

强电磁脉冲环境下典型一次设备耦合特性仿真

夏小飞¹, 刘磊², 俸波¹, 李斌², 祁沛晗², 黎大健¹, 冯瑞发², 张磊¹, 李敏², 潘锐健²

(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: 强电磁脉冲上升时间短, 场强峰值大, 通过与线缆的强耦合作用传播至电力设备, 对设备造成损伤。为探究强电磁脉冲与一次设备的耦合效应, 建立了强电磁脉冲传导环境, 搭建了氧化锌避雷器、玻璃绝缘子和配电变压器的等效电路模型, 通过仿真计算获得了强电磁脉冲环境下各设备端口电压和电流。结果表明, 强电磁脉冲耦合架空线产生的末端电压波形进入典型一次设备后, 在端口接保护电阻时避雷器、绝缘子和变压器的电压和电流仍为脉冲波形, 但是前沿变缓, 脉宽增大; 在无保护电阻时绝缘子串表面会在闪络后形成流注, 此时等效阻抗由容性转变为感性, 导致接地电流持续振荡, 发生闪络时电压、电流幅值迅速减小; 变压器端口电压和对地电流在不接入保护电阻时均为振荡波形, 并逐渐衰减为0。

关键词: 强电磁脉冲; 架空线耦合; 传导环境; 一次设备; 宽频等效电路

Simulation on Coupling Characteristics of Typical Primary Equipment in Strong Electromagnetic Pulse Environment

XIA Xiaofei¹, LIU Lei², FENG Bo¹, LI Bin², QI Ruihan², LI Dajian¹, FENG Ruifa², ZHANG Lei¹, LI Min², PAN Ruijian²

(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: A strong electromagnetic pulse (EMP) has a short rise time and high peak field strength, propagating to electrical equipment through strong coupling with cables, thereby causing damage. To investigate the coupling effect of strong EMPs on primary equipment, a conductive EMP environment is established, and equivalent circuit models for zinc oxide surge arresters, glass insulators, and distribution transformers are constructed. Through simulation, the port voltages and currents of each device under strong EMP conditions are obtained. The results indicate that when the terminal voltage waveform generated by the coupling of strong EMPs with overhead lines enters typical primary equipment, the voltages and currents of the surge arrester, insulator, and transformer remain as pulse waveforms when a protective resistor is connected at the port. However, the leading edge becomes slower, and the pulse width increases. Without a protective resistor, streamers form on the surface of the insulator string after flashover, causing the equivalent impedance to shift from capacitive to inductive, leading to sustained oscillations in the ground current. During flashover, the voltage and current amplitudes rapidly decrease. The transformer's port voltage and ground current without a protective resistor both exhibit oscillatory waveforms, gradually decaying to zero.

Key words: HEMP; overhead line coupling; conduction environment; primary equipment; broadband equivalent circuit

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U23B20132); 广西电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20210264)。

Foundation item: Supported by the Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (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)可覆盖百万平方公里的电磁信号,辐射场强度可达50 kV/m,瞬间瘫痪或摧毁地表各类通信指挥系统,造成电力传输网络断路^[1-3]。HEMP的E1成分,上升时间短,场强峰值大,可以通过孔缝、线缆等强耦合作用,与电力系统相耦合,在系统表面和电缆上产生感应电压和感应电流,对各种电子化设备和系统造成损伤^[4]。

近年来,国内外围绕强电磁脉冲对电力一次系统的耦合效应开展了设备级仿真计算和试验研究。其中,李妮等对HEMP耦合架空传输线进行了仿真,计算得架空线末端感应电压可达900 kV,电流达千安量级^[5]。另外,美国橡树岭国家实验室^[6]开展配电设备电磁脉冲效应试验,出现了套管击穿、避雷器阈值电压升高等现象。陈宇浩等搭建了10 kV电磁脉冲效应试验平台,开展了绝缘子耦合效应试验,其过电压达200 kV,造成绝缘子闪络^[7-8]。

强电磁脉冲^[9]对低压配电系统的危害最为严重,但目前对于一次设备的强电磁脉冲耦合效应仿真研究仍较少,有必要探究HEMP耦合架空线时末端响应对电气一次设备的影响。因此,本文针对典型一次设备建立了宽频等效电路模型,并基于强电磁脉冲耦合架空传输线产生的感应过电压,搭建了脉冲源注入电路模型,对一次设备耦合效应开展研究,预测各设备的响应特性,为后续开展一次设备耦合效应试验提供理论依据。

1 强电磁脉冲环境

1.1 强电磁脉冲波形

对HEMP电磁脉冲波形进行数学模拟,一般近似采用双指数模型。最常用的参数标准是IEC 61000-2-9标准^[10],其定义的HEMP电磁脉冲信号函数表达式为:

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

式中: $k=1.3$ 为修正系数; α 、 β 分别为脉冲前、后沿参数, $\alpha=4.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $\beta=6.0 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$; E_0 为脉冲峰值场强,典型值一般为50 kV/m。

双指数函数模拟的电场波形如图1所示,脉冲前沿为2.5 ns,脉冲半高宽为23 ns。

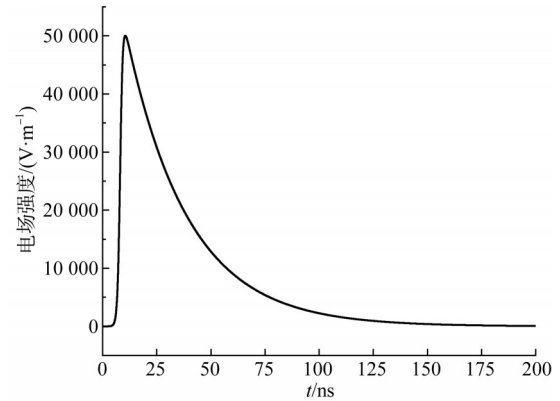


图1 HEMP电场波形

Fig. 1 Electric fields waveform of HEMP

在开展电磁脉冲效应研究时,对于HEMP的辐射特性可以从该脉冲波的拟合波形入手,用双指数函数来表示其时域波形,用平面波来简化其辐射的电磁波。

电力系统是一种广域分布式系统,HEMP对电力系统的影响主要通过与各设备或器件相连的电线电缆上耦合产生的感应电压或电流,传导进入设备端口损坏设备,进而对系统产生影响^[11]。IEC 61000-2-10标准^[12]中描述了理想情况下HEMP早期E1耦合架空线的传导环境,如表1所示。

表1 HEMP早期E1耦合架空线传导环境

Tab. 1 Early E1 coupled overhead line conduction environment of HEMP

参数	上升时间/ns	半高宽/ns	电流峰值/kA	源阻抗/ Ω
E1耦合架空线	10	100	4	400

结合工程实际,本文基于传输线理论^[13]仿真计算架空线端接匹配电阻时的耦合电压和电流,以建立强电磁脉冲耦合电力一次设备的传导环境。

1.2 架空线耦合效应仿真

一般传输线理论描述外部电磁场对传输线的耦合有3种模型: Taylor模型、Agrawal模型和Rachidi模型,这3种模型的表达形式不同,但求解的传输线效应结果是等效的^[14]。本文采用Taylor模型^[15]求解架空传输线末端的感应电压和感应电流,等效模型如图2所示。

