

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.01.009

电磁脉冲在地上及地下的传播规律

刘青¹, 徐婷¹, 韩康康¹, 吴迎霞²

(1. 西安科技大学, 西安 710054; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400014)

摘要: 电磁脉冲会在辐照范围内的导体上感应出电压和电流, 充分了解电磁脉冲在地上及地下的传播特性及分布规律是评估电磁脉冲效应的必要基础。以高空核爆电磁脉冲为例, 采用IEC-61000-2-9—1996中的波形标准, 利用傅里叶变换技术计算分析了地上及地下的电场及磁场的水平及垂直分量。结果表明: 反射场使地上电磁场的水平分量幅值变小, 而使垂直分量幅值变大; 由于大地的影响, 地下电磁环境异于地上空间, 且大地参数对地下电磁场的影响更大, 地下电磁场幅值随大地电导率增大而减小, 而随大地相对介电常数增大而增大; 地下电磁场幅值远小于地上电磁场幅值, 尤其是垂直分量在地下衰减很快。

关键词: 高空核爆; 电磁脉冲; 大地参数; 透射场; 傅里叶变换

Propagation Law of Electromagnetic Pulse on the Ground and Underground

LIU Qing¹, XU Ting¹, HAN Kangkang¹, WU Yingxia²

(1. Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China)

Abstract: Induced voltage and current will be caused in conductors by irradiation of electromagnetic pulse (EMP). It is significant to fully understand the propagating characteristic of EMP. Taking the high altitude electromagnetic pulse (HEMP) as an example, the environment on the ground and underground have been calculated by using the standard waveforms in IEC-61000-2-9—1996. It can be seen that for the field on the ground, the reflection of the earth reduces the horizontal field, but increases the vertical field. The HEMP environment on the ground is far different from that underground. The earth parameters have a greater effect on field underground than the field on the ground. The magnitudes of field on the ground are much higher than those underground, especially for the vertical fields. The more the earth permittivity is or the smaller the earth conductivity is, the more the field magnitudes are. Angles of incident field are the random factors to the EMP environment.

Key words: high altitude nuclear explosion; electromagnetic pulse (EMP); earth parameters; transmission field; Fourier transform

0 引言

高空电磁脉冲(high-altitude electromagnetic pulse, HEMP)是一种强大的电磁干扰源, 尤其是 E_1 分量, 具有峰值场强极高、频谱分布极宽、作用范围极广等特点, 会在其辐照范围内的金属导体上感应出幅值较高的电压和电流^[1-7]。HEMP 对地面技术系统,

尤其是对电网、油气管网、通信网等国家关键基础设施的影响近年来引起人们的广泛关注。美国国会专门成立了“电磁脉冲委员会”, 评估国家重要基础设施在电磁脉冲作用下的易损性和恢复重建能力, 并提出了相应的应对措施^[8-11]。基于传输线理论求解场线耦合问题时, 在常用模型中的激励源项推导中, 需要不同的激励场分量^[12-14], 因此, 在进行 HEMP 效应分析时, 有必要首先研究基础设施所处的电磁

收稿日期: 2016-06-05; 修回日期: 2016-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307137); 西安科技大学青年基金项目(201322)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51307137), Cultivation Found Project of Xi'an University of Science and Technology(201322).

脉冲环境。

以往对 HEMP 的研究主要集中在地面以上的区域,如文[15]研究了 Bell 波形作用下地面附近的 HEMP 电场环境。文[16]虽然研究了 Bell 波形入射时地下电磁脉冲环境,但只研究了沿线缆方向的电场。随着中国油气输运工程、直流输电技术的发展,越来越多的电力电缆、信号电缆和管道出现在地下空间,电磁脉冲在土壤介质中的分布规律研究同样重要。另外,针对民用系统,在分析 HEMP 效应时更多采用国际电工委员会标准 IEC-61000-2-9—1996 中规定的波形^[17]。因此,文中采用此标准中的 HEMP 环境,分析 HEMP 平面波入射时,地上及地下的电磁脉冲传播规律,不但包括电场环境,还包括磁场环境。研究不同入射波状态、不同土壤介质参数和不同高度或埋深条件下的电磁脉冲传播规律,为地上及地下设施的电磁脉冲防护加固设计提供参考。

