的逐步推进, 高集成度、高精度的智能化设备一旦受损所造成的影响不可估量^[8-10]。因此, 需要对 HEMP 影响下变电站内部控制线缆末端的耦合响应特性进行仿真和试验, 分析结果有利于针对变电站内部线缆和智能化设备提出改进的防护方案。

目前对变电站内线缆耦合的仿真计算研究焦点主要集中在针对线缆简化模型的计算及算法研究^[2, 7, 11-13], 而线缆耦合响应水平受周围电磁环境、线缆型号等影响, 目前研究较少集中在多芯带铠装的屏蔽线缆。试验研究受限于水平极化 EMP 模拟器搭建成本多采用垂直极化模拟器进行试验, 未考虑地面反射的影响; 而少量采用水平极化模拟器的试验研究由于发表时间过久, 模拟器产生的 HEMP 波形不能满足如今的 IEC 标准^[14], 试验数据很难作为定量的参考^[15-21]。因此本文针对变电站典型的四芯带铠装屏蔽控制电缆进行仿真模拟, 并利用满足 IEC 标准^[14]的 HEMP 波形的水平极化辐射波模拟器进行现场试验验证仿真结果。

1 仿真模型

1.1 HEMP 的 E1 阶段波形

HEMP 可以分为 E1、E2 以及 E3 这 3 个阶段, 3 个阶段的频谱图如图 1(a) 所示^[22-29]。其中 E1 阶段的时域波形表达式可以由式(1)给出。

$$E(t) = \begin{cases} kE_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_0 为峰值场强, 取 50 kV/m; α 和 β 分别为脉冲前沿和后沿的参数, 本文取 4×10^7 /s、 6×10^8 /s; k 为修正系数, $k = (e^{-\alpha t_{\max}} - e^{-\beta t_{\max}})^{-1}$, $t_{\max}$ 为 E1 阶段 HEMP 时域波形达到峰值的时刻, $t_{\max} = \log(\beta/\alpha)/(\beta - \alpha)$, 约为 1.3; 时域波形如图 1(b) 所示。E1 阶段脉冲波形前沿大约为 2.5 ns, 半宽大约为 19 ns。

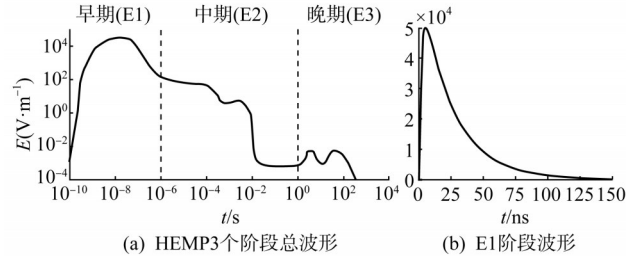


图 1 HEMP 的时域波形

Fig. 1 Time-domain waveform of HEMP

1.2 仿真模型

高空爆炸产生的 HEMP 辐照到线缆上时可以近似视作平面波, 其中 $\vec{k}$ 为波的传播方向, 入射角 ψ 为传播方向与地面的夹角, 方位角 ϕ 为传播方向在地面的投影与线缆所在方向的夹角, 极化角为 α 。

图 2 为平面波辐照下地面上线缆的耦合模型^[12]。

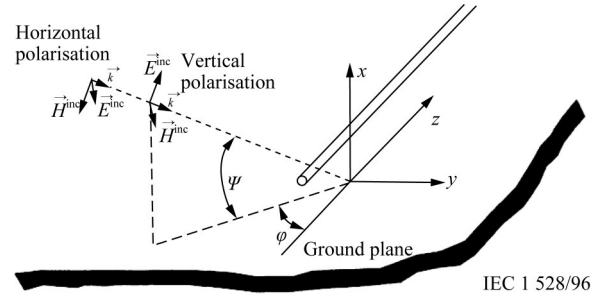


图 2 平面波辐照下单导体传输线模型

Fig. 2 Model of a single-conductor transmission line under plane wave irradiation

为探究 HEMP 辐照时典型控制线缆的耦合响应特性, 构建了如图 3 所示的 HEMP 平面波耦合地面上线缆的仿真模型。线缆平行于 x 轴, 距离地面高度 $h = 0.1$ m, 长度 $L = 10$ m, 线缆两端端点 N1 和 N2 的坐标分别为 $(-5 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0.1 \text{ m})$ 和 $(5 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0.1 \text{ m})$ 。平面波参数 $\{\psi, \phi, \alpha\} = \{90^\circ, 90^\circ, 0^\circ\}$, 即垂直入射的水平极化 HEMP 平面波, 电场方向平行于 x 轴, 入射方向沿 z 轴负方向。

在此研究中, 基于对变电站内部设备和线缆的调研, 四芯屏蔽控制电缆 KVV22-22-4×4 作为其内部用于信号传输和电能输送的主要线缆, 对于变电站的正常运行至关重要, 其横截面和对应的相关参数如图 3 所示, 其中芯线半径 $r = 1.12$ mm, 屏蔽层半径 $R_1 = 4.7$ mm, 铠装层半径 $R_2 = 6.6$ mm, 线缆整体半径 $R_3 = 8.5$ mm。

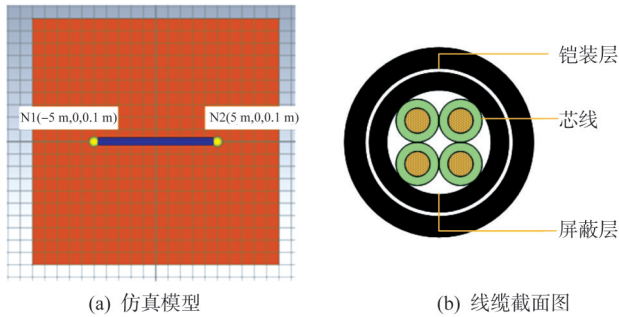


图3 典型控制线缆HEMP耦合仿真模型

Fig. 3 HEMP coupling simulation model of the typical control cable

1.3 仿真算法

本文基于时域电磁仿真软件对线缆耦合进行时域研究分析,为了降低有限模型边界造成的反射对耦合水平的影响,首先将地面侧边界设置为完全匹配层吸收边界条件(perfectly matched layer, PML),地面侧边界设置为电边界($E_t=0$),进而通过对不同边界大小模型下同一点处的电场波形作为对比进行仿真模型的优化。此时模型的边界反射可以通过构建如图4所示的长度为 l 、宽度为 w 、深度为 d 的地面模型来验证,地面相对介电常数 $\epsilon_r = 10$,电导率 $\sigma = 0.01 \text{ S/m}$ 。采用 $\psi = \phi = \alpha = 90^\circ$ 的HEMP平面波作为激励,从距离地面高度2 m处入射,电场波形的测点为原点正上方距离地面1 m处,坐标为(0 m, 0 m, 1 m)。