图2中, $V_s(x)$ 为分布电压源, $I_s(x)$ 为分布电流源。 $Z(\omega)$ 为输电线单位长度阻抗参数, Z_1 、 Z_2 分别为线缆两端的负载阻抗, ω 为角频率, h 和 L 分别为传输线的架高和长度。

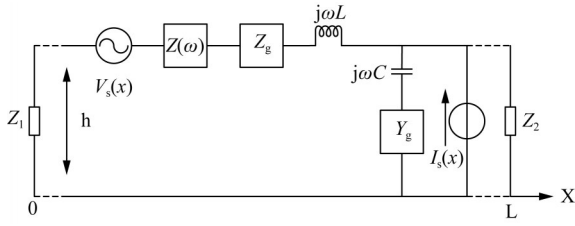


图2 Taylor传输线等效模型

Fig. 2 Equivalent model of Taylor transmission line

基于有耗大地条件下 Taylor 模型的传输电报方程，建立了计算线缆两端负载感应电压和电流的 BLT 方程^[16]，如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} V(0) \\ V(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \rho_1 & 0 \\ 0 & 1 + \rho_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\rho_1 & e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} & -\rho_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： ρ_1 、 ρ_2 分别为线缆两端的反射系数； $\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}$ 为源参数，表达式为：

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma x} [V_s(x) + Z_0 I_s(x)] dx \\ -\frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma(L-x)} [V_s(x) - Z_0 I_s(x)] dx \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： Z_0 为线缆特性阻抗， $Z_0 = \sqrt{Z/Y}$ ； γ 为传播常数， $\gamma = \sqrt{ZY}$ ； ρ_i 为反射系数， $\rho_i = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0}$ ， $i = 1, 2$ 。

在有大地损耗情况下，架空输电线缆的单位长度阻抗参数、导纳参数^[17]分别为：

$$Z(\omega) = Z_g + Z_w + j\omega L \quad (4)$$

$$Y(\omega) = \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{Y_g} \quad (5)$$

式中： Z_g 为大地阻抗参数； Z_w 为线缆内阻抗； L 为输电线缆的分布电感； C 为输电线缆的分布电容； Y_g 为大地导纳。

本文计算架高 6.5 m、导线半径 1 cm 的架空传输线匹配电阻为 430 Ω ，故设置 $Z_1 = Z_2 = 430 \Omega$ 。

根据图 3 中入射场激励的传输线模型，入射场代入式(1)参数为 $E(t) = 1.3E_0(e^{-4 \times 10^7 t} - e^{-6 \times 10^8 t})$ ，入射方位角 $\phi = 0^\circ$ ，极化角 $\alpha = 0^\circ$ ，大地电导率 $\sigma_r = 0.005 \text{ S/m}$ 、相对介电常数 $\epsilon_r = 10$ 、相对磁导率 $\mu_r = 1$ 。

电磁波入射仰角 ψ 决定了架空线缆处的电磁环境，在模型计算中是较为重要的变量^[5]，故当架空线长度为 1 000 m 时，改变入射场的仰角 ψ ，得到

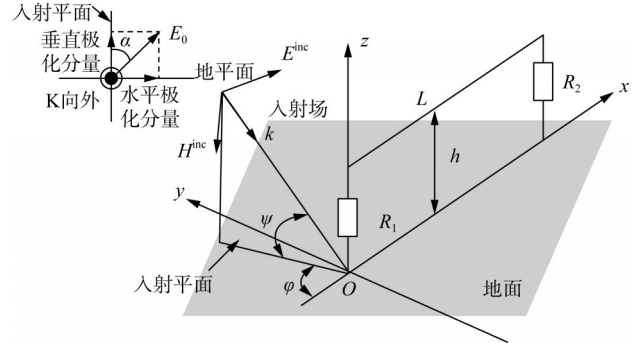


图3 入射场激励的传输线模型

Fig. 3 Transmission line model of incident field excitation

不同角度下线缆末端感应电压结果，如图 4 所示。

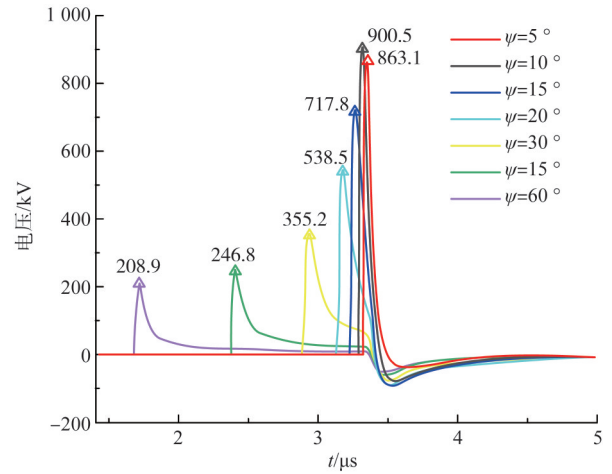


图4 不同仰角下 1 000 m 架空线末端感应电压

Fig. 4 Induced voltages at the end of 1 000 m overhead line at different elevation angles

由图 4 可得出，强电磁脉冲耦合架空线缆末端感应电压随入射场仰角的增加先增大后减小。耦合效应最严重的情况为 $\psi = 10^\circ$ 时，感应电压最大峰值达 900 kV。

除此之外，本文仿真计算了架空线在不同长度下的强电磁脉冲耦合响应，取最严重情况下的仰角 $\psi = 10^\circ$ ，感应电压结果如图 5 所示。

由图 5 可得，强电磁脉冲耦合架空线产生的感应电压随线缆长度的增加而增加，在长度达到一定值时，感应电压峰值将不再变化，达到饱和。此规律在已有文献中已被验证^[5, 17]。在本次仿真条件下，当线缆长度为 600 m 时线缆末端感应电压峰值基本不再变化，感应电压最大峰值为 900 kV，与前文结果一致。