1 HEMP 的表述及平面波的传输与反射

HEMP 辐射环境通常用双指数表达式来描述,见式(1)。

$$E(t)=kE_0(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}). \quad (1)$$

式(1)中: E_0 是脉冲的峰值场强,一般为 50 kV/m; k 是修正系数; β 、 α 用于表征脉冲的前沿和后沿参数。

目前,有 3 种被认可的 HEMP 波形标准^[18-19],分别是 1976 年出版物标准、Bell 实验室标准和 IEC 标准,3 种标准的具体参数见表 1。其中,1976 年出版物定义的波形前沿最缓,半高宽最宽;IEC 标准定义的波形前沿最陡(2.5 ns),半高宽最窄(55 ns);Bell 实验室定义的波形参数介于前两者之间。

表 1 3 种常见的 HEMP 描述参数

Table 1 Parameters of HEMP waveforms

波形标准	参数		
	α/s^{-1}	β/s^{-1}	k
1976年出版物	1.5×10^6	2.60×10^8	1.04
Bell实验室	4.0×10^6	4.76×10^8	1.05
IEC	40.0×10^6	6.00×10^8	1.30

空气与大地交界面处的入射、反射和透射场示意图见图 1。幅值为 E_0 的入射平面波可由极化角 α (入射电场矢量与入射平面的夹角)、方位角 ϕ (入射方向在地平面的投影与 x 轴的夹角)和仰角 ψ (入射方向与其在地平面的投影之间的夹角)3 个角度来描述,其垂直极化分量 $E_v^{\text{inc}}=E_0 \cos \alpha$,水平极化分量 $E_h^{\text{inc}}=E_0 \sin \alpha$ ^[20],图(1)中分别用“ $\perp$ ”、“ $\parallel$ ”表示电磁场的垂直和水平极化分量。

图 1 中入射电场和入射磁场分别为

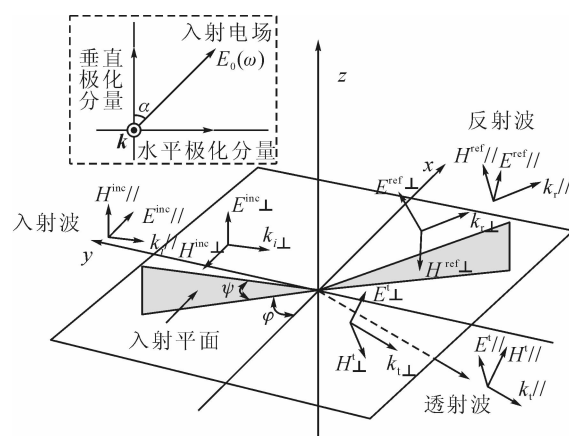


图 1 空气与大地交界面处的入射、反射和透射场

Fig. 1 Incident field, reflected field and transmission field

$$E^{\text{inc}}=[(E_v \sin \psi \cos \phi + E_h \sin \phi) \mathbf{x} + (-E_v \sin \psi \sin \phi + E_h \cos \phi) \mathbf{y} + E_v \cos \psi \mathbf{z}] e^{-jk_x x \cos \phi} e^{jk_y y \sin \phi} e^{jk_z z \sin \psi}; \quad (2)$$

$$H^{\text{inc}}=\frac{1}{Z_0}[(-E_v \sin \phi + E_h \sin \psi \cos \phi) \mathbf{x} - (E_v \cos \phi + E_h \sin \psi \sin \phi) \mathbf{y} + E_h \cos \psi \mathbf{z}] e^{-jk_x x \cos \phi} e^{jk_y y \sin \phi} e^{jk_z z \sin \psi}. \quad (3)$$

可以通过入射波和菲涅尔反射系数求出反射波。

$$E^{\text{ref}}=[(-E_v \sin \psi \cos \phi R_v + E_h \sin \phi R_h) \mathbf{x} + (E_v \sin \psi \sin \phi R_v + E_h \cos \phi R_h) \mathbf{y} + E_v \cos \psi R_v \mathbf{z}] e^{-jk_x x \cos \phi} e^{jk_y y \sin \phi} e^{-jk_z z \sin \psi}; \quad (4)$$

$$H^{\text{ref}}=\frac{1}{Z_0}[(-E_v \sin \phi R_v + E_h \sin \psi \cos \phi R_h) \mathbf{x} - (E_v \cos \phi R_v + E_h \sin \psi \sin \phi R_h) \mathbf{y} - E_h \cos \psi R_v \mathbf{z}] e^{-jk_x x \cos \phi} e^{jk_y y \sin \phi} e^{-jk_z z \sin \psi}. \quad (5)$$