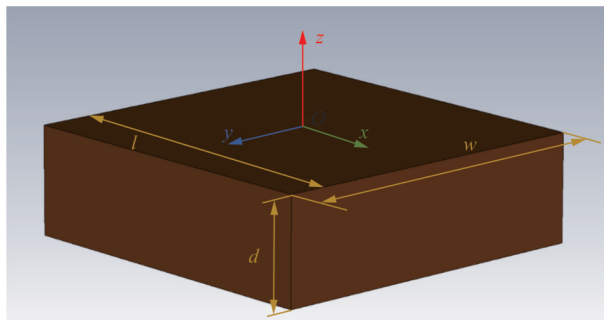


图4 有损地面模型

Fig. 4 The limited ground model

当 $d \geq 2 \text{ m}$, w 和 $l \geq 8 \text{ m}$ 时,边界反射对地面上的电场波形造成的影响可忽略不计,且波在此地面模型上的传播规律近似在真空中传播,可以用真空中电磁波的传播速度估计边界反射到达测点的时间。

在仿真中,分别对地面模型的深度、长度以及宽度对地面上同一点处的电场波形造成的影响进行

了仿真分析,电场波形对比如图5所示。

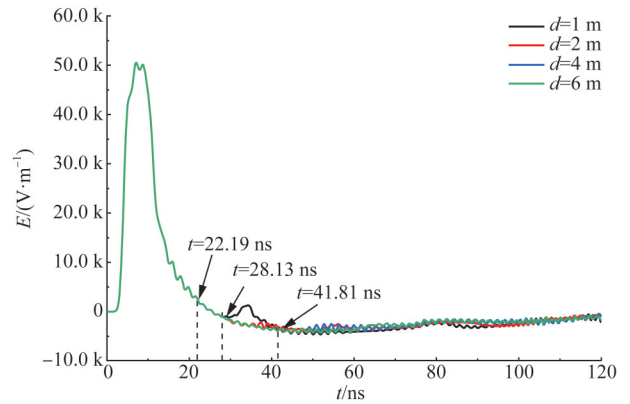
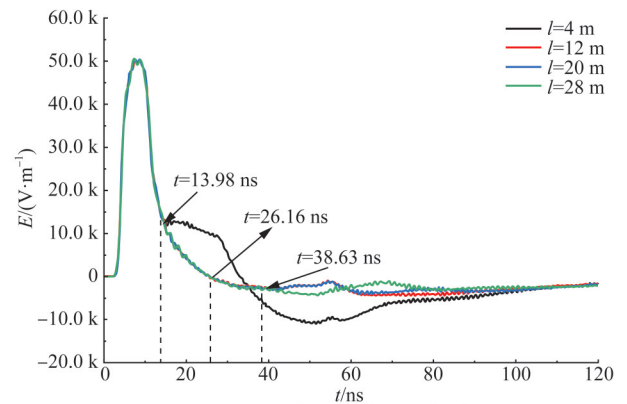
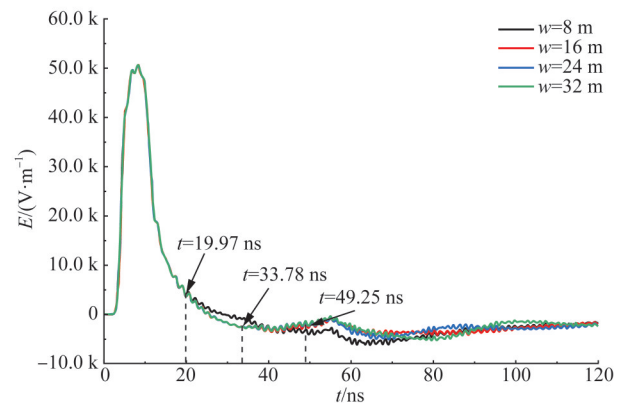
(a) 不同地面深度 d 下电场波形(b) 不同地面长度 l 下电场波形(c) 不同地面宽度 w 下电场波形

图5 改变边界大小时电场波形变化曲线

Fig. 5 Waveforms change of electric field when changing boundary size

2 典型控制线缆的耦合响应水平

变电站中控制线缆会用于站内设备开关量和模拟量的传输,其中典型的开关量有断路器的开断信号,模拟量有电压、电流互感器中采集到的电压电

流模拟信号。

对于这两种线缆,芯线两端均接入输入阻抗为兆欧姆级的信号采集设备,因此连接设备的芯线两端视作等效开路。开关量和模拟量在信号传输线缆中传输水平低,易受电磁干扰,因此屏蔽层接地,而铠装层的作用仅为增强机械强度,两端都置空,作等效开路处理。基于这两种典型场景下的线缆接线形式进行仿真计算,对线缆末端的耦合响应水平进行分析。

2.1 开关量传输线缆

在变电站内,线缆连接了主控室内的监测设备和站内设备,其通常长度达几十到上百米,且会在站内的端子箱中进行转接,因此线缆分为主控室-端子箱以及端子箱-设备两段。从主控室到端子箱的开关量传输线缆的屏蔽层两端接地,为了防止电磁干扰时接地屏蔽层流过的电流损伤设备,连接端子箱和设备的信号线屏蔽层仅在端子箱侧单端接地,接地阻抗设置为 $1\ \Omega$,等效开路的铠装层和芯线的接地阻抗设置为接 $1\ M\Omega$ 。

1) 连接主控室内控制柜到端子箱的开关量传输线缆

连接主控室内控制柜到端子箱的开关量传输线缆在 HEMP 环境下的耦合情况如图 6 所示。

屏蔽层两端接地,从 HEMP 耦合进入线缆的能量通过线缆内部的转移阻抗传递,且绝大部分在屏蔽层处经过接地后被泄放,导致除屏蔽层外的铠装层以及芯线上耦合到的电压、电流水平降低,此时铠装层两端的电压水平仅有 $3\ kV$,芯线的耦合电流水平不足 $0.3\ mA$,而屏蔽层因接地而两端耦合到 $60\ A$ 的电流。可见屏蔽层接地可以对线缆内部信号的传输起到很好的保护作用,此时屏蔽层耦合到的电流均通过接地流入地下。