除此之外，当架空线长度继续增加时，架空线

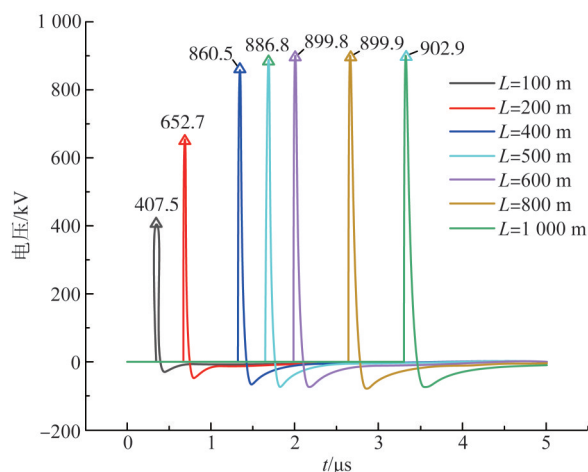


图5 不同长度架空线末端感应电压

Fig. 5 Induced voltages at the end of different lengths of overhead lines

末端耦合电压脉冲波形宽度也呈现相同的变化规律:先增大后基本保持不变,达到饱和。线长 $L=1000\text{ m}$, $\psi=10^\circ$ 时的架空线耦合电压波形如图6所示。

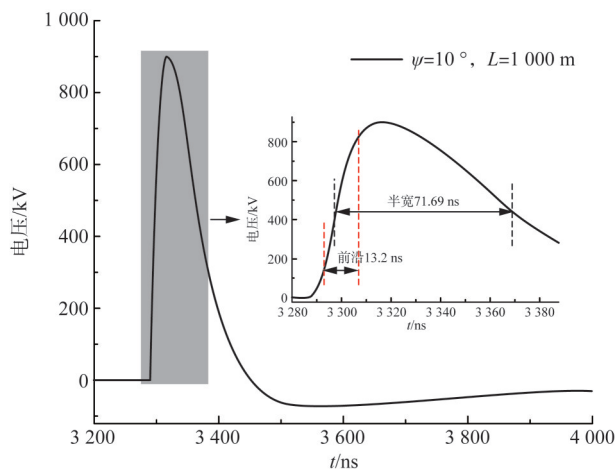


图6 典型情况下架空线末端感应电压

Fig. 6 Induced voltages at the end of overhead line under typical conditions

由图6可得,架空线末端感应电压峰值最大时的脉冲波形前沿为13.2 ns,脉冲宽度为71.69 ns。由于HEMP环境下脉冲上升速度快,高频分量丰富,传导至设备中响应迅速,脉冲峰值和前沿是较为重要的两个参数。因此,脉冲波形前沿与表1中架空线末端传导环境的脉冲电流前沿参数近似,半宽略小,基本符合标准中对传导环境的规定,验证了传输线理论计算架空线耦合结果的可行性。

2 典型一次设备电路仿真模型

避雷器作为过电压的主要保护装置,通过与被保护设备并联,使其他高压设备免受操作过电压和雷电过电压的危害,防止设备绝缘发生故障^[18];绝缘子作为架空输电线路的主要绝缘体,其性能优劣将直接影响到整条线路的安全运行;配电变压器通常安装在室外,且与架空线缆直接相连,更容易受到强电磁脉冲环境的影响。因此,本文建立了避雷器、绝缘子和变压器的等效电路模型,并计算其等效结构参数。在设备端口设置脉冲源进行设备耦合效应仿真,测量各设备与强电磁脉冲耦合产生的感应电压和电流。

2.1 避雷器

本文以10 kV金属氧化物避雷器为参考依据,建立其等效电路模型,并采用有限元法计算等效结构电容参数。避雷器的具体型号为HY5WZ-17/45,整体高度为190 mm,最外侧伞裙直径为105 mm,一般用于变电站系统。避雷器的基本技术参数如表2所示。

表2 金属氧化物避雷器技术参数

Tab. 2 Technical parameters of metal zinc oxide arrester

型号	额定电压/ kV	持续运行 电压/kV	直流1mA参 考电压/kV	8/20雷电冲击电 流残压峰值/kV
HY5WZ-17/45	17	13.6	24.0	45.0

为简化氧化锌避雷器的非线性部分,采用时控开关 S_1 表征避雷器上产生过电压动作时的电阻变化过程,电阻并联电容结构表征避雷器的等效模型。图7为避雷器耦合效应仿真电路,虚线框部分即为避雷器等效电路模型, R_p 为保护电阻和脉冲源。

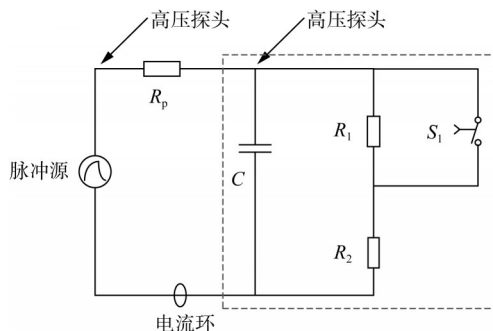


图7 避雷器耦合效应仿真电路

Fig. 7 Arrester coupling effect simulation circuit

根据该避雷器的伏安特性曲线,可将其近似为分段线性函数^[19],故可采用两个电阻来表示避雷器动作前后的电阻值,并采用时控开关来模拟避雷器动作过程。正常情况下避雷器中的氧化锌阀片呈高阻状态,避雷器等效电阻值一般为 $R_1 + R_2 = 1\text{ M}\Omega$ 。当避雷器动作,开关S1闭合时根据该避雷器的伏安特性曲线^[20],等效电阻迅速下降至 $R_2 = 200\text{ }\Omega$,测量避雷器两端的电压和接地电流。

避雷器等效电路中的电容 C 为避雷器的结构电容。本文建立避雷器的等比例三维模型,其整体结构由环氧管、氧化锌阀片、绝缘筒和硅橡胶伞裙等结构组成:环氧管位于氧化锌阀片内部,阀片外部由绝缘筒包围,外层为复合硅橡胶护套,最外侧伞裙直径为105 mm,避雷器上下两端为金具,起连接作用,避雷器整体高度为190 mm。设置避雷器三维模型中各组件的材料并确定其电气参数:相对介电常数、电导率、导热系数、恒压热容以及密度等。为其设置静电场,采用有限元法进行网格划分,当终端加载1 V电压时,计算等效结构电容 $C = 79.8\text{ pF}$,其数量级在合理范围内^[21]。在计算结束后,得到避雷器仿真模型的电场强度分布和电场方向如图8所示。其中红色箭头表示电场方向,模型中电场沿轴向变化,符合实际情况。

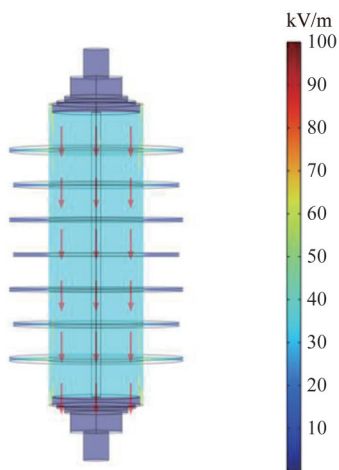


图 8 氧化锌避雷器模型电场强度分布及电场方向
Fig. 8 Electric field intensities distribution and electric field direction of zinc oxide arrester model

