

MOA 冲击电流模型的建模仿真及试验研究

姚亚鹏¹, 刘崇新¹, 庄建煌²

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049;
2. 国网福建省电力有限公司莆田供电公司, 福建 莆田 351100)

摘要:为保证金属氧化物避雷器(metal oxide arrester, MOA)的质量,在出厂试验或验收试验等中常采用冲击电流发生器模拟雷电流来检验设备耐受冲击电流稳定的能力。仿真分析中直接采用雷电流函数模型代替冲击电流回路来研究 MOA 的非线性特性,忽略了电流波形差异对负载特性的影响。文中介绍了雷电流模型的研究现状,分析了冲击电流发生回路与常用雷电流模型的基础理论,选取双指数函数模型、Heidler 函数模型、脉冲函数模型,并基于 MATLAB/Simulink 搭建仿真电路,结合试验数据进行仿真分析,给出了 ATP-EMTP 软件中常用模型的波形参数。研究结果可为后续 MOA 在特快速瞬态过电压的特性研究、电路模型仿真分析及防雷研究提供参考。

关键词:金属氧化物避雷器;冲击电流发生器;雷电流模型;ATP-EMTP

中图分类号:TM833

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)05-0050-06

0 引言

金属氧化物避雷器(metal oxide arrester, MOA)的电气性能优异,是限制雷电过电压、操作过电压和保护其他的电气设备免受过电压损害的重要设备^[1-6],在电力系统过电压防护中应用十分广泛。在 MOA 投入使用前对其进行出厂试验或验收试验时,须采用产生指数波的冲击电流发生器对 MOA 进行冲击残压试验来模拟雷电流对保护设备的破坏作用,检验电气设备耐受冲击电流的稳定性。仿真过程中,正确有效地建立雷电流模型对 MOA 的特性分析和模拟计算的准确性具有重要意义。

雷电流波形具有偶然性、随机性和不规则等特点,长期大量研究得出雷电流共有特征为大部分的雷电流都是短时电流,且大部分短时雷电流的形式是单极性脉冲等。结合前人观测数据,通过实验等方式,多种雷电流模型被提出^[7-14]。1941年, Bruce 和 Golde 提出了双指数模型^[7],这是首次被提出的雷电流模型,也是目前应用较为广泛的模型,但该函数表达式中参数物理意义不明确,且在 $t=0$ 时没有连续可导的一阶导数。为避免在 $t=0$ 时刻导数的不连续性,很多学者针对 Bruce 提出的双指数模型进行了修正, Jones, Gardner 和 Raicic 等人先后提出了多种修正函数^[8,10],但由于参数计算复杂度及雷电流特征量的差异使其在工程应用中不是很广泛。1969年, Uman 和 Mclain^[9]提出了传输线模型;

1985年, Heidler 提出了新的函数模型并对模型参数确定^[10]进行了分析;1987年, Rakov 和 Dulzon 对 TL 模型进行了修正提出了 MTL 模型;之后, Nucci 等人对 TL 模型修正提出了 MTLE 模型;1995年国际电工委员会在 IEC 62305-1 文件^[11]中规定 Heidler 函数为仿真雷电流的模型。1998年, Rokov 和 Uman^[12]将当前雷电流模型分为4类,并对4类模型做了详细定义和阐述;2000年, Rouzbeh Moini 等人^[13]基于天线理论提出 AT 模型,与已有的多种模型进行了对比分析,所得波形变化规律与观测数据相符。2002年, 张飞舟和刘尚合学者^[16]针对闪电回击电磁场提出了一种新的脉冲函数模型;2009年, Rokov 等人对雷电研究及防护进行了总结分析^[15],从雷电放电观测、雷电放电模型、雷电发生特性/雷电定位系统、雷电电磁脉冲、雷电感效应及防护等5个方面进行了较为详细的分析研究。2011年, Javor 和 Rancic^[14]提出了一种新的雷电回击基电流函数(new channel-base current, NCBC)模型,输出波形与国际标准 IEC 62305-1 相符。2015年, Andreotti 和 Verolino^[17]提出了新的基电流分段函数模型,满足标准雷电流波形主要特性。

国内外关于雷电分析的研究成果较为丰硕,由于以上雷电流函数模型有确切的表达式,即输出波形不受负载非线性影响,而在 MOA 实际冲击电流试验中,采用的冲击电流发生装置需要根据负载情况适当调节回路参数以产生满足工程需要的波形,在仿真分析中直接采用雷电流函数模型代替冲击电流回路来研究 MOA 的非线性特性,忽略了电流波形的差异对负载特性的影响。文中主要针对