2) 连接端子箱到设备的开关量传输线缆

连接端子箱到设备的开关量传输线缆屏蔽层仅在端子箱侧单端短路接地,设备侧开路时受屏蔽层单侧接地的影响,接地侧的芯线所能耦合到的能量绝大部分通过屏蔽层流入地下,导致芯线上的耦合电流最大不超过 $0.2\ mA$,而屏蔽层开路侧的四根芯线则表现出与铠装层和屏蔽层同样的高达 $70\ kV$ 的大电压水平,其在设备侧和端子箱侧的耦合电流水平如图 7 所示。

与连接室内控制柜和端子箱的开关量传输线缆

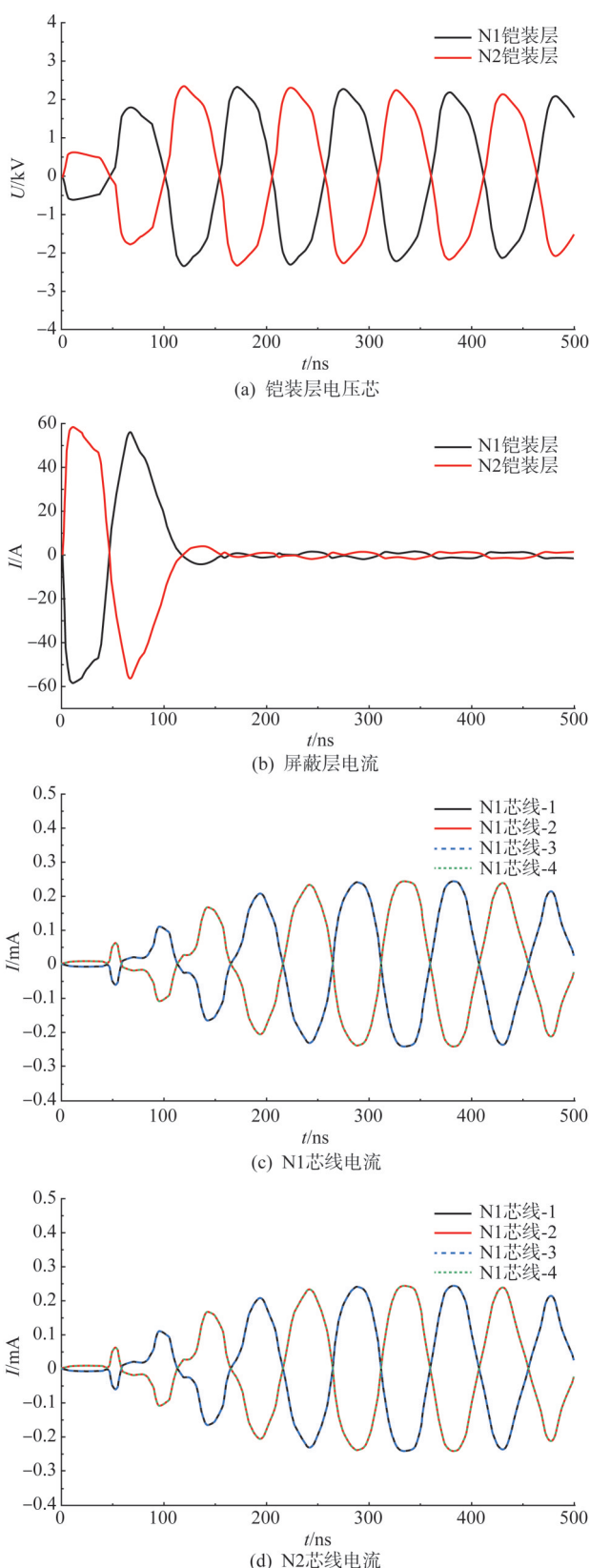


图 6 主控室-端子箱段线缆两端耦合响应水平

Fig. 6 Coupling response levels at both ends of the cable in the main control room-terminal box section

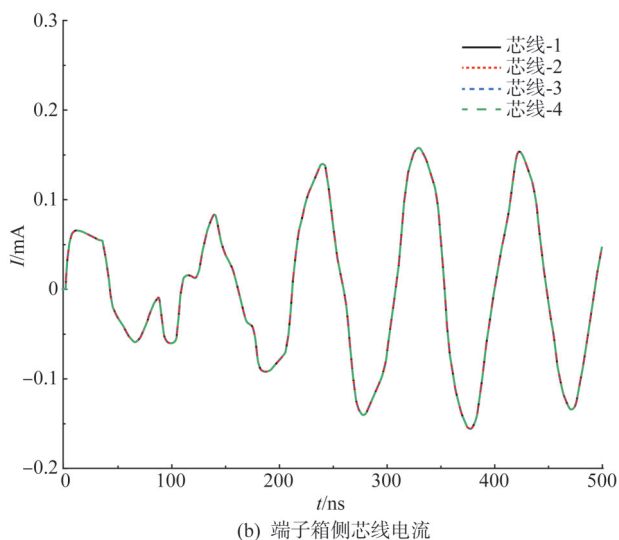
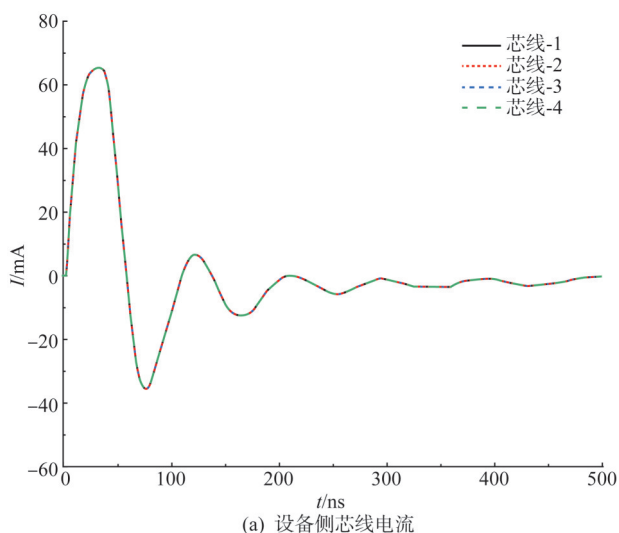


图7 芯线两端耦合水平

Fig. 7 Coupling level at both ends of the core

不同,在设备侧屏蔽层为了保护设备并不接地,此时线缆的芯线和屏蔽层均会在设备侧感应出高达70 kV左右的电压,可能会直接影响设备的正常运行。而端子箱侧的芯线受到接地屏蔽层的保护,此端端口除屏蔽层外所感应到的电流、电压水平都有所降低,如图7—8所示。屏蔽层接地使得铠装层上的电荷大部分都通过耦合进入了地下,该侧芯线和铠装层感应水平有明显的降低,而屏蔽层电流升高至60 A。