2.2 绝缘子

本文针对悬式玻璃绝缘子建立等效电路模型,采用有限元法计算其等效电容参数,依据型号为

LXP-70 的玻璃绝缘子,其基本技术参数如表 3 所示。

表 3 玻璃绝缘子技术参数

Tab. 3 Technical parameters of glass insulator

型号	结构高度/mm	公称直径/mm	公称爬电距离/mm	工频耐受/击穿电压/kV	雷电冲击耐受电压/kV
LXP-70	146	255	320	40/130	100

玻璃绝缘子的结构较为简单,其等效电路可由电容并联电阻来表示。图9为单片绝缘子耦合效应仿真电路图^[22-23],虚线框内为单片绝缘子等效电路结构, R_p 为保护电阻。

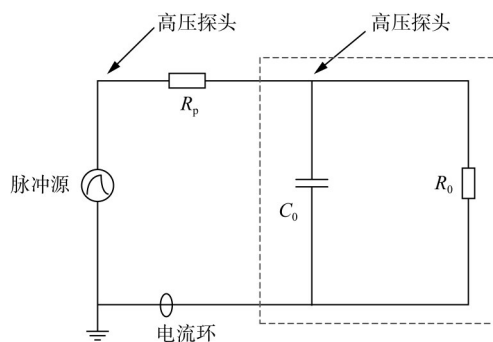


图 9 单片绝缘子耦合效应仿真电路

Fig. 9 Single insulator coupling effect simulation circuit

图10为绝缘子串耦合效应仿真电路。

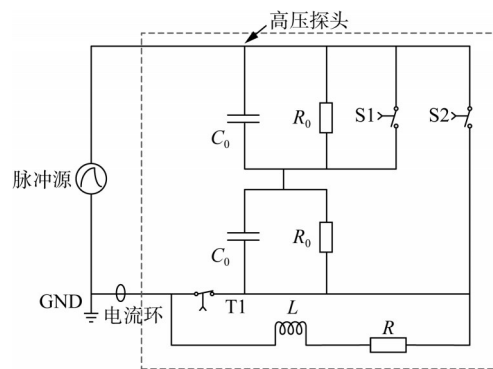


图 10 绝缘子串耦合效应仿真电路

Fig. 10 Simulation circuit of insulator string coupling effect

图10中电阻为绝缘子的等值电阻,根据工程实际经验,干燥洁净的绝缘子电阻可达 $2\text{ }400\text{ M}\Omega$ ^[22]。等效电路中的电容为绝缘子本身的电容和绝缘子对地电容之和,一般绝缘子对地电容为 $4\sim 5\text{ pF}$,对导线的电容为 $0.5\sim 1\text{ pF}$,可忽略^[24]。

绝缘子自身的结构电容需要建立仿真模型进行计算,单片玻璃绝缘子由玻璃主体、钢脚、钢帽和

混凝土组成。其中, 绝缘子的钢帽和钢脚为铸铁材料, 确定铸铁、玻璃等材料的电气参数: 相对介电常数、电导率、导热系数、恒压热容, 以及材料本身的密度(kg/m^3)等。为其设置静电场环境, 采用有限元方法进行网格划分, 当终端加载 1 V 电压时, 计算单个玻璃绝缘子等效结构电容为 6.5 pF, 故本文绝缘子等效电路中电容取值为 6.5 pF, 其数量级在合理范围内^[22, 24-25]。在计算结束后, 得到玻璃绝缘子仿真模型的电场密度分布和电场方向如图 11 所示。其中红色箭头为电场方向, 由外部导体指向内部导体, 符合实际情况。

当绝缘子连接构成绝缘子串时, 其等效电路模型可进行并联, 可以忽略绝缘子与杆塔、高压导线之间的杂散电容, 得到图 10 所示虚线框内的绝缘子串等效结构^[24]。在图 10 中, 仿真电路中采用延时闭合开关将绝缘子等效模型短路, 模拟绝缘子闪络过程, 并由延时断开开关将电路结构断开, 导通由电感串联残余电阻组成的流注通道模型。电感 L 和电阻 R 采用经验值。

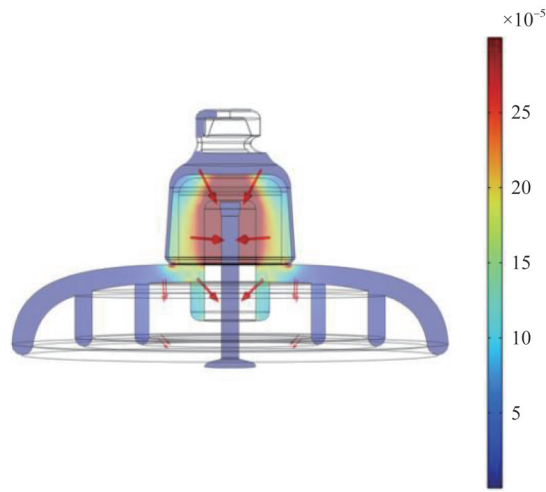


图 11 玻璃绝缘子模型电场分布密度及电场方向
Fig. 11 Electric field distribution densities and electric field directions of the glass insulator model

2.3 变压器

本文根据典型油浸式配电变压器建立其单相等值电路模型, 参考变压器型号为 SBH15-M-50/10, 连接组别为 Dyn11, 其主要技术参数如表 4 所示。

本文在研究强电磁脉冲耦合变压器所产生的效应时, 只考虑变压器的端口电压和对地电流, 而不考虑其内部绕组匝间的具体情况, 所以将变压器的

表 4 配电变压器技术参数

Tab. 4 Technical parameters of distribution transformer

型号	SBH15-M-50/10
参数	数值
额定容量/kVA	50
空载损耗/W	43
负载损耗/W	870
空载电流/%	1.3
阻抗电压/%	4
雷电冲击耐受电压/kV	75
短时工频耐受电压/kV	35

等值电路简化为集总参数电路。图 12 为配电变压器耦合效应仿真电路图^[26-27], 虚线框内为变压器单相等效电路结构, R_p 为保护电阻。

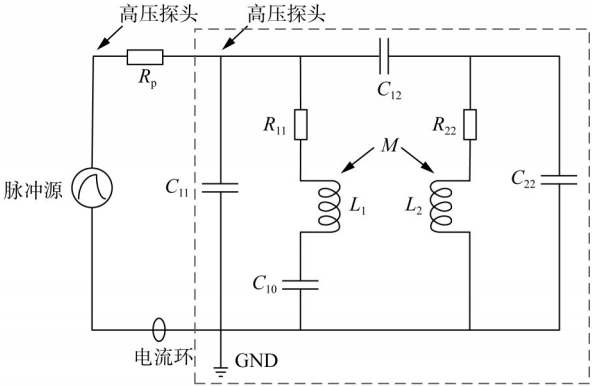


图 12 配电变压器耦合效应仿真电路

Fig. 12 Distribution transformer coupling effect simulation circuit

在变压器等效电路模型中, 电阻 R_{11} 、 R_{22} 和电感 L_1 、 L_2 分别为高、低压绕组的等效电阻和电感; M 为绕组间的耦合系数, 代表零序电感; C_{12} 为高低压绕组间的电容; C_{11} 、 C_{22} 分别为高、低压绕组对地电容; C_{10} 为铁心对地电容。