式(5)中: R_v 为垂直方向的费涅尔反射系数; R_h 为水平方向的费涅尔反射系数。

对于地面上的观察者,传输场(透射场)可用菲涅尔传输系数 T_v 和 T_h 表示。

$$E^{\text{t}}=[(E_v T_v \sin \psi \cos \phi + E_h T_h \sin \phi) \mathbf{x} - (E_v T_v \sin \psi \sin \phi - E_h T_h \cos \phi) \mathbf{y} + E_v \cos \psi \mathbf{z}] e^{-\gamma_g x \cos \phi} e^{\gamma_g y \sin \phi} e^{\gamma_g z \sin \psi}; \quad (6)$$

$$H^{\text{t}}=\frac{1}{Z_{0g}}[(-E_v T_v \sin \phi + E_h T_h \sin \psi \cos \phi) \mathbf{x} - (E_v T_v \cos \phi + E_h T_h \sin \psi \sin \phi) \mathbf{y} + \sin \alpha T_h \cos \psi \mathbf{z}] e^{-\gamma_g x \cos \phi} e^{\gamma_g y \sin \phi} e^{\gamma_g z \sin \psi}. \quad (7)$$

式(7)中: $Z_{0g}=\sqrt{j\omega\mu_0/(\sigma_g+j\omega\epsilon_g)}$ 是土壤的特性波阻抗; γ_g 是土壤中的传播常数, $\gamma_g^2=j\omega\mu_0(\sigma_g+j\omega\epsilon_g)$;反射波垂直角 $\psi_r=\psi$,透射场传输角 $\cos \psi_t=jk \cos \psi / \gamma_g$ 。

2 地上的 HEMP 环境

2.1 地上电场传播规律

文中通过傅里叶变换将 HEMP 的时域波形变换到频域,利用频域表达式,即式(2)–(7),求出每个频率点上的电场、磁场谱值,最后通过傅里叶反变换得到需要的时域波形。采样频率及采样点数由 HEMP 的上升时间(2.5 ns)和持续时间决定。

入射波形采用 IEC 规定的波形, 不同的入射波状态, 即不同的极化角、方位角和仰角取值, 距地面 5 m 处水平电场 E_x 的波形图见图 2。其他计算条件见图 2 中标注, 其中大地电导率 $\sigma_g = 1 \times 10^{-2}$ S/m, 相对介电常数 $\varepsilon_r = 10$ 。

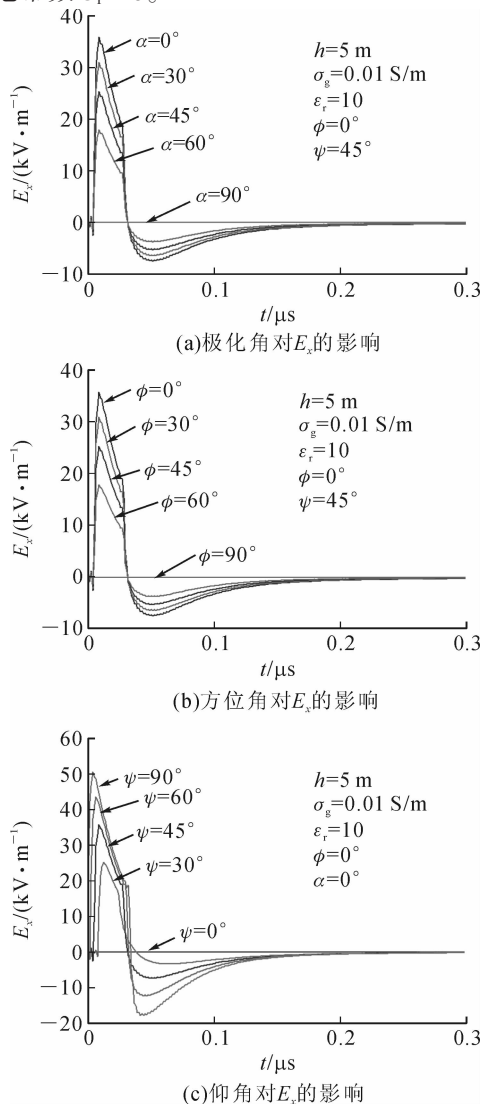


图 2 入射波状态对电场 E_x 的影响

Fig. 2 Angles of incident field vs horizontal field

由图 2 可见, 当 ϕ 为 0° 时, 随着入射波 α 的增大, 沿 x 方向电场的幅值逐渐减小; 当 $\alpha=0^\circ$ 时, 电场 E_x 幅值随着 ϕ 的增大而减小; ψ 对 E_x 的影响正好相反, 当 $\psi=90^\circ$ 时电场幅值最大。3 个角度对电场幅值影响的本质是在不同入射角度下, 入射电场在 x 方向的投影大小不同。