2.2 模拟量传输线缆

从主控室到端子箱的模拟量传输线缆的屏蔽层两端接地,模拟量属于连续信号,因此有一根芯线在端子箱侧单点接地作为信号的传输回路,防止信

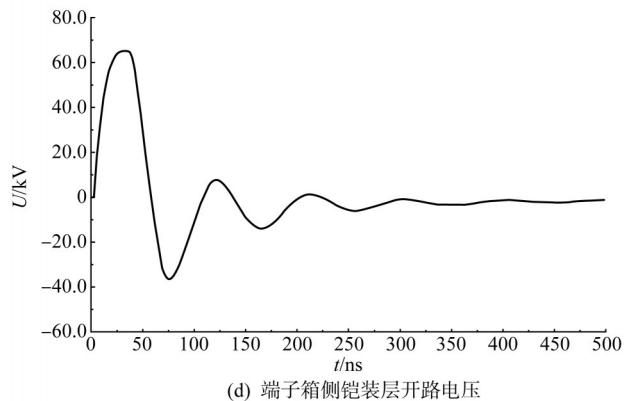
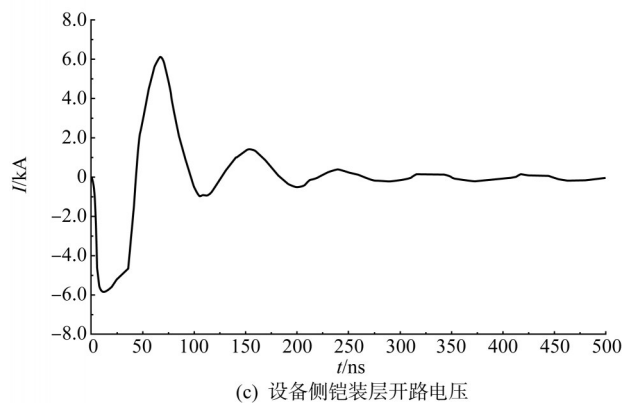
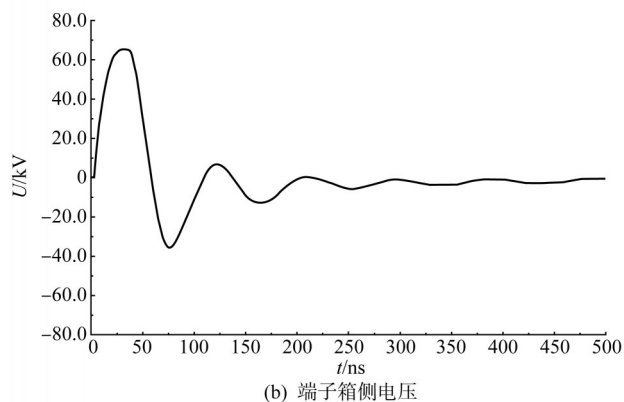
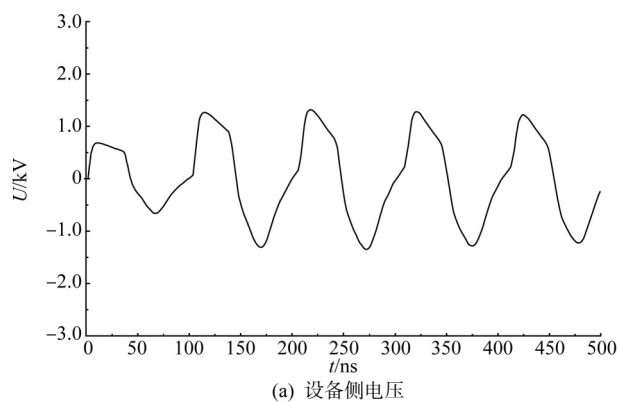


图8 端子箱-设备段线缆两端耦合响应水平

Fig. 8 Coupling response level at both ends of the terminal box and device section

号失真。为了防止受到电磁干扰时接地屏蔽层流过的电流损伤设备,连接端子箱和设备的信号线屏蔽层仅在端子箱侧单端接地,同一根芯线在端子箱侧接地,便于信号传输,接地阻抗设置为 $1\ \Omega$,等效开路的铠装层和芯线则设置为接 $1\ \text{M}\Omega$ 。

1)连接室内主控柜和端子箱的模拟量传输线缆
主控室-端子箱段线缆两端耦合响应水平如图9所示。

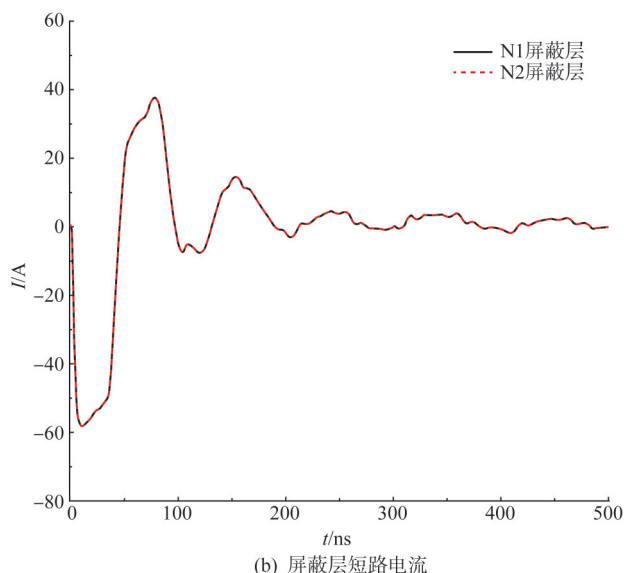
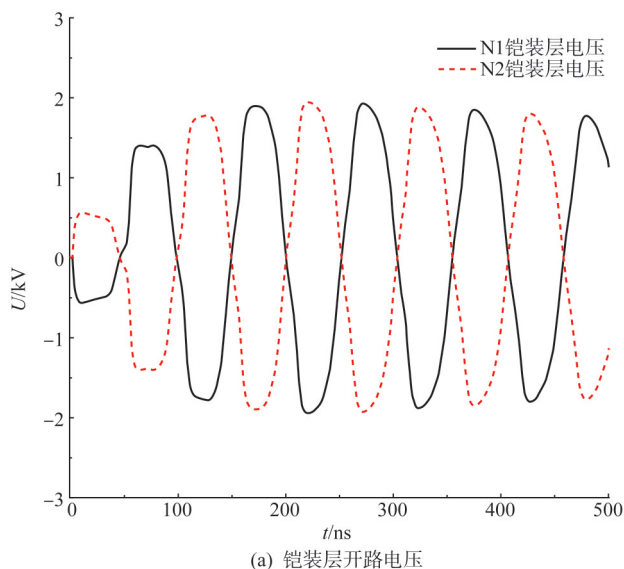