变压器等效电路结构参数参考典型油浸式配电变压器试验测量的结果^[16, 26-27], 各个参数取值如表 5 所示。

变压器模型等效二端口网络的散射参数可以反映变压器的传输特性, 进而判断模型是否等效。散

表 5 变压器等效电路结构参数

Tab. 5 Parameters of transformer equivalent circuit structure

参数	M/H	L_1/H	L_2/mH	C_{11}/pF
取值	0.022	0.643	1.03	149.5
参数	C_{12}/pF	C_{22}/pF	C_{10}/pF	
取值	278.5	335	428	

射参数也称为 S 参数,是建立在入射波、反射波关系基础上的网络参数^[28]。为验证变压器宽频模型可行性,本文采用测量变压器二端口网络的散射参数,表征其传输特性。本文搭建仿真测试电路测量变压器的散射参数如图 13 所示。

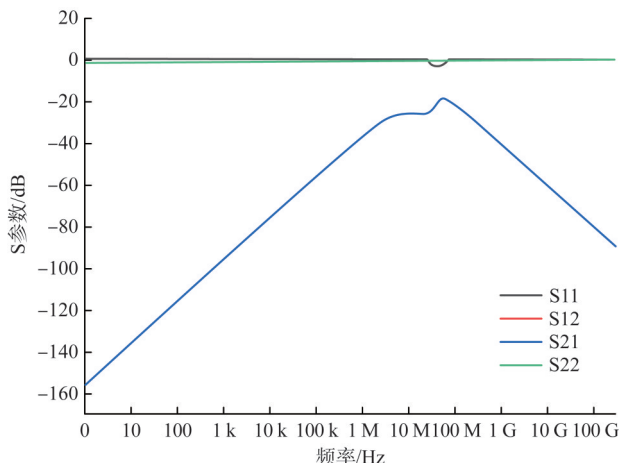


图 13 变压器的散射参数

Fig. 13 Scattering parameters of transformer

上述 S 参数仿真结果表征了变压器在不同频率范围内的传输特性,参数 S_{11} 、 S_{22} 为脉冲波形经变压器传输过程中的损耗,参数 S_{12} 、 S_{21} 为二端口网络的传输增益。变压器散射参数的变化情况反映了变压器的传输特性随频率不断变化,验证了变压器电路模型的频率相关性。将图 13 散射参数与文献中实验测量实际变压器的散射参数结果进行对比,符合实际变压器的传输特性^[29],验证了变压器宽频模型的可行性。

3 典型设备耦合效应结果分析

基于第 2 节各设备耦合效应仿真电路结构设置脉冲源参数,测量脉冲源输出电压和各设备端口耦合电压及对地电流,并对结果进行分析。

3.1 脉冲源

基于图 6 中仿真得到的最严重情况下的架空线末端传导环境,设置仿真电路中脉冲源相关参数,可输出前沿小于 10 ns,半宽 250 ns 左右,峰值 880 kV 的电压脉冲,如图 14 所示。脉冲源输出电压峰值和前沿与图 6 中波形参数基本一致,将此脉冲作为一次设备耦合效应仿真的脉冲源。

3.2 避雷器

在图 7 的仿真电路中加入保护电阻 $R_p=0$,与架

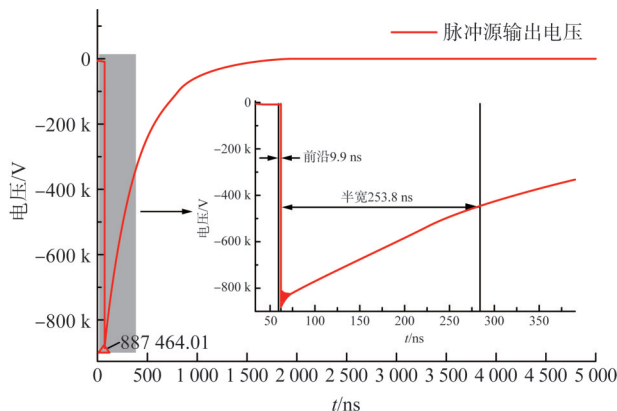
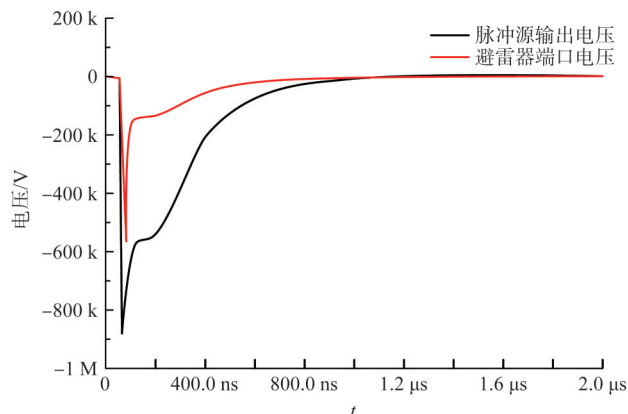


图 14 脉冲源输出电压波形

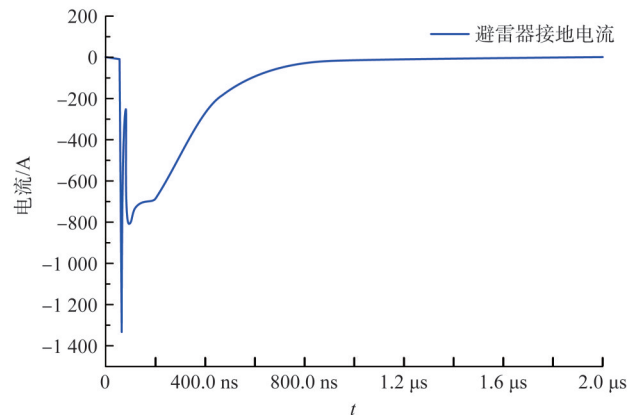
Fig. 14 Output voltage waveform of pulse source

空线匹配电阻相一致,起到限制短路电流的作用。设置避雷器的动作电压在 600 kV,开关 S1 闭合,测得的脉冲源输出电压、避雷器端口电压和避雷器接地电流结果如图 15 所示。