收稿日期:2018-05-07;修回日期:2018-06-14

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51521065)

MOA 冲击试验中冲击电流装置冲击电流模型进行分析,选取了 3 种常用的雷电流函数模型,分析了冲击电流发生回路与上述雷电流模型的基础理论,在 ATP-EMTP 及 MATLAB/Simulink 软件中搭建冲击试验回路,结合试验数据进行仿真分析。仿真结果表明,选取不同的雷电流函数模型会对仿真结果造成明显的差异,雷电流对负载特性的影响不容忽视。

1 雷电流模型

1.1 双指数函数模型

双指数函数 (double-exponential function, DEXP) 模型作为首次被提出的雷电流模型,应用较为广泛,其函数表达式如下。

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中: I_0 为电流峰值; α, β 分别为决定上升时间和衰减时间及电流最大陡度的时间常数; $\eta = e^{-\alpha T_m} - e^{-\beta T_m}$ 表示峰值修正系数,其中 T_m 为峰值时间,可通过对函数求一阶导数得出, $T_m = \ln(\beta/\alpha)/(\beta - \alpha)$ 。将电流幅值的 50% 时对应的时间 T_{50} 代入式(1),有 $I_m/2 = I_0/\eta (e^{-\alpha T_{50}} - e^{-\beta T_{50}})$ 。由此可知,由特定的参数 I_0, α, β 可绘制出相应的电流波形图,并得到对应的波形参数。

1.2 Heidler 函数模型

Heidler 所提雷电电流函数表达式如下^[10,18]。

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \left[\frac{(t/\tau_1)^n}{(t/\tau_1)^n + 1} \right] e^{-t/\tau_2} \quad (2)$$

式中: I_0, τ_1, τ_2 和 n 为可调节参数, τ_1, τ_2 分别为上升时间和衰减时间常数; n 为电流陡度系数, $\eta = e^{-\tau_1/\tau_2(n\tau_2/\tau_1)^{1/(n+1)}}$ 表示峰值修正系数。

1.3 脉冲函数模型

采用函数-脉冲函数模型 (pulse function) 来表示闪电回击电流,可以避免双指数函数在 $t=0$ 时刻一阶导数过大且不连续及 Heidler 函数不可积、雷电电磁脉冲 (lightning electromagnetic pulse, LEMP) 数值计算麻烦的问题。

$$\begin{cases} i(t) = \frac{I_0}{\eta} (1 - e^{-t/\tau_1})^n e^{-t/\tau_2} \\ \eta = [n\tau_2/(\tau_1 + n\tau_2)]^n [\tau_1/(\tau_1 + n\tau_2)]^{\tau_1/\tau_2} \end{cases} \quad (3)$$

通过调节参数 I_0, n, τ_1, τ_2 亦可得到所需波形。

2 MOA 冲击电流发生回路

在对 MOA 进行出厂试验或是验收试验时,须采用冲击电流发生器产生特定指数波冲击电流进

行残压试验。指数波冲击电流回路可简化为 RLC 放电回路,基于线性负载的研究现已有较为成熟的理论基础,而对于带有不可定量确定的非线性负载的冲击电流回路的设计常基于线性负载设计理论进行改进,以满足工程需要。

2.1 带线性负载放电回路的理论分析

图 1 为指数波冲击电流装置主放电回路, C 为许多并联电容器的电容总值, L 及 R 为包括电容器、回路连线、分流器、球隙和负载的电感和电阻值。结合电路理论可得式(4)。

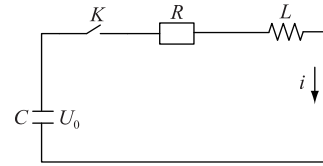


图 1 冲击电流装置主放电回路

Fig.1 Main discharge circuit of impulse current device

$$LC \frac{d^2 i}{dt^2} + RC \frac{di}{dt} + i = 0 \quad (4)$$

公式(4)是一个二阶常系数齐次微分方程,将其转换为特征方程,并求其特征根,根据特征根量值分 3 种情况进行分析。

(1) 欠阻尼,即 $R < 2\sqrt{L/C}$, $\xi = R/2\sqrt{L/C}$ 有:

$$i(t) = \frac{U_0}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\xi t / \sqrt{LC}} \sin(t \sqrt{1 - \xi^2} / \sqrt{LC}) \quad t \geq 0 \quad (5)$$