图9 主控室-端子箱段线缆两端耦合响应水平

Fig. 9 Coupling response level at both ends of the cable in the main control room-terminal box section

与同样主控室-端子箱的开关量传输线缆类似,屏蔽层两端接地使得HEMP耦合进入线缆的绝大部分能量在屏蔽层处经过接地后被泄放,导致除屏蔽

层外的铠装层以及芯线上耦合到的电压、电流水平降低,此时铠装层两端的电压水平降低到不足3 kV,芯线的耦合电流水平此时也仅有不足0.3 mA,对有一侧接地的芯线1而言,接地使得反射信号减弱,因此与其他三根芯线相比,芯线1上等效开路侧所耦合到的电流甚至低于0.1 mA。

此外,屏蔽层因接地而两端最大耦合到60 A的电流,芯线与屏蔽层耦合电流相比可见屏蔽层的屏蔽效能仅在接地时才能体现,此时屏蔽层耦合到的电流均流入地下,对设备的影响可以忽略不计。

对于图10所示芯线接地侧所感应到的短路电流,大小约为3 A,以站内运行的电流互感器为例,其二次侧模拟量信号一般为1 A或5 A,因此此时可能会使末端的控制系统判断故障产生,进而干扰变电站的正常运行。

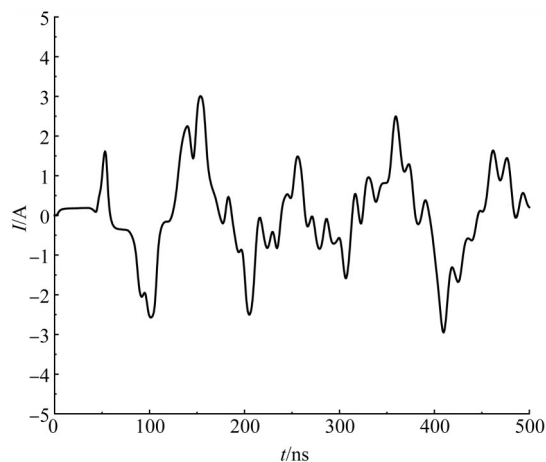


图10 芯线接地侧耦合电流水平

Fig. 10 Coupling current level on the ground side of the core

2)连接端子箱和设备的模拟量传输线缆

参考连接端子箱和室内控制柜的模拟量传输信号线,端子箱-设备段的线缆将从设备侧采集到的模拟量传输到室内控制柜进行数据监测,为了保护线缆内部传输的模拟量信号,则需要屏蔽层接地,但由于此段线缆一段接在设备侧,为了保护设备安全,此时的屏蔽层仅在端子箱单侧接地。同理为了保护设备,负责模拟量传输的芯线选择在端子箱侧单点接地,为信号的传输形成回路,防止信号失真。在此仿真中以N1侧屏蔽层和芯线接地模拟实际工况,接地阻抗设置为 $1\ \Omega$,等效开路的铠装层和芯线的接地阻抗设置为接 $1\ \text{M}\Omega$ 。端子箱-设备段线缆两端耦合响应水平,仿真结果如图11所示。

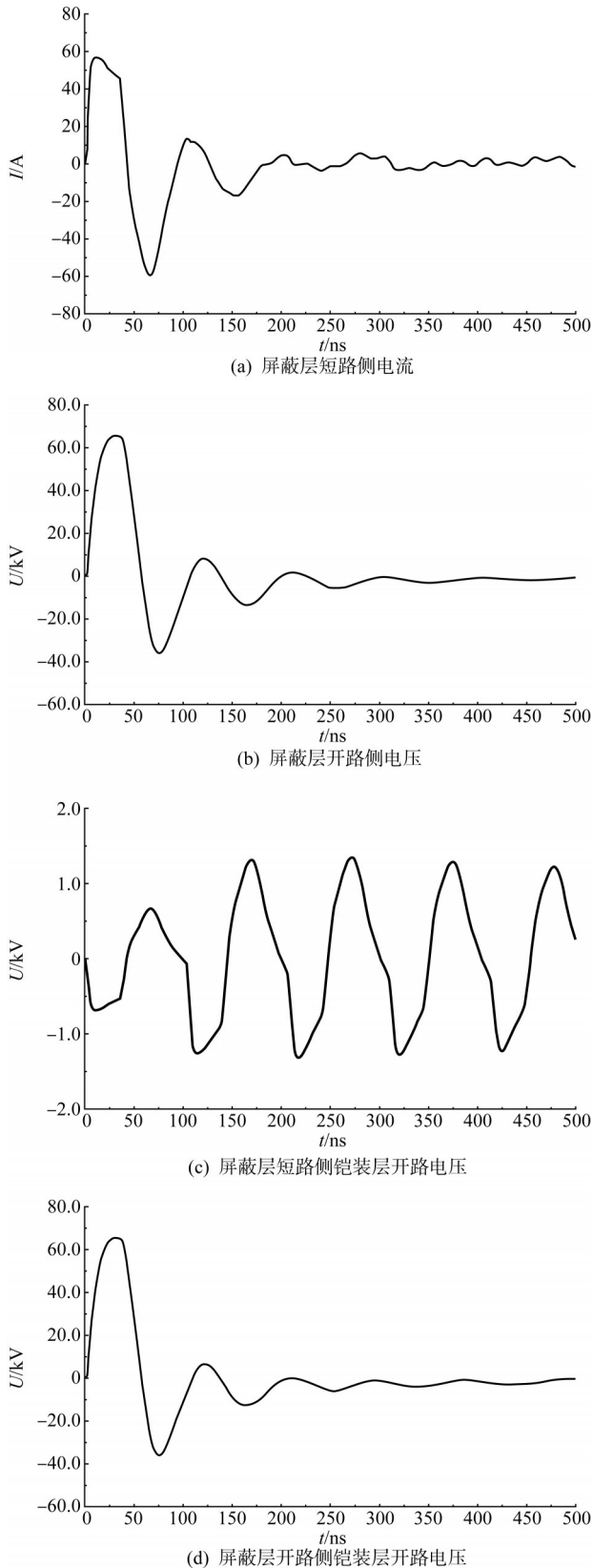


图11 端子箱-设备段线缆两端耦合响应水平

Fig. 11 Coupling response level at both ends of the terminal box and device section