由图 15 可以看出,避雷器端口的过冲峰值达



(a) 脉冲源和避雷器电压波形



(b) 避雷器对地电流波形

图 15 避雷器耦合效应仿真结果

Fig. 15 Simulation results of coupling effect of arrester

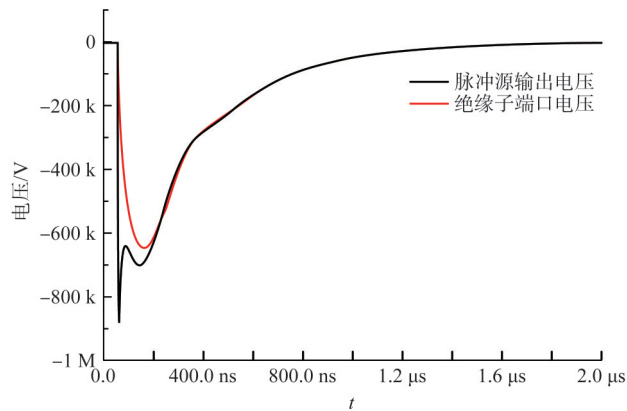
600 kV时动作,其对应的时间为75 ns,避雷器两端电压迅速降低,接地电流迅速减小后增大,最后缓慢降为0,其波形变化趋势与相关试验和仿真研究结果一致^[20, 30]。

电压、电流结果与等效电路模型的参数有关,75 ns时电阻值迅速下降,分压迅速减小,电压幅值也迅速降低,同时泄放电流,动作后的残压峰值接近200 kV,是雷电冲击残压峰值的4~5倍,可能对避雷器内部造成损伤。

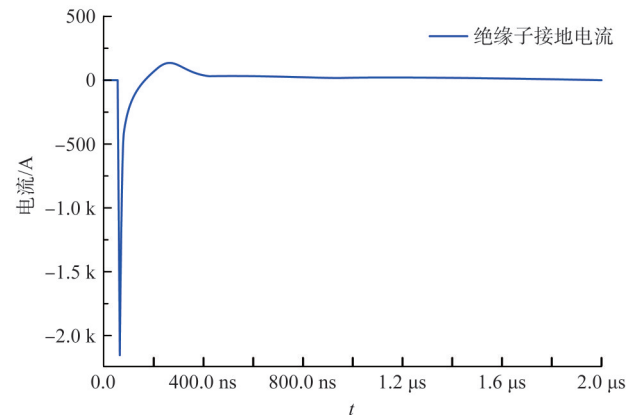
在仿真过程中,并联电容和电阻的取值不同时呈现出规律性:并联电容越小,等效模型的容抗越大,则避雷器两端过冲峰值也越大(与击穿时间也有关)。避雷器动作后等效电阻越大,避雷器两端分压越大。

3.3 绝缘子

在图9所示的单片绝缘子耦合效应仿真时保护电阻 $R_p = 430 \Omega$ 。测量脉冲源输出电压、绝缘子端口电压和流过绝缘子的电流如图16所示。



(a) 脉冲源和绝缘子电压波形



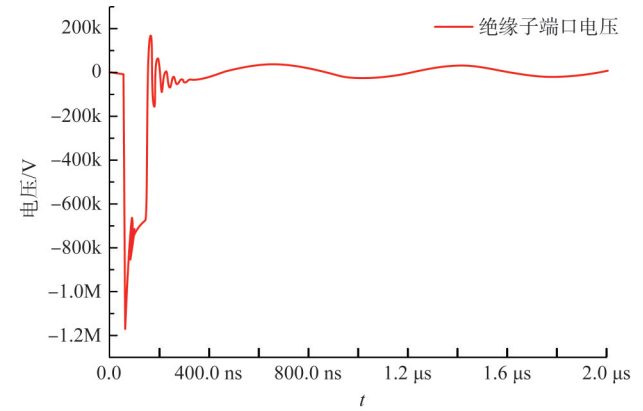
(b) 绝缘子对地电流波形

图16 绝缘子耦合效应仿真结果

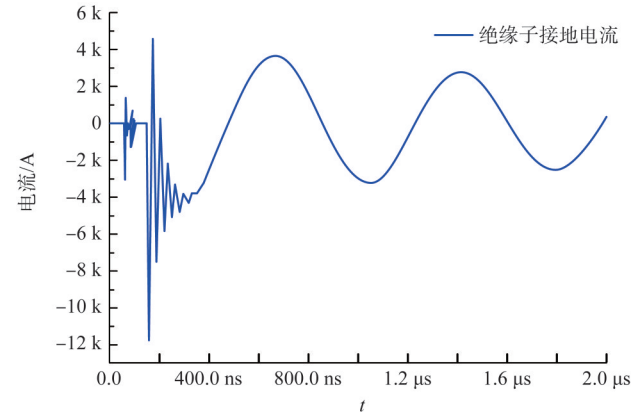
Fig. 16 Simulation results of insulator coupling effect

单片绝缘子耦合时绝缘子端电压与脉冲源输出电压变化趋势基本一致,保护电阻的存在,使到达绝缘子端口的脉冲前沿变缓,峰值减小,但其脉冲峰值达到600 kV,是雷电冲击耐受电压的6倍,也会导致绝缘子发生闪络或设备损伤。流过绝缘子的电流出现一个过冲峰值后减小,脉冲峰值为2 kA,与脉冲源输出电流峰值一致。仿真得到的波形变化趋势与相关试验研究结果一致^[31]。

当两个玻璃绝缘子串联时,采用图11的仿真电路,未添加保护电阻。绝缘子放电时延定义为从冲击电压作用于绝缘子开始,到绝缘子发生闪络的时间,同时也是强电磁脉冲冲击电压作用于绝缘子后端电气设备的持续时间。相关研究表明:强电磁脉冲环境下绝缘子放电时延变动范围为几十纳秒^[27]。故在仿真过程中,设置75 ns时一个玻璃绝缘子闪络,开关S1闭合;140 ns时绝缘子串全部闪络,开关S2闭合,T1断开。测得的绝缘子端口电压和对地电流结果如图17所示。



(a) 绝缘子串端口电压波形



(b) 绝缘子串对地电流波形

图17 绝缘子串耦合效应仿真结果

Fig. 17 Simulation results of insulator string coupling effect

由图 17 可以看出, 绝缘子闪络前电压峰值较大, 可达 1 200 kV。在 75 ns 时发生部分闪络后绝缘子端电压小幅减小; 在 140 ns 绝缘子串全部闪络后绝缘子端电压迅速减小至 200 kV, 并衰减振荡直至电压为 0。绝缘子对地电流波形在绝缘子未闪络时电流峰值为 3 kA 并逐渐减小, 140 ns 闪络后电流幅值迅速增大, 出现过冲峰值达 12 kA, 稳定后不断振荡, 其波形变化趋势与相关试验研究结果一致^[7]。

在仿真中设置绝缘子闪络过程, 使电路模型的结构和参数发生变化, 进而引起感应电压和电流波形的阻尼振荡。结合实际情况, 绝缘子闪络之后会形成流注通道, 电路模型的等效阻抗由容性变为感性, 故电流波形持续振荡。在仿真中发现, 绝缘子电压、电流振荡频率和幅值与闪络后的等效电阻值有关, 电阻越小振荡频率越高, 对设备损伤越大。