不同 σ_g 取值下 E_x 的波形图见图 3。从图 3 可知, σ_g 对由反射电场引起的负向脉冲幅值有影响。随着 σ_g 增加, 反射电场增大, 而在地面附近反射电场总是试图抵消入射场, 因此负向脉冲幅值随 σ_g 增加而变大。不同对地高度 h 时电场 E_x 的波形图见图 4。由图 4 可见, 对于所选取的高度, h 对电场幅值影响

很小。计算中将入射场到达 $(0, 0, 30)$ 时作为 $t=0$ 时刻, 入射波到达不同高度处传播距离不同导致电场波形出现时延, 如当 $\psi=45^\circ$ 时, 入射波到 $h=30$ m 和 $h=20$ m 传播距离差为 $10/\sqrt{2}$ m, 入射波传播速度为 3×10^8 m/s, 时延约为 0.024 μ s。同理, 反射波到达不同高度处的传播距离不同, 导致电场的负向脉冲出现时间不同。

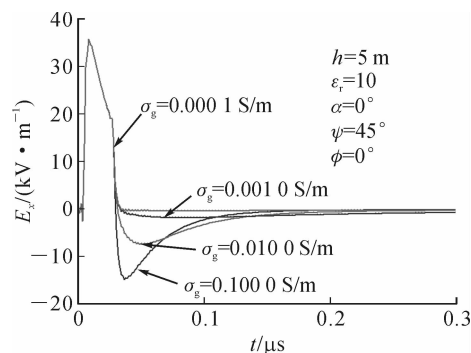


图 3 大地电导率对电场 E_x 的影响

Fig. 3 Earth conductivity vs horizontal field

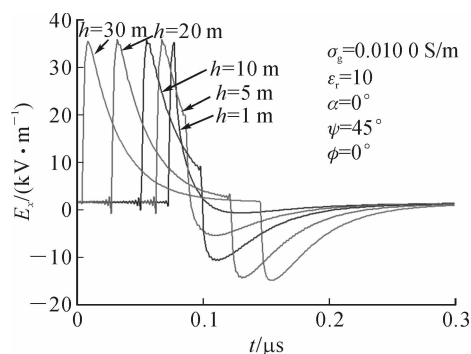


图 4 不同高度处的电场 E_x

Fig. 4 Horizontal field at different heights

大地电导率和介电常数对电场 E_z 的影响见图 5、6。与 E_x 的波形明显不同, E_z 的波形有双峰, 这是因为两者的反射场对入射场的影响不同, 对于垂直方向的电场来说, 反射场试图增强入射场。大地参数主要是通过对反射场的影响从而影响合成电场 E_z , 且取值越大, E_z 的第 2 个峰值越大。

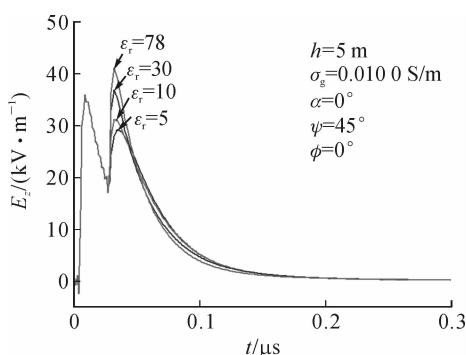


图 5 大地介电常数对电场 E_z 的影响

Fig. 5 Effects of earth permittivity on vertical field

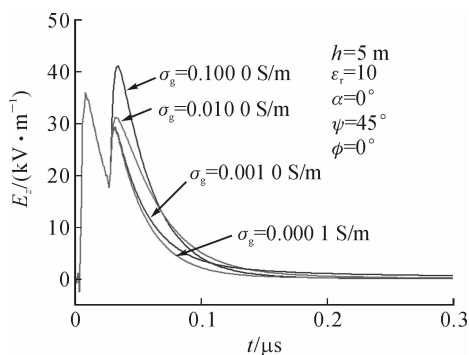
图6 大地电导率对电场 E_z 的影响

Fig. 6 Effects of earth conductivity on vertical field

不同对地高度处电场 E_z 的波形见图7。入射波传播距离的不同导致各处电场波形出现时延。与图4中 E_x 波形不同,反射场增强垂直方向的电场,因此出现正向脉冲。值得注意的是,当 $h=1$ m时,由于反射波传播距离短,在入射波未到峰值时,已叠加在入射波上,因此幅值较高。