当屏蔽层单侧接地时使得该侧的HEMP耦合进入线缆的绝大部分能量在屏蔽层处经过接地后被泄放,在这一侧屏蔽层感应电流达到60 A,铠装层两端的电压水平降低到1.5 kV左右,如图11(a)和(c)所示。

对于图12所示芯线所感应到的电流,芯线接地后感应电流大小约为4 A,会影响到正常的模拟量信号传输而造成站内设备故障。

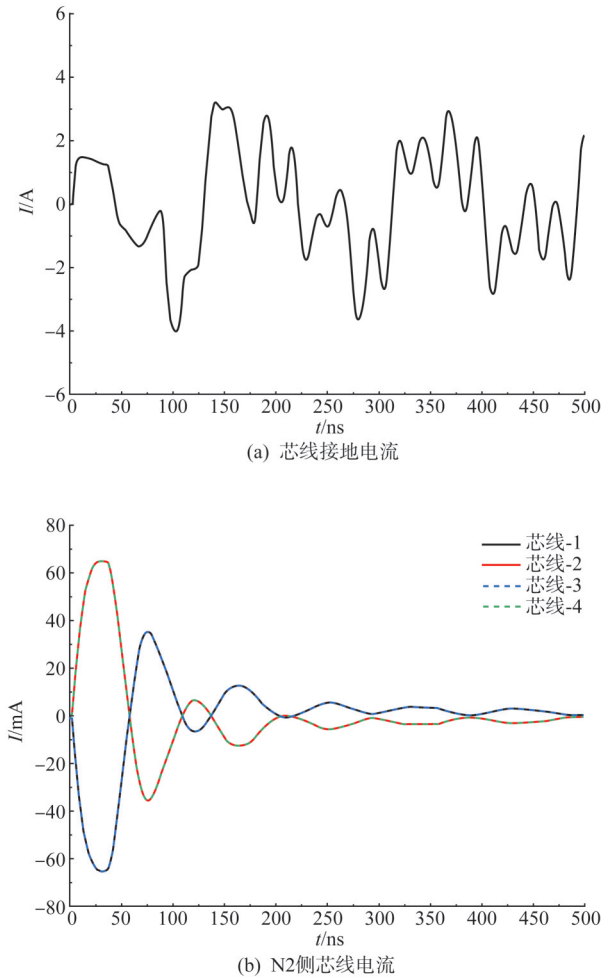


图12 芯线各端口感应水平

Fig. 12 Coupling response level of each port of the core

3 现场试验验证

为了验证仿真算法的准确性,搭建了高度 $H=8$ m、半锥角 $\theta_{hc}=40^\circ$ 的双锥-线栅天线进行现场试验,此天线可以产生水平极化的HEMP平面波^[19],当脉冲源加载420 kV激励时,距离地面高度3 m处的电场成双指数波形,峰值为56.4 kV/m,前沿约为

1.9 ns, 半宽约为 19.8 ns。现场试验中线缆长度为 8 m, 距离地面高度为 0.6 m。对于水平极化辐射波模拟器, 其在产生水平极化电场的同时还会在垂直方向上产生不可忽视的电场分量, 在实际试验中可能会耦合到末端的接地线缆或测量线缆而对实验数据造成影响^[20]。为降低垂直分量对耦合响应水平的影响, 仿真模型参考现场试验 1:1 搭建, 如图 13 所示。

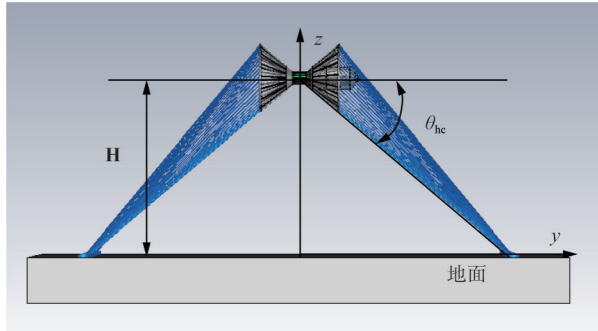


图 13 双锥-线栅天线模型

Fig. 13 Bicone-wire grid antenna model

3.1 连接主控室和端子箱的开关量传输线缆

根据连接主控室和端子箱的开关量传输线缆接线特征, 在现场搭建了屏蔽层两端接地, 其余芯线均不接地的线缆试验布局, 现场试验过程中测量了屏蔽层上流过的短路电流。实测数据以及对应的仿真结果对比如图 14 所示, 此时实测数据峰值为 68.0 A, 仿真结果峰值为 73.3 A, 二者从波形和峰值上都吻合得较好。