3.4 变压器

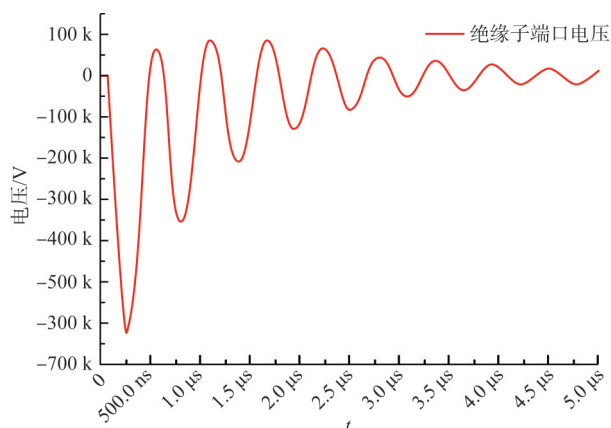
本节对于变压器耦合效应仿真分为两种情况, 变压器无保护电阻和入口处采用 430 Ω 保护电阻。当图 12 仿真电路中保护电阻 $R_p = 0$ 时测得的变压器一次侧端口电压和对地电流如图 18 所示。

当脉冲电压直接传导进入变压器, 其端电压和接地电流与变压器等效电路模型的结构和参数有关。图 18 为电压脉冲直接注入变压器等效电路的示意图, 其等效电路模型中主要是电感、电容元件, 反映变压器内部结构, 构成振荡电路, 故变压器端口电压和接地电流为振荡波形, 并不断衰减, 波形的整体趋势仍为脉冲波形。

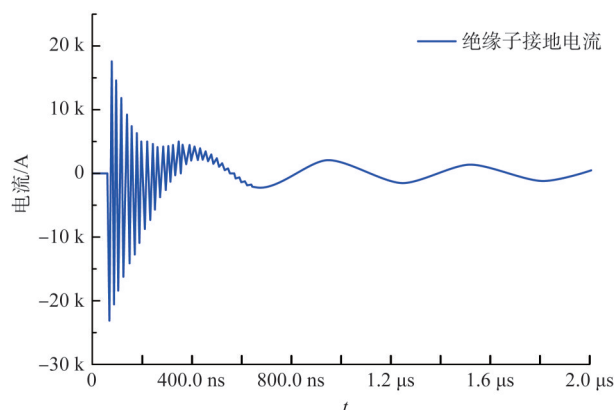
由图 18 可以看出, 在没有保护电阻时变压器端口电压幅值最高达 600 kV, 是雷电耐受冲击电压的 8 倍。接地电流过冲峰值达到 20 kA, 高频振荡和过高的电压电流可能会对变压器内部产生较大损伤。

当图 12 仿真电路中设置保护电阻 $R_p = 430 \Omega$ 时仿真得到的脉冲源输出电压、变压器一次侧端口电压和变压器对地电流如图 19 所示。

当脉冲电压经过保护电阻进入变压器等效电路模型中, 电阻的存在削弱了脉冲电压峰值, 同时也改变了电路结构, 使振荡电路的阻尼系数发生变化, 得到的端口电压和接地电流波形不再产生振荡, 而是使脉冲波形前沿变缓, 脉宽增大。其波形变化趋势与相关试验研究结果一致^[7]。



(a) 变压器端口电压波形



(b) 变压器接地电流波形

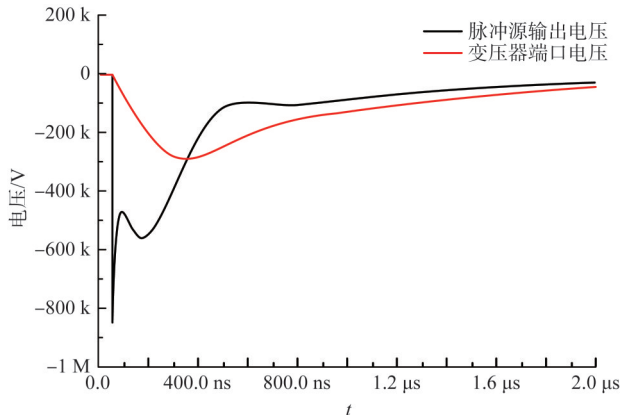
图 18 变压器耦合效应仿真结果 ($R_p=0$)

Fig. 18 Simulation results of transformer coupling effect ($R_p=0$)

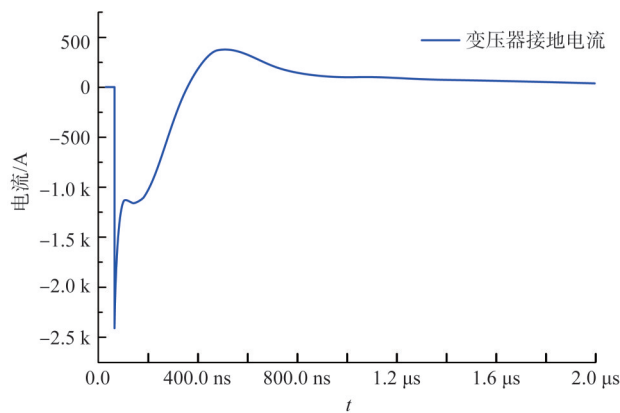
由图 19 可以看出, 在添加保护电阻后脉冲电压对变压器的冲击减弱, 脉冲源输出电压波形发生畸变, 变压器端口电压波形前沿时间为脉冲源输出电压波形的近 10 倍, 脉冲宽度约为 4 倍左右, 且电压峰值为 300 kV 左右。变压器接地电流为短脉冲, 峰值为 2.5 kA, 与脉冲源输出电流相比脉宽更窄, 且波形发生畸变。

4 结论

本文建立了氧化锌避雷器、玻璃绝缘子和配电变压器的等效电路模型, 将其作为架空线末端的输出负载, 对强电磁脉冲环境下典型一次设备的耦合响应特性开展了仿真研究, 测量了各设备端口电压和对地电流, 其波形相对于架空线末端传导环境输出的脉冲波形都产生不同程度的畸变, 为后续开展一次设备耦合效应试验提供理论依据。本文得出结论如下。



(a) 脉冲源和变压器输出电压波形



(b) 变压器接地电流波形

图 19 变压器耦合效应仿真结果 ($R_p=430 \Omega$)Fig. 19 Simulation results of transformer coupling effect ($R_p=430 \Omega$)

1)根据传输线模型计算了架空线末端的传导环境。结果表明:强电磁脉冲耦合架空线末端感应电压和电流峰值会随入射场仰角的增加而减小,随着线缆长度的增加而先增大后保持不变。对于架高 6.5 m 的传输线,当入射方位角 $\phi=0^\circ$,极化角 $\alpha=0^\circ$,入射仰角 $\psi=10^\circ$,线长大于 600 m 时架空线耦合电压的最大峰值达 900 kV。