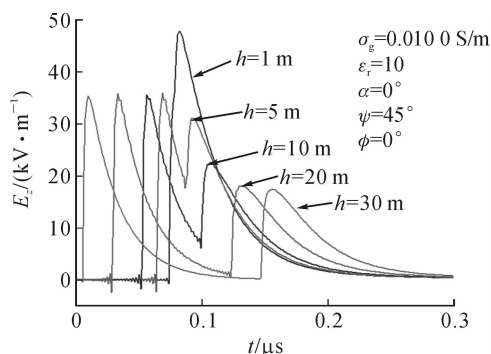
图7 不同高度处的电场 E_z

Fig. 7 Vertical field at different heights

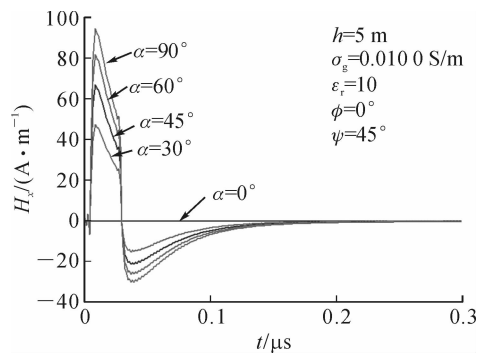
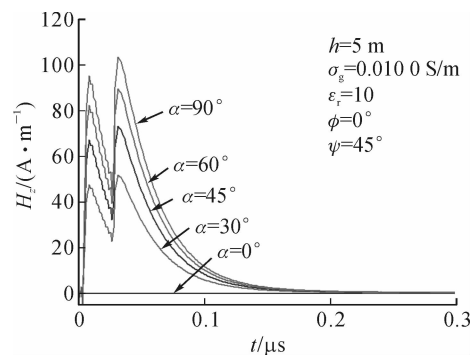
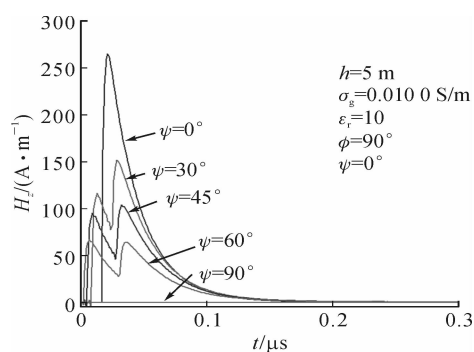
2.2 地上磁场传播规律

不同 α 时,地上磁场 H_x 和 H_z 的波形分别见图8、9。由图8、9可见,随着 α 增大, H_x 和 H_z 幅值逐渐增大。取 $\alpha=90^\circ$,其余条件不变,计算 ϕ 和 ψ 对 H_x 的影响可知,随着角度的增加磁场幅值增加。 ψ 对垂直方向磁场 H_z 的影响见图10。从图10可见, ψ 不但影响磁场幅值,还会影响磁场的传播时间,当 $\psi=0^\circ$ 时,入射场和反射场的叠加使磁场幅值变大。另外,大地参数、高度对磁场 H_z 的影响规律与 E_z 情况类似,对 H_x 的影响规律与 E_x 情况类似,故不再给出波形。

3 地下的 HEMP 环境

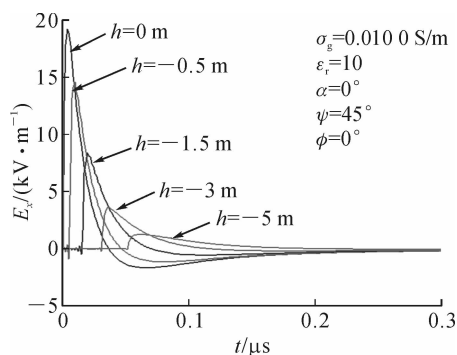
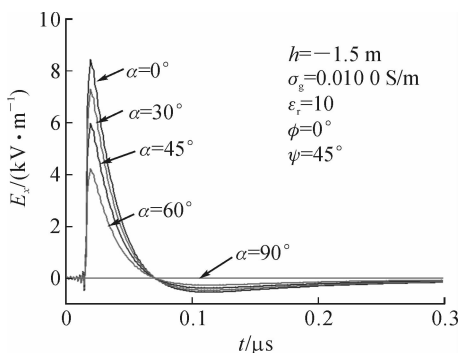
3.1 地下电场传播规律

地下不同深度处电场 E_x 的波形见图11。电磁脉冲在地下传播时会随着深度的增加而衰减。由于电场高频分量的趋肤深度小,因此高频分量在地中的衰减比低频分量的衰减更快。 α 对地下1.5 m处