式(5)输出波形为振荡波,对其求导可得:

$$t_m = \sqrt{\frac{LC}{1 - \xi^2}} \left(\arctan \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} + k\pi \right) \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

为更好地分析阻尼系数与冲击电流发生波形的关系,对式(5)进行归一化, i^* , t^* 分别为归一化冲击电流参数和归一化时间参数。将式(7)和(8)代入式(5)可得式(9)。

$$i^* = i / \left(\frac{U_0}{\sqrt{L/C}} \right) \quad (7)$$

$$t^* = t / \sqrt{LC} \quad (8)$$

$$i^* = \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi t^*} \sin(t^* \sqrt{1 - \xi^2}) \quad (9)$$

(2) 临界阻尼,即 $R = 2\sqrt{L/C}$ 有:

$$i(t) = \frac{U_0 t}{L} e^{-(t/\sqrt{LC})} \quad t \geq 0 \quad (10)$$

$$t_m = \sqrt{LC} \quad (11)$$

$$i^* = t^* e^{-t^*} \quad (12)$$

(3) 过阻尼,即 $R > 2\sqrt{L/C}$ 有:

$$i(t) = \frac{U_0}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\xi t / \sqrt{LC}} \sinh(t\sqrt{\xi^2 - 1} / \sqrt{LC}) \quad t \geq 0 \quad (13)$$

$$t_m = \sqrt{\frac{LC}{\xi^2 - 1}} \left(\operatorname{arctanh} \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{\xi} \right) \quad (14)$$

$$i^* = \frac{1}{\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{-\xi t^*} \sinh(t^* \sqrt{\xi^2 - 1}) \quad (15)$$

2.2 带线性负载放电回路的仿真与设计

由以上冲击电流回路基础理论分析可知冲击电流波形与阻尼系数的关系,采用 MATLAB 语言可绘制出阻尼系数与输出波形的关系曲线,根据 IEC 和国标对不同波形容许偏差的要求绘制阻尼系数与各波形参数间的曲线。在仿真过程中,可采用以下公式对波前时间 T_1 、半峰值时间 T_2 进行计算。

$$T_1 = \frac{T_{90} - T_{10}}{0.8} \quad (16)$$

$$T_2 = T_{50} - \frac{9T_{10} - T_{90}}{8} \quad (17)$$

式中: T_{10}, T_{50}, T_{90} 分别为电流幅值的 10%, 50%, 90% 时对应的时间,且这些数值可直接测得。

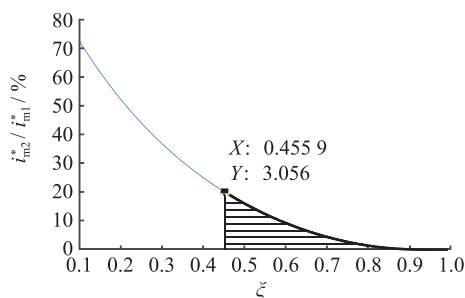
以模拟雷电波为 $8/20 \mu\text{s}, 10 \text{ kA}$ 的冲击电流为例对其回路进行设计。根据波形参数及前面分析,RLC 放电回路只有工作在欠阻尼状态下才能得到 $8/20 \mu\text{s}$ 冲击电流波形。将式(6)代入式(5)可得 i_{m1} 和 i_{m2} , 其比值为:

$$i_{m2}^*/i_{m1}^* = i_{m2}/i_{m1} = e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} \quad (18)$$

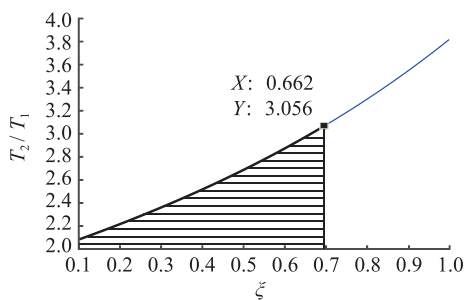
实际工程中可根据波形参数容许误差选取合适的阻尼系数和归一化波形参数值,进而通过计算求得放电回路各线性元件值。根据 IEC 和国标规定, $8/20 \mu\text{s}, 10 \text{ kA}$ 的冲击电流波的容许偏差范围为:峰值 $i_m (\pm 10\%)$, 波前时间 $T_1 (\pm 10\%)$, 半峰值时间 $T_2 (\pm 10\%)$, 反极性振荡幅值/峰值 $i_{m2}/i_{m1} (< 20\%)$ 。