2)考虑氧化锌避雷器的非线性特性,强电磁脉冲耦合至避雷器,产生感应过电压,使避雷器动作,其电阻迅速减小,避雷器端口电压降低,但动作后的残压峰值接近 200 kV,是雷电冲击残压峰值的 4~5 倍,可能对避雷器内部产生损伤。

3)在有保护电阻时,单片绝缘子的感应电压和电流脉冲波形前沿变缓,但脉冲峰值达到 600 kV。考虑绝缘子串的闪络过程,在闪络瞬间等效电路的结构和参数被改变,出现端口电压和对地电流的减

小,并发生振荡;闪络后电压幅值达 200 kV,并振荡衰减;电路模型中考虑流注通道,电流持续。

4)考虑变压器绕组对地和绕组间的耦合关系,在有保护电阻时变压器端口电压和对地电流波形发生前沿和脉宽的变化,电压波形前沿变缓约 10 倍,脉宽增大 4 倍左右。在无保护电阻时变压器端口产生电压幅值最高达 600 kV,是雷电耐受冲击电压的 8 倍,并不断振荡、衰减,对实际变压器可能产生较大损伤。

参考文献

- [1] KRAMER D. US electricity grid still vulnerable to electromagnetic pulses [J]. *Physics Today*, 2009, 62(9): 24-25.
- [2] GILES J C, PRATHER W D. Worldwide high-altitude nuclear electromagnetic pulse simulators [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 475-483.
- [3] 雷涛,刘磊,黄远宽,等.屏蔽多芯线缆在 HEMP 环境下耦合特性的仿真与实验[J]. *南方电网技术*, 2026, 20(3): 32-39. LEI Tao, LIU Lei, HUANG Yuankuan, et al. Simulation and experiment of coupling characteristics of shielded multi-core cable in HEMP environment [J]. *Southern Power System Technology*, 2026, 20(3): 32-39.
- [4] 王湃. 高空核爆电磁脉冲对线缆的耦合效应研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
- [5] 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.
- [6] MILLER D B, LUX A E, GRZYBOWSKI S, et al. The effects of steep-front, short-duration impulses on power distribution components [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1990, 5(2): 708-715.
- [7] 陈宇浩,王宗扬,王禹博,等.10 kV 配电变压器高空电磁脉冲效应实验研究[J]. *高电压技术*, 2023, 49(7): 3119-3124. CHEN Yuhao, WANG Zongyang, WANG Yubo, et al. Effect experiments of 10 kV distribution transformer excited by high-altitude electromagnetic pulse [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(7): 3119-3124.
- [8] CHEN Y, XIE Y, ZHANG D, et al. 10 kV transmission line experimental platform for hemp immunity test of electrical equipment in operation [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(2): 1034-1040.
- [9] 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): 6924-6933. 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): 6924-6933.
- [10] IEC. Electromagnetic-compatibility (EMC) part-2: environment section 9: description of hemp environment radiated

- disturbance basic EMC: IEC 61000-2-10—2021 [S]. Geneva: IEC, 2021.
- [11] 秦锋, 陈伟, 毛从光, 等. 电力系统高空电磁脉冲效应研究综述[J]. 现代应用物理, 2023, 14(3): 16–31.
- QIN Feng, CHEN Wei, MAO Congguang, et al. Review of high altitude electromagnetic pulse effects on power system[J]. Modern Applied Physics, 2023, 14(3): 16–31.
- [12] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC) part 2: environment section 10: description of hemp environment radiated disturbance basic EMC: IEC 61000-2-10—2021 [S]. Geneva: IEC, 2021.
- [13] 王宝和. 电磁拓扑中BLT方程的建立及应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [14] 胡一乔. 高空核爆电磁脉冲下变电站的易损性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [15] 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.
- [16] FREDERICK M T, MICHEL V L. EMC 分析方法与计算模型 [M]. 吕英华, 王旭莹, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [17] XIE H, DU T, ZHANG M, 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.
- [18] 李玉诗. 动车组高压系统过电压分布及防护研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [19] MARTINEZ J A, DURBAK D W. Parameter determination for modeling systems transients-part V: surge arresters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2073–2078.
- [20] 秦锋, 陈伟, 王旭桐, 等. 强电磁脉冲下金属氧化物避雷器瞬态响应特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3326–3333.
- QIN Feng, CHEN Wei, WANG Xutong, et al. Transient response characteristics of metal oxide arrester under strong electromagnetic pulse[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3326–3333.
- [21] 任佳艺. 高次谐波下动车组避雷器劣化机理与优化方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [22] 陈瑶. ± 800 kV 直流输电线路劣化绝缘子带电检测装置的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [23] 初金良, 朱利锋, 高磊, 等. 谐波导致复合绝缘子不明闪络机理研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(4): 207–213.
- CHU Jinliang, ZHU Lifeng, GAO Lei, et al. Unexplained flashover of composite insulator caused by harmonic wave[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4): 207–213.
- [24] 黄韬, 文远芳, 文康珍, 等. 基于电路等效变换的绝缘子串电压分布研究[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 29–34.
- HUANG Tao, WEN Yuanfang, WEN Kangzhen, et al. Study on voltage distribution along insulator strings of EHV/UHV AC transmission line based on circuit equivalent transformation[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 29–34.
- [25] 吕健双, 文远芳, 文康珍, 等. 单片绝缘子泄漏电流阻容分量研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(5): 135–138, 122.
- LÜ Jianshuang, WEN Yuanfang, WEN Kangzhen, et al. Study on voltage distribution along insulator of EHV/UHV AC transmission line based on circuit equivalent transformation[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(5): 135–138.
- [26] 周璧华, 陈彬, 石立华. 电磁脉冲及工程防护 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [27] 张嘉祥. 变压器线圈波过程 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [28] 何银川, 张健穹, 王庆峰, 等. 变压器宽频传递特性建模方法研究[J]. 高压电器, 2026, 62(1): 79–87.
- HE Yinchuan, ZHANG Jianqiong, WANG Qingfeng, et al. Research on modeling method for broadband transmission characteristics of transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(1): 79–87.
- [29] WU Z J, LIAO N, CUI G Z. Pspice/spice simulation of mtl terminated in frequency dependent loads [C]//2009 International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics (ICMTCE 2009), November 3–6, 2009, Beijing, China. UK: IET, 2009: 426–429.
- [30] DONG N, XIE Y Z, WU Y, et al. An equation-based dynamic nonlinear model of metal-oxide arrester and its spice implementation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023, 70(8): 2919–2923.
- [31] 秦锋, 王旭桐, 陈伟, 等. 强电磁脉冲下线路绝缘子闪络特性试验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3640–3650.
- QIN Feng, WANG Xutong, CHEN Wei, et al. Experimental study on flashover characteristics of line insulator under strong electromagnetic pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3640–3650.

收稿日期: 2024-05-06; 网络首发日期: 2025-03-24

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, 从事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。