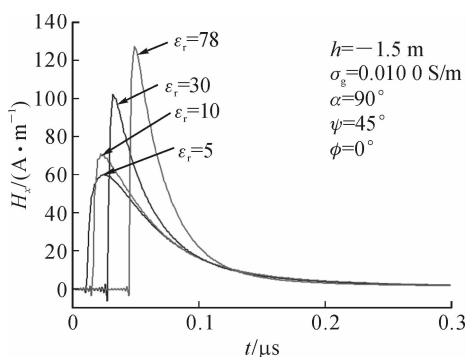
图8 极化角对 H_x 的影响Fig. 8 Effects of polarization angle on H_x 图9 极化角对磁场 H_z 的影响Fig. 9 Effects of polarization angle on H_z 图10 仰角对磁场 H_z 的影响Fig. 10 Effects of elevation angle on H_z

电场 E_x 的影响见图12。由图12可知, E_x 幅值随着极化角增大而减小,当 $\alpha=90^\circ$ 或 $\psi=0^\circ$ 时 E_x 为零。方位角对 E_x 的影响与极化角类似,此处不再给出波形。大地电导率对地下电场 E_x 的影响见图13。在所选的计算条件下,大地电导率越小, E_x 幅值越大,脉宽越宽,这主要因为随着大地电导率的减小,大地对入射场的反射减小而透射能力增加。

不同 α 和 ϕ 时地下1.5 m处垂直方向电场 E_z 的幅值见表2。由表2可见, E_z 幅值随着极化角增大而减小,而仰角对电场幅值的影响非单调变化;当 $\psi=90^\circ$ 或 $\psi=0^\circ$ 时, E_z 为零。计算发现 ϕ 对 E_z 无影响。值得注意的是,在相同的计算条件下, E_z 幅值比 E_x 小得多,因此在分析地下导体的电磁脉冲响应时通

图 11 不同深度的电场 E_x Fig. 11 Horizontal field E_x at different depths图 12 极化角对地下 E_x 的影响Fig. 12 Effects of polarization angle on E_x 表 2 极化角和方位角对垂直方向电场 E_z 的影响Table 2 Effect of polarization angle and elevation angle on E_z

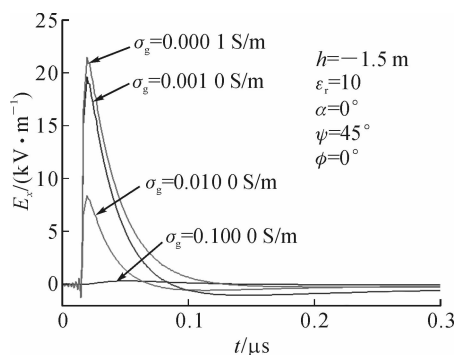
垂直电场/ ($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)	极化角(方位角、仰角均为 45°) $\alpha/^\circ$					仰角(方位角、极化角均为 45°) $\psi/^\circ$				
	0	30	45	60	90	0	30	45	60	90
E_z	1.649	1.428	1.166	0.824	0.000	0.000	1.790	1.649	1.236	0.000

图 14 介电常数对地下磁场 H_x 的影响Fig. 14 Effects of earth permittivity on H_x

由图 14 可见, 介电常数越大, H_x 幅值越大, 且 H_x 波形出现时延。通过对垂直方向磁场 H_z 的计算发现, 与极化角对电场 E_x 的影响相反, 极化角越大磁场 H_z 幅值越大。 $\alpha=0^\circ$ 时, H_z 为零, 见图 15, 方位角对 H_z 无影响; 与相同条件下地上的垂直方向磁场相比, 地下的 H_z 幅值小得多。

4 结论

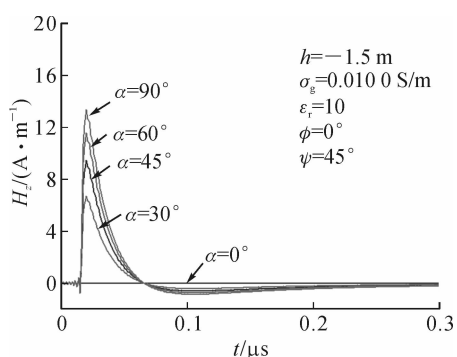
由于大地的影响, 地面附近及地下的电磁脉冲

图 13 大地电导率对地下电场 E_x 的影响Fig. 13 Effects of earth conductivity on E_x

常可以忽略激励场的垂直分量。深度、大地电导率和大地相对介电常数对地下电场 E_z 的影响规律与其对 E_x 的影响类似。

3.2 地下磁场传播规律

通过对地下 1.5 m 处 x 方向磁场 H_x 的计算发现, 与极化角对电场 E_x 的影响相反, 极化角越大磁场 H_x 幅值越小, $\alpha=0^\circ$ 时, H_x 为零。当 $\alpha=90^\circ$ 时, 仰角越大, H_x 幅值越大; 而方位角越大, H_x 幅值越小。 $\alpha=90^\circ$ 时, 不同大地相对介电常数时的 H_x 波形图见图 14。