图 2(a) 为根据其反极性振荡要求选取合适的阻尼系数范围 $\xi > 0.4559$, 图 2(b) 为根据半峰值时间与波前时间之比在工程容许偏差范围内选定阻尼系数的范围 $0 < \xi < 0.662$, 结合这两个范围进一步确定输出波形满足工程需要的阻尼系数取值范围为 $0.4559 < \xi < 0.662$ 。图 2(c)-(d) 分别为 T_1^* 和 i_m^* 与阻尼系数的关系曲线, 阴影部分为满足实际工程需要的取值范围, 选定某一阻尼系数值通过式(7—8)可得各线性元件值。

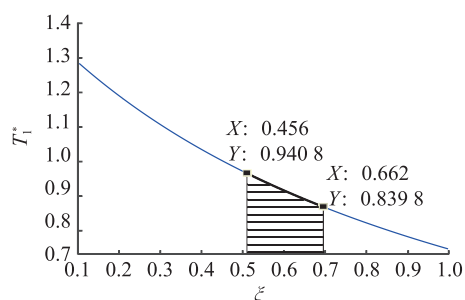
取阻尼系数 $\xi = 0.47$, 曲线 $i_{m2}/i_{m1} = 18.76\%$, i_m^*



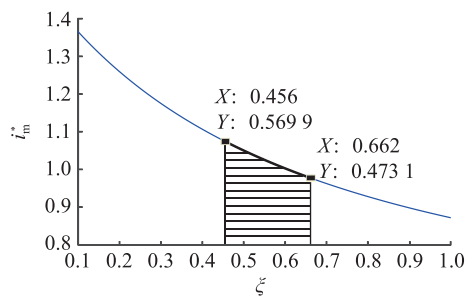
(a) 反极性振荡 i_{m2}^*/i_{m1}^* 与 ξ 关系曲线



(b) 反极性振荡 T_2/T_1 与 ξ 关系曲线



(c) 反极性振荡 T_1^* 与 ξ 关系曲线



(d) 反极性振荡 i_m^* 与 ξ 关系曲线

图 2 波形参数与 ξ 关系曲线

Fig.2 The curve between waveform parameter and $\xi = 0.5622, T_2/T_1 = 2.718, T_1^* = 0.9332$, 工程上电容 C 是既定的, 取电容 $C = 16 \mu\text{F}$, 则电感 $L = 4.593 \mu\text{H}$, $R = 0.504 \Omega, U_0 = 9.53 \text{ kV}$ 。在 ATP-EMTP 软件中按上述所得元件参数搭建回路, 输出所需波形如图 3。

$8/20 \mu\text{s}, 10 \text{ kA}$ 冲击电流回路仿真结果如表 1 所示, 经计算半峰值时间偏差为 $+8.695\%$, 数值相对较大, 但仍在容许偏差规定范围内。由于负载为线性电阻, 根据当前研究可知, 当负载为 MOA 时, 利用 MOA 的非线性, 实际得到的半峰值时间 T_2 偏差会缩小, 波形更接近标准冲击电流波。

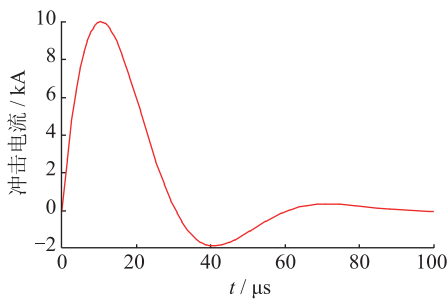


图3 8/20 μs、10 kA 冲击电流回路仿真
Fig.3 Simulation waveform

表1 8/20 μs、10 kA 冲击电流回路仿真结果
Tab.1 Simulation results

波形参数	$T_1/\mu\text{s}$	$T_2/\mu\text{s}$	T_2/T_1	i_{m1}/A	i_{m2}/A	$(i_{m2}/i_{m1})/\%$
标准波形	8	20	2.5	10 000	—	<20
仿真结果	7.9875	21.739	2.722	9 998.58	1 872.65	18.73
偏差/%	-0.156	+8.695	+8.88	-0.014	—	—