与图 6 所示的平面波仿真得到的屏蔽层电流波形不同, 现场试验和脉冲源实际模型仿真中线缆两端接地短线会受到电磁场垂直分量耦合, 导致耦合

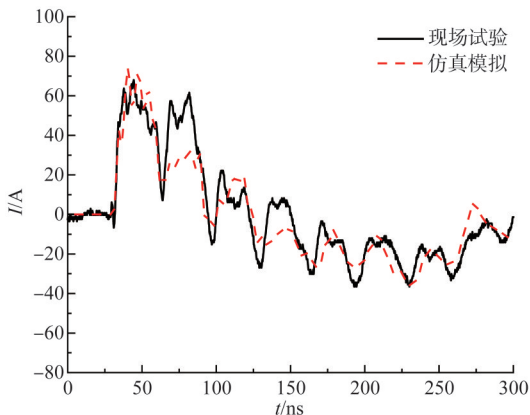


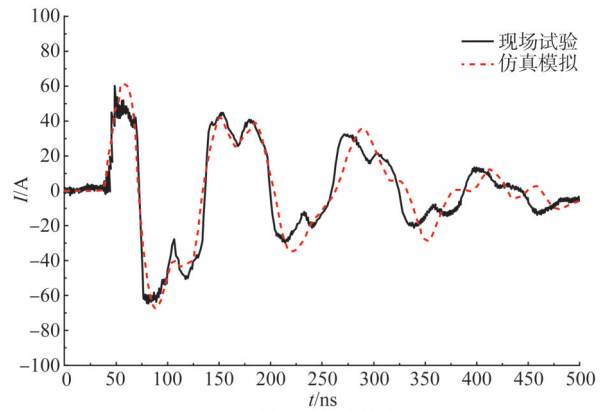
图 14 仿真与现场试验结果波形对比

Fig. 14 Waveforms comparison between simulation and field test results

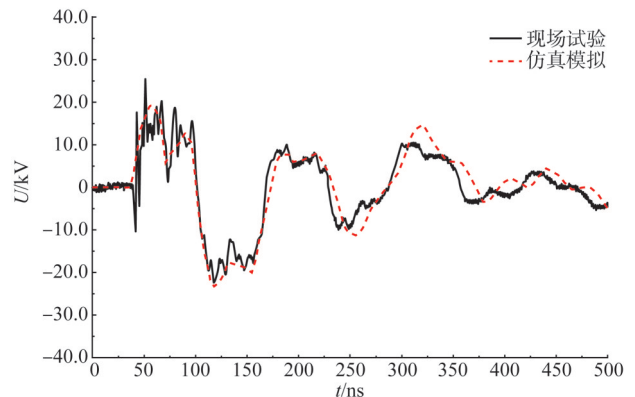
电流波形虽然整体呈现双极性宽脉冲波形的趋势, 但是会因为接地线的耦合导致波形中的出现一个反射峰。

3.2 连接端子箱和设备的开关量传输线缆

根据连接端子箱和设备的开关量传输线缆接线特征, 在现场搭建了屏蔽层单端接地, 其余线缆芯线均不接地布局, 线缆长度 8 m, 距离地面高度 0.6 m。在试验过程中测量了屏蔽层流过的短路电流和开路侧的开路电压。实测数据以及对应的仿真对比结果如图 15 所示, 可以看出实测数据和仿真结果的峰值以及震荡频率吻合得较好, 开路电压的实测和仿真峰值分别为 25.5 kV 以及 23.4 kV, 短路电流峰值分别为 64.8 A 以及 67.5 A。



(a) 屏蔽层短路电流



(b) 屏蔽层开路电压

图 15 仿真与现场试验结果波形对比

Fig. 15 Waveforms comparison between simulation and field test results

与图 14 中线缆屏蔽层两端接地测得的短路电流相比, 短路电流的峰值变化不大, 但当线缆的屏蔽层单点接地时, 受到一端开路的影响, 短路电流整体趋势由双极性宽脉冲波形变为震荡衰减, 开路

电压同为震荡衰减波形。实测中一端短路时的开路电压和短路电流的平均震荡周期大约为 115 ns。

3.3 连接端子箱和设备的模拟量传输线缆

根据连接端子箱和设备的模拟量传输线缆接线特征,在现场搭建了屏蔽层和一根芯线单端接地,其余线缆芯线均不接地布局,线缆长度 8 m,距离地面高度 0.6 m。在试验过程中测量了屏蔽层接地侧流过的短路电流和开路侧的开路电压。实测数据以及对应的仿真对比结果如图 16 所示,开路电压的实测和仿真峰值分别为 24.2 kV 以及 24.1 kV,短路电流峰值分别为 73.3 A 以及 72.0 A。

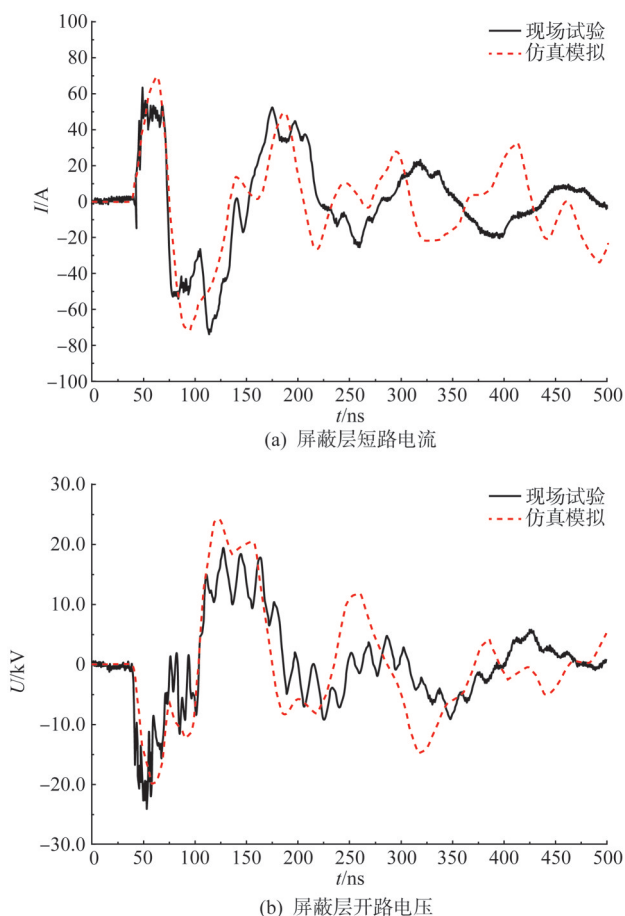


图 16 仿真与现场试验结果波形对比

Fig. 16 Waveforms comparison between simulation and field test results

对比图 15 和图 16,屏蔽层的短路电流和开路电压波形相似,均为衰减震荡波形,且峰值差距不大,震荡周期由 115 ns 略微增加至大约 143 ns。造成此结果的主要原因在于芯线接地后 HEMP 耦合进入线缆的能量通过线缆内部的转移阻抗传输依次进

入铠装层、屏蔽层以及内部芯线,且能量泄放通道由中的单侧屏蔽层增加至单侧屏蔽层和芯线,导致能量泄放加快,震荡周期变长,开路电压的峰值降低,短路电流峰值升高。

4 结论

本文基于典型变电站内部控制线缆的接线形式以及线缆型号,对 HEMP 耦合影响下线缆的耦合响应特性进行仿真分析和试验验证。

连接室内控制柜和户外端子箱的开关量传输线缆屏蔽层电流高达几十安培,而芯线感应水平为毫安级,连接端子箱和设备的开关量传输线缆在设备侧感应出高达几十千伏的高电压,端子箱侧屏蔽层电流高达几十安培,可能会直接损坏二次设备或干扰信号传输。连接室内控制柜和户外端子箱的模拟量传输线缆屏蔽层电流高达几十安培,接地芯线感应电流为安培量级,连接端子箱和设备的模拟量传输线缆在设备侧感应出高达几十千伏的高电压,端子箱侧接地芯线电流上升,可能直接损坏二次设备以及影响模拟量的传输。最后通过现场试验对仿真方法的等效性进行验证,仿真结果和试验数据在峰值和波形上均吻合得较好,验证上述仿真计算结果的有效性。

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, 1974, 28(8): 29 - 32.
- [3] STEIN D L. Electromagnetic pulse-the uncertain certainty[J]. Electromagnetic Pulse-the Uncertain Certainty, 1983, 39(3): 52 - 56.
- [4] 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.
- [5] 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 Electromagn Compatibility, 1980, EMC-22(2): 119 - 129.
- [6] RACHIDI F. Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field[J]. IEEE Transactions on Electromagn Compatibility, 1993, 35(3): 404 - 407.
- [7] BAUM C E, LIU T K, TESCHE F M. On the analysis of general multiconductor transmission-line networks[J]. Interact Note, 1978, 350(6): 467 - 547.
- [8] TESCHE F M, IANNOZZI M V, KARLSSON T. EMC analysis methods and computational models[J]. IEE Review, 1997, 43(4): 174 - 174.