图 15 极化角对地下磁场 H_z 的影响Fig. 15 Effects of polarization angle on H_z

环境与地上电磁脉冲环境区别较大。文中采用 IEC-61000-2-9—1996 中的 HEMP 环境标准, 计算分析了地上及地下的电磁脉冲电场及磁场环境, 计算表明:

- 1) 地面的反射总试图抵消地上的水平电场和水平磁场, 而增强地上的垂直电场和垂直磁场;
- 2) 在相同的人射波状态和大地参数的条件下, 地下电磁场幅值远小于地上电磁场, 尤其是电场的垂直分量在地下衰减很快;
- 3) 入射角度对电场和磁场的影响本质是, 在不

同的角度入射时,入射电场和磁场在各坐标轴的投影不同;

4)大地参数对地下电磁场影响更大,随着大地电导率的增加地下电磁场幅值显著降低,而大地相对介电常数越大,地下电磁场幅值越大。

参考文献:

- [1] RICHARD H, LARRY S. Finite-difference analysis of EMP coupling to thin and wires[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1981, 23(2): 88-97.
- [2] 李宝忠, 何金良, 周辉, 等. 电磁脉冲在传输线上激励电流规律研究[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(1): 36-40.
LI Baozhong, HE Jinliang, ZHOU Hui, et al. Study about induced current law by EMP on transmission line[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(1): 36-40.
- [3] 卢斌先, 郝晓飞, 罗艳华, 等. HEMP场激励下交直流高压输电线耦合响应概率分布[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 141-145.
LU Binxian, HAO Xiaofei, LUO Yanhua, et al. Probability distribution of coupling responses of HVAC and HVDC externally excited by HEMP[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 141-145.
- [4] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 电磁脉冲模拟器下架空线缆响应的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 200-204.
XIE Yanzhao, WANG Zhanji, WANG Qunshu, et al. Experimental study on the response of aerial wires illuminated by simulated electromagnetic pulse[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 200-204.
- [5] 翟爱斌, 谢彦召, 韩军, 等. 两种高空核爆电磁脉冲下电话机的效应异同性及概率分布[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1529-1533.
ZHAI Aibin, XIE Yanzhao, HAN Jun, et al. Effect of high altitude nuclear electromagnetic pulse upon phone call[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(10): 1529-1533.
- [6] 张建功, 干喆渊, 赵志斌. 架空线路电磁散射的混合建模快速算法[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4184-4190.
ZHANG Jiangong, GAN Zheyuan, ZHAO Zhibin. Fast calculation hybrid modeling of scattering from overhead line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4184-4190.
- [7] XIE Y Z, GUO J, CANAVERO F. Analytic iterative solution of electromagnetic pulse coupling to multiconductor transmission lines[J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(3): 451-466.
- [8] FOSTER J S, GRAHAM W R, HERMANN R J, et al. Report of the commission to assess the threat to the united states from electromagnetic pulse (EMP) attack, volume 1: executive report[R]. Washington, USA: EMP Commission, 2004.
- [9] FOSTER J S, GRAHAM W R, HERMANN R J, et al. Report of the commission to assess the threat to the United States from electromagnetic pulse (EMP) attack-critical national infrastructures[R]. Washington, USA: EMP Commission, 2008.
- [10] SAVAGE E, GILBERT J, RADASKY W, The early-time (E1) high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) and its impact on the U.S. power Grid[R]. Geleta, USA: Metatech Corporation, 2010.
- [11] GILBERT J, KAPPENMAN J, RADASKY W, et al. The late-time (E3) high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) and its impact on the U.S. power grid[R]. Geleta, USA: Metatech Corporation, 2010.
- [12] TAYLOR C D. The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1965 (AP-13), 987-989.
- [13] 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.
- [14] RACHIDI F. Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation fields [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993, 35(3): 404-407.
- [15] 谢彦召, 孙蓓云, 周辉, 等. 地面附近的高空核爆电磁脉冲环境[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7): 680-684.
XIE Yanzhao, SUN Beiyun, ZHOU Hui, et al. High-altitude electromagnetic pulse environment over the lossy ground [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(7): 680-684.
- [16] 王川川, 朱长青, 周星, 等. 电磁脉冲在地下的传播特性研究[J]. 微波学报, 2012, 28(1): 81-84.
WANF Chuanchuan, ZHU Changqing, ZHOU Xing, et al. Research on characteristics of electromagnetic pulse propagating into earth[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(1): 81-84.
- [17] IEC-61000-2-9—1996 Environment-description of HEM environment-radiated disturbance[S]. American: International Electrotechnical Commission, 1996.
- [18] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787.
XIE Yanzhao, WANG Zhanji, WANG Qunshu, et al. High altitude nuclearelectromagnetic pulse waveform standards: A review[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 781-787.
- [19] 潘虎. 高空核爆电磁脉冲环境的表述[J]. 抗核加固, 1998, 15(2): 73-78.