2.3 MOA 放电回路仿真设计

针对负载为非线性电阻(MOA、压敏电阻片等)冲击电流回路的研究,现有两种较为常见的设计方法。(1)在已知MOA结构系数和非线性系数的前提下,选定在某一冲击电流幅值点的等效动态电阻作为设计依据,将冲击电流回路设计在临界阻尼状态,再在回路中加入适量的线性调波电阻,进而得到符合标准要求的波形。(2)未知负载参数时,通过冲击电流试验得到负载动态电阻变化范围,采用线性调波电阻的理论进行设计^[19-24]。文中基于现有理论,采用冲击电流试验中发生器的参数搭建仿真回路,根据实际试验数据来模拟MOA伏安特性。

3 仿真与试验结果分析

文中主要针对MOA冲击电流残压试验进行仿真研究,搭建冲击电流试验仿真电路,通过不同冲击电流波形(雷电波8/20 μs,操作波30/80 μs,陡波1/5 μs)确定上述各雷电流模型参数,并绘制出相应的电流、残压波形。金属氧化物避雷器电阻片(metal oxide varistors, MOV)试品参数数据为:尺寸(直径×高度)42×24 mm,标称放电电流10 kA,额定电压3.67 kV,8/20 μs、10 kA冲击电流下残压8.85 kV,30/80 μs、500 A冲击电流下残压6.93 kV,1/5 μs、10 kA冲击电流下残压10.02 kV。以雷电波冲击电流波形为8/20 μs、幅值10 kA为例进行分析研究,其试验波形如图4(a)所示。

在ATP-EMTP软件中搭建电路,MOV伏安特性选用type-92来建模,根据已知样品数据用分段线性的V-I点组成伏安特性曲线。由于ATP-EMTP软

件中type-92模型实质上采用最小二乘法进行拟合,拟合目标函数公式为 $i = p(v/v_{\text{ref}})^q$, p, q 为电阻片特性系数, v_{ref} 为任意基准电压,可防止指数运算时数据溢出(取 $v_{\text{ref}} = 10 \text{ kV}$)。为尽可能准确的表示该样品的非线性特性,根据已知数据点设置容许误差对其拟合求出目标函数表达式,采用曲线拟合工具求出此时的 $p = 4.466 \times 10^4, q = 12.25$ 。

遵照GB 11032—2010交流无间隙金属氧化物避雷器要求进行冲击电流残压试验,试验波形如图4(a)所示。采用RLC冲击电流回路仿真波形如图4(b)所示。由于波前时间 T_1 和半峰值时间 T_2 不可直接测得,须通过公式(16—17)进行计算得出,对于雷电流函数模型,可以将峰值时间 T_m, T_{10}, T_{90} 或 T_{50} 及对应电流值代入函数,根据电流波形容许偏差求出函数波形调节参数。

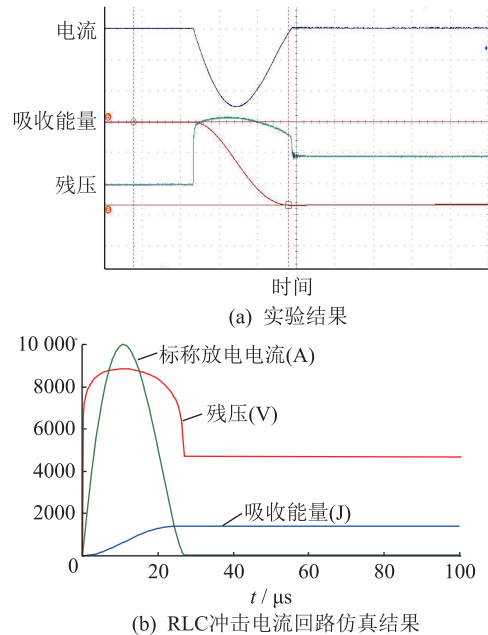


图4 MOA 8/20 μs、10kA 试验与仿真结果

Fig.4 The measured and simulated waveforms

图4(b)为8/20 μs、10 kA RLC冲击试验仿真波形,经过测量得到仿真数据:峰值时间 $T_m = 10.77 \mu\text{s}, T_{10} = 0.49 \mu\text{s}, T_{20} = 7.28 \mu\text{s}, T_{90} = 8.49 \mu\text{s}$,电流幅值 $i_m = 10 \text{ kA}$,计算所得波前时间 $T_1 = 8.49 \mu\text{s}$,半峰值时间 $T_2 = 20.28 \mu\text{s}$ 。