- [9] 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 Dongyang, SUN Beiyun. Statistical study on response of overhead line to electromagnetic pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(7): 156 – 161.
- [10] 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 Yusheng. A finite difference method for the solution of time domain electric field integral equation of thin wires structures[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000(1): 45 – 48.
- [11] GUO J, RACHIDI F, TKACHENKO S V, et al. Calculation of high-frequency electromagnetic field coupling to overhead transmission line above a lossy ground and terminated with a nonlinear load [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(6): 4119 – 4132.
- [12] 李妮, 郭俊, 张建功, 等. 架空多导体传输线 HEMP 响应建模及分析[J]. 现代应用物理, 2014, 5(4): 278 – 284.
LI Ni, GUO Jun, ZHANG Jiangong, et al. Modeling and analyzing of HEMP coupling to overhead multiconductor transmission lines [J]. Modern Applied Physics, 2014, 5(4): 278 – 284.
- [13] ZHAI X Y, XIE H Y, QIAO H L, et al. A full-wave transmission-line hybrid method for vertically laid shielded cable illuminated by HEMP [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023, 65(5): 1501 – 1508.
- [14] International Electrotechnical Commission. 2025 Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 2 – 9: Environment-Description of HEMP environment-Radiated disturbance; IEC 61000 – 2–9 [S]. Geneva: IEC, 1996.
- [15] XIE H Y, DU T J, ZHANG M Y, et al. Theoretical and experimental study of effective coupling length for transmission lines illuminated by HEMP [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(6): 1529 – 1538.
- [16] 周启明, 罗学金, 许献国, 等. 近地九芯电缆高空电磁脉冲耦合模拟试验[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(1): 63 – 67.
ZHOU Qiming, LUO Xuejin, XU Xianguo, et al. HEMP coupling simulating test of nine cores cable near ground [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(1): 63 – 67.
- [17] 张卫东, 陈沛龙, 陈维江, 等. 特高压 GIS 变电站 VFTO 对二次电缆骚扰电压的实测与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 187 – 196.
ZHANG Weidong, CHEN Peilong, CHEN Weijiang, et al. Measurement and simulation of VFTO disturbance voltage on secondary cables in UHV GIS substation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 187 – 196.
- [18] 陈维江, 赵军, 边凯, 等. GIS 变电站开关操作瞬态电磁骚扰研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4935 – 4948.
CHEN Weijiang, ZHAO Jun, BIAN Kai, et al. Research progress of switching transient electromagnetic disturbance in GIS substations [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4935 – 4948.
- [19] 秦锋, 王旭桐, 陈伟, 等. 高空电磁脉冲作用下配电变压器瞬态响应与失效机理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6924 – 6932.
QIN Feng, WANG Xutong, CHEN Wei, et al. Transient response and failure mechanism of distribution transformer under high-altitude electromagnetic pulse [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6924 – 6932.
- [20] 肖保明, 王泽忠, 卢斌先, 等. 微机保护装置对开关瞬态干扰的敏感度研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 59 – 63.
XIAO Baoming, WANG Zezhong, LU Binxian, et al. Sensitivity research of microcomputer-based protection devices to switching transient interference [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 59 – 63.
- [21] 赵军, 陈维江, 张建功, 等. 智能变电站二次设备对开关瞬态的电磁兼容抗扰度要求分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 1687 – 1695.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, ZHANG Jiangong, et al. Analysis of EMC immunity requirements of secondary equipment for switching transients in smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 1687 – 1695.
- [22] 任雷浩, 李克俭, 刘贵, 等. 基于电磁互感的并联功率器件双脉冲测试模型[J]. 南方电网技术, 2026, 20(2): 23 – 29.
REN Leihao, LI Kejian, LIU Gui, et al. Dual-pulse testing model of parallel power devices based on electromagnetic mutual inductance [J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(2): 23 – 29.
- [23] 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 test platform for power grid equipment against high-power electromagnetic pulse [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(1): 12 – 19.
- [24] 龚渝涵, 李俊娜, 田君杨, 等. 典型变电站沟内线缆 HEMP 耦合仿真研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(4): 47 – 53.
GONG Yuhuan, LI Junna, TIAN Junyang, et al. HEMP coupling simulation of cables in trench of typical substation [J]. Smart Power, 2024, 52(4): 47 – 53.
- [25] 祝敏, 刘顺坤, 周辉, 等. 电磁脉冲对电缆的耦合效应实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(6): 761 – 765.
ZHU Min, LIU Shunkun, ZHOU Hui, et al. Experimental study of EMP coupling to long shielded cable [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(6): 761 – 765.
- [26] IEC. 1996-EMC-Part 2: description of HEMP environment-Section 9: radiated disturbance; IEC 61000 – 2 – 9 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 1996.
- [27] IEC. 2021-EMC-Part 2: description of HEMP environment-Section 10: conducted disturbance; IEC 61000 – 2–10 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2021.
- [28] 王皓琰, 李俊娜, 龚渝涵, 等. 双锥-线栅型水平极化天线辐射特性研究[J]. 现代应用物理, 2022, 13(4): 175 – 181.
WANG Haoyan, LI Junna, GONG Yuhuan, et al. Radiation characteristics of biconical-wire grid horizontally polarized antenna [J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(4): 175 – 181.
- [29] LI S, LI J, WU F, et al. A hybrid simulator with novel bicone-wire grid antenna [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(3): 034707.1 – 034707.9.

收稿日期: 2024-04-28; 网络首发日期: 2024-07-31

作者简介:

夏小飞(1981), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为输变电设备研究和运维技术, 23459133@qq.com;

刘磊(1982), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为高电压与绝缘技术中外绝缘与电磁环境、复合横担、架空导线项目, liulei@csg.cn;

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。