(下转第 63 页)

- [7] 吴浩, 徐重力, 张杰峰, 等. 舟山多端柔性直流输电技术及应用[J]. 智能电网, 2013, 1(2): 22-26.
WU Hao, XU Zhongli, ZHANG Jiefeng, et al. VSC-MTDC transmission technologies and its application in Zhoushan[J]. Smart Grid, 2013, 1(2): 22-26.
- [8] 季舒平. 上海南汇柔性直流输电示范工程关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
JI Shuping. Study on the key technology of the Shanghai Nanhui flexible hvdc demonstration project[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [9] 李扶中, 周敏, 贺艳芝, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统接入与换流站设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 58-62.
LI Fuzhong, ZHOU Min, HE Yanzhi, et al. Design scheme of system access and converter station of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 58-62.
- [10] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [11] 朱奕帆. 柔性直流输电技术在风电并网中的应用[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1130-1133.
ZHU Yifan. Application of flexible HVDC transmission technology in grid-connected wind power[J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1130-1133.
- [12] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电技术在全球能源互联网中的应用探讨[J]. 智能电网, 2016, 4(2): 116-123.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Discussion on applying the VSC-HVDC technology in global energy interconnection[J]. Smart Grid, 2016, 4(2): 116-123.
- [13] 曹效义, 杜建建. ± 800 kV 特高压换流站电气总平面布置设计优化[J]. 内蒙古电力技术, 2015, 33(4): 5-10.
CAO Xiaoyi, DU Jianjian. Optimization of general electric arrangement design for ± 800 kV extra-high tension converter station[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2015, 33(4): 5-10.
- [14] 张凌, 杨金根, 曾静. 特高压阀厅电气设计研究[J]. 电力建设, 2007, 28(5): 12-16.
ZHANG Ling, YANG Jingen, ZENG Jing. Study on electric design of UHV valve hall[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(5): 12-16.
- [15] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设备(± 800 kV 换流站分册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
LIU Zhenya. State grid corporation transmission project general equipment(± 800 kV converter station volume)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [16] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
XU Zhen. Flexible HVDC transmission system[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012.
- [17] 赵云驰, 王东海, 李京, 等. 二次循环冷却系统应用于滨海核电厂可行性分析[J]. 给水排水, 2012, 38(10): 67-70.
ZHAO Yunchi, WANG Donghai, LI Jing, et al. Feasibility analysis of secondary circulation cooling system applied to binhai nuclear power plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(10): 67-70.
- [18] 郭金川, 周敏, 孔志达, 等. 柔性直流换流站空气净距研究[J]. 南方能源建设, 2015(s1): 50-54.
GUO Jinchuan, ZHOU Min, KONG Zhida, et al. Study on air clearance of voltage source converter station[J]. Southern Energy Construction, 2015(s1): 50-54.
- [19] 付纪华, 刘军, 孙海涛, 等. 换流站阀冷却外风冷系统防冻设计策略及现场应急处理[J]. 陕西电力, 2013, 41(1): 79-82.
FU Jihua, LIU Jun, SUN Haitao, et al. Probe into anti-freezing design strategies & emergency treatments of outer air cooling in converter station valve cooling system[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(1): 79-82.
- [20] 张熠, 黄黎琴, 张弛. 大容量柔性直流换流站阀厅联合建筑结构选型及优化[J]. 福建建设科技, 2016(3): 13-16.
ZHANG Yi, HUANG Liqin, ZHANG Chi. Structure selection and optimization for valve hall joint building of large capacity flexible direct current converter station[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2016(3): 13-16.

王赞(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为局部放电检测和柔性直流输电关键技术。

(上接第 56 页)

- PAN Hu. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards[J]. Nuclear Hardening, 1998, 15(2): 73-78.
- [20] TESCHE F M, IANZO M V, KARLSSON T. EMC analysis methods and computational models[M]. New York, USA:

John Wiley and Sons Ltd., 1997: 428-440.

刘青(1978—), 女, 副教授, 从事电力系统电磁暂态分析方面的教学与科研工作。