由于ATP-EMTP软件中不支持以上部分函数模型仿真研究,文中在MATLAB/Simulink中搭建仿真电路,MOA特性通过引入上述计算所得参数进行模拟。表2为8/20 μs、10kA冲击电流下上述3种雷电流函数模型的选取参数。

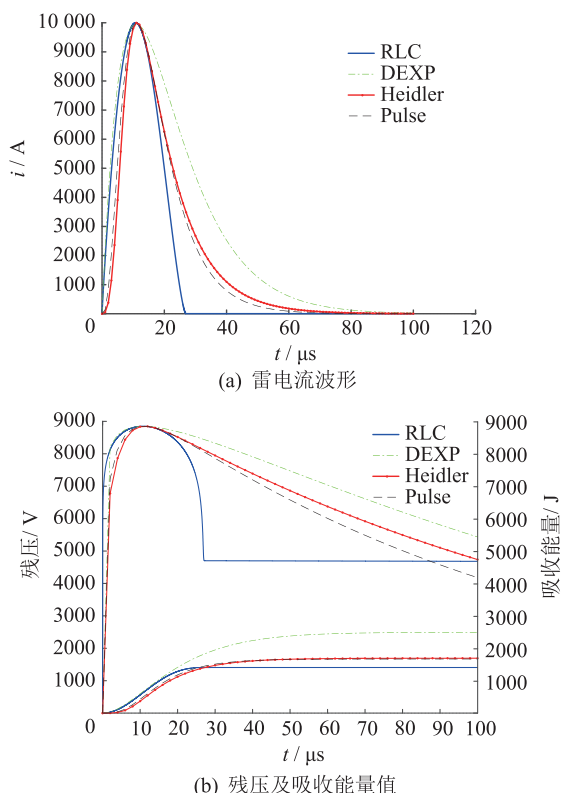
结合图5中曲线及表3中数据可知,在不同雷电流函数模型的激励下,8/20 μs、10 kA雷电流残压值结果近似相等,吸收能量值结果各异;即不同的

表2 8/20 μs 、10 kA 下雷电流函数模型参数

Tab.2 The parameters of lightning current model

参数	双指数函数	Heidler 函数	脉冲函数
电流峰值 I_0/kA	10	10	10
峰值修正系数	0.007 8	0.237 69	0.146 48
$\alpha/\mu\text{s}^{-1}$	1/11	—	—
$\beta/\mu\text{s}^{-1}$	1/10.77	—	—
$\tau_1/\mu\text{s}$	—	9	7
$\tau_2/\mu\text{s}$	—	11	9
n	—	3	3
测得波形参数			
$T_m/\mu\text{s}$	10.884	11.45	11.0
$T_{10}/\mu\text{s}$	0.42	2.85	2.16
$T_{90}/\mu\text{s}$	6.62	8.64	8.17
$T_{50}/\mu\text{s}$	29.15	22.77	22.40
$T_1/\mu\text{s}$	7.76	7.23	7.52
$T_2/\mu\text{s}$	29.51	20.64	21.0

雷电流函数模型输出波形的微小差异对残压值不会造成较大影响,而在计及吸收能量时,累积误差使得最终结果偏差较大。在以往的研究中,吸收能量值相对误差不能较好地用来证明 MOA 动态模型模拟的准确性。因此,选择并建立正确的雷电流模型对研究 MOA 动态模型较为关键。

图5 8/20 μs 、10 kA 下各模型仿真波形

Tab.5 Simulation waveforms of different models

在上述3种模型选取参数时,双指数函数模型在保证波前时间满足工程需要的前提下,半峰值时间不能满足要求,函数参数没有严格的物理意义,

表3 8/20 μs 、10 kA 下各模型仿真结果

Tab.3 Simulation results of different models

参数	RLC	双指数函数	Heidler 函数	脉冲函数
残压值/kV	8.85	8.845	8.846	8.846
吸收能量/kJ	1.407	2.492	1.692	1.669

选参较为复杂且不易调节,而 Heidler 函数和脉冲函数可输出较为满意的波形。

4 结论

文中主要针对 MOA 冲击试验中冲击电流装置冲击电流模型进行分析,选取双指数函数模型、Heidler 函数模型、脉冲函数模型,分析了冲击电流发生回路与上述雷电流模型的基础理论,基于 ATP-EMTP 和 MATLAB/Simulink 搭建冲击试验回路,结合试验数据进行仿真分析,并给出了 ATP-EMTP 软件中常用模型的波形参数。研究表明:

(1) 双指数函数参数由于没有严格物理意义,选参较为复杂;Heidler 函数模型和脉冲函数模型可通过调节参数输出较为满意的波形,且在模拟 MOA 残压试验时,模拟结果相对较为准确。

(2) 不同的雷电流函数模型输出波形的微小差异对残压值不会造成较大影响,而在计及吸收能量时,累积误差使得最终结果偏差较大。在以往的研究中,吸收能量值相对误差不能较好地用来证明 MOA 动态模型模拟的准确性。

参考文献:

- [1] 熊泰昌. 电力避雷器[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. XIONG Taichang. Electrical surge arrester[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [2] 李鹏飞, 张春龙, 吕东波, 等. 多脉冲雷电冲击下金属氧化物的破坏形式[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3792-3799. LI Pengfei, ZHANG Chunlong, LYU Dongbo, et al. Failure modes of metal oxide arrester under the multi-pulse lightning surges[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3792-3799.
- [3] 徐书德, 雷石宜, 陈 彪. 湿法脱硫氧化风系统的优化改造实践[J]. 浙江电力, 2018, 37(3): 86-88. XU Shude, LEI Shiyi, CHEN Biao. Optimal modifications in oxidation fan of wet flue gas desulphurization[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(3): 86-88.
- [4] 赵艾莹, 陈 曦, 徐 龙, 等. 基于有限元法的配电网短路冲击下的热积聚及消散过程研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(4): 1-6. ZHAO Aixuan, CHEN Xi, XU Long, et al. Study on thermal accumulation and dissipating process of distribution cable under short circuit impact based on finite element method[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(4): 1-6.

- [5] 何雨微,司文荣,魏本刚,等. 考虑吸收能量估算的金属氧化物避雷器模型准确性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10):3019-3027.
HE Yuwei, SI Wenrong, WEI Bengang, et al. Accuracy analysis of metal-oxide arrester simulation models considering the energy absorption estimation under impulse currents with different steepness[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10):3019-3027.
- [6] 陈洁,郭洁,邱爱慈,等. 特快速瞬态过电压作用下金属氧化物电阻片响应特性试验[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13):3436-3442.
CHEN Jie, GUO Jie, QIU Aici, et al. Experimental investigation on the response characteristics of metal oxide varistors under very fast transient overvoltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13):3436-3442.
- [7] BRUCE C E R, GOLDE R H. The lightning discharge[J]. The Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1941, 88(2):487-524.
- [8] JONES R D J. On the use of Tailored return-stroke current representations to simplify the analysis of lightning effects on systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1977, 19(2):95-96.
- [9] UMAN M A, MCLAIN D K. Magnetic field of lightning return stroke[J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(28):6899-6910.
- [10] HEIDLER F, CVETIC J M, STANIC B V. Calculation of lightning current parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2):399-404.
- [11] IEC 62305-1 Protection against lightning - Part 1: General principles[S]. 2010.
- [12] RAKOV V A, UMAN M A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4):403-426.
- [13] MOINI R, KORDI B, RAFI G Z, et al. A new lightning return stroke model based on antenna theory[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2000, 105(D24):29693-29702.
- [14] ZHANG F Z, LIU S H. A new function to represent the lightning return-stroke currents[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(4):595-597.
- [15] RAKOV V A, RACHIDI F. Overview of recent progress in lightning research and lightning protection[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3):428-442.
- [16] JAVOR V., RANCIC P D. A channel-base current function for lightning return-stroke modeling[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(1):245-249.
- [17] ANDREOTTI A., VEROLINO L. A new channel-base current function for lightning studies[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(6):1539-1546.
- [18] NUCCI C A, DIENDORFER G, UMAN M A, et al. Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1990, 95(D12):20395-20408.
- [19] 袁海燕,庄燕飞. 杂散参数对冲击电流波形影响的数学分析[J]. 电瓷避雷器, 2012(5):98-104.
YUAN Haiyan, ZHUANG Yanfei. Mathematical analysis on the effect of stray parameters on impulse current waveforms[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(5):98-104.
- [20] 余喆,蓝道林,董树礼,等. 一起避雷器泄漏电流异常增大特殊案例分析[J]. 浙江电力, 2018, 37(5):38-43.
YU Zhe, LAN Daolin, DONG Shuli, et al. Case analysis on leakage current increase of MOA[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(5):38-43.
- [21] 李懿,韦立富,赵勇,等. 海岛地区输电线路防雷工作的分析探讨[J]. 浙江电力, 2017, 36(1):14-18.
LI Yi, WEI Lifu, ZHAO Yong, et al. Analysis and discussion on lightning protection of transmission line in marine area[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(1):14-18.
- [22] 袁海燕,吴剑强,傅正财,等. 一种改进的避雷器冲击电流试验回路参数设计方法[J]. 电工技术学报, 2011(11):210-216.
YUAN Haiyan, WU Jianqiang, FU Zhengcai, et al. An improved designing method of metal oxide arrester impulse test circuit parameter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011(11):210-216.
- [23] 姚学玲,杜志航,陈景亮,等. 不同源阻抗 8/20 μs 冲击电流下的 MOV 动态性能仿真[J]. 高电压技术, 2010, 36(9):2120-2125.
YAO Xueling, DU Zhihang, CHEN Jingliang, et al. Simulation on dynamic characteristics of MOV under 8/20 μs impulse current generators with different source impedances[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9):2120-2125.
- [24] 姚学玲,陈景亮,王任,等. 压敏电阻对冲击电流回路输出特性影响的仿真[J]. 高电压技术, 2009, 35(9):2250-2255.
YAO Xueling, CHEN Jingliang, WANG Ren, et al. Simulation of effect of varistors on output characteristics of impulse current circuit[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9):2250-2255.

作者简介:



姚亚鹏

姚亚鹏(1994—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统过电压与暂态仿真(E-mail: 18165272663@163.com);

刘崇新(1953—),男,教授,博士生导师,研究方向为非线性电路理论研究、混沌与超混沌动力学分析及控制、电力系统无功优化及负荷预测(E-mail: liucx@mail.xjtu.edu.cn);

庄建煌(1974—),男,本科,高级工程师、高级技师,从事输变电检修及相关技术的工作、研究与开发工作。

Impact Analysis of Voltage Sensitive Load on Planning of Distribution Network with New Energy

ZHAO Fang, DU Zhaobin

(School of Electric Power South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Due to the volatility of renewable energy output, the power grid with high proportion of renewable energy integration frequently faces the power quality declining. This reduces the operation efficiency of sensitive load and further leads to abnormal operation or even malfunction of equipment. In this background, the load loss may occur when the voltage falls to the uncertain region of the sensitive load voltage tolerance curve, which should not be neglected. Such load mode possibility should be considered for the distribution network planning in order to improve the security and economy of the power grid. In this paper, the frequency variable motor is taken as a typical load to model and analyze in terms of its voltage sensitivity. First, the fault probability of the frequency converter in the uncertain region of the voltage tolerance curve is estimated, and then the loss of voltage sensitive load is calculated and incorporated into the distribution network risk planning model to improve the adaptability of the existing method. The results of the test example verify the feasibility and effectiveness of the proposed method, which will be a reference for the future distribution network planning.

Key words: new energy; sensitive load; load loss; distribution network planning

(编辑 钱 悦)

(上接第 55 页)

Modeling, Simulation and Experimental Study of Impulse Current Model for MOAs

YAO Yapeng¹, LIU Chongxin¹, ZHUANG Jianhuang²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;

2. State Grid Putian Electric Power Supply Company, Putian 351100, China)

Abstract: The factory test or acceptance test should be done before putting into operation to ensure the MOA's quality, where the impulse current generator is often used to simulate the impulse current and test the stability of withstanding the impulse current. But in the simulation analysis, the lightning current function model was used to study MOA's nonlinear characteristics instead of the impulse current test circuit, and the influence of the difference between the current waveform on the load characteristics was ignored. The lightning current model research status was introduced in this paper, and three models, including double exponential model, Heidler model and Pulse model, were carried out by MATLAB/Simulink. Then simulation results and experimental results were compared and analyzed according to the relative error of residual voltage and energy absorption. Then parameter in Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program (ATP-EMTP) is determined. The research results can provide reference for the following MOA research on the characteristics of the very fast transient overvoltage (VFTO), the simulation analysis of the circuit model and the lightning protection research.

Key words: metal oxide arrester; impulse current generator; lightning current model; ATP-EMTP

(编辑 方 晶)