

王荣珠, 李嘉, 高雅隽, 等. 2017. 基于 ATP-EMTP 的 F-D 模型残压误差模拟分析[J]. 气象与减灾研究, 40(3):241-245.

Wang Rongzhu, Li Jia, Gao Yajun, et al. 2017. Simulation and analysis of F-D model based on ATP-EMTP[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 40(3):241-245.

基于 ATP-EMTP 的 F-D 模型残压误差模拟分析

王荣珠¹, 李嘉¹, 高雅隽¹, 夏雪¹, 张云峰²

1. 江西省气象灾害防御技术中心, 江西南昌 330046

2. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏南京 210044

摘要: 金属氧化物压敏电阻(MOV)在防止电力系统免受雷电过电压侵扰时起至关重要的作用。文中基于 MOV 仿真模型 IEEE 模型, 建立了一种新的 MOV 仿真模型 F-D 模型, 并利用 ATP-EMTP 电磁暂态仿真软件进行仿真模拟, 进而对比分析 IEEE 模型和 F-D 模型在残压误差上的优缺点。相比于 IEEE 模型, 在波形为 8/20 μs 和峰值为 10 kA 的雷电电流冲击下, F-D 模型能更好地再现雷电电流冲击后的残压值。F-D 模型中的电感参数对仿真结果影响较大, 其值与残压误差值呈负相关关系。在波形为 8/20 μs 和峰值分别为 5、7、10 kA 的雷电电流冲击下, 优化后的 F-D 模型残压误差均可忽略不计, 因此优化后的 F-D 模型能很好地反映出实际的 MOV 动作特性。

关键词: F-D 模型, 残压误差, 模拟, ATP-EMTP

中图分类号: TM865

文献标识码: B

文章编号: 1007-9033(2017)03-0241-05

doi: 10.12013/qxyjzjy2017-037

Simulation and Analysis of F-D Model Based on ATP-EMTP

Wang Rongzhu¹, Li Jia¹, Gao Yajun¹, Xia Xue¹, Zhang Yunfeng²

1. Disaster Prevention Technology Center of Jiangxi Provincial Meteorology Bureau, Nanchang 330046, China

2. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Metal oxide varistor (MOV) is one of the important devices for prevent power system against overvoltage. In this paper, a new F-D model is established based on a MOV simulation mode — IEEE model, and the advantages and disadvantages of the two models in residual voltage errors are compared and analyzed based on the simulation experiments by using the ATP-EMTP software. The test results show that the errors of residual voltage for IEEE model and F-D model are 6.25% and 2.54%, respectively, under the lightning current impact with the waveform of 8/20 μs and the peak value of 10 kA. Compared with the IEEE model, the residual voltage can be better reproduced by using F-D model after lightning impact, and the F-D model parameter have a great effect on the simulation results, which presents a negative correlation with the residual pressure error. Under the lightning current impact with the waveform of 8/20 μs and the peak value of 5 kA, 7 kA and 10 kA, the errors of residual voltage for F-D model are 0.023%, 0.08% and 0.22%, respectively. Thus the F-D model can better reflect the action characteristics of the actual metal oxide varistors.

Key words: F-D model; residual voltage error; simulation; ATP-EMTP

收稿日期: 2017-05-22; 修订日期: 2017-08-10.

基金项目: 2014 年国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号:2014CB441405); 2017 年江西省气象局面上项目“基于 ATP-EMTP 仿真软件的 MOV 仿真模型的分析”。

作者简介: 王荣珠, 硕士, 助理工程师, 主要从事电涌保护器的研发与测试、雷电物理研究, E-mail: wrz_1990@126.com.

0 引言

金属氧化物压敏电阻(MOV)在保护电气设备免受雷电过电压和操作过电压的侵害方面得到了广泛的应用。有效的 MOV 模型能让 MOV 按照实验设定的电压值动作。ATP-EMTP 电磁暂态仿真软件是目前应用较为广泛的模拟 MOV 动作特性的瞬时电磁仿真软件(ATP-EMTP Commission, 2006)。

电源系统在运行过程中表现出来的瞬态动作特性十分复杂,仅通过建立一种 MOV 模型涵盖所有影响因素并不可行。因此,在选择一种较为有效的 MOV 模型时,必须考虑许多实际的情况,如瞬时过电压的类型(IEC, 2009)。Jones 等(1992)在研究操作过电压时只考虑了 MOV 非线性的伏安特性。然而,对于雷电电流和波头时间较短的电流来说,MOV 的动态特性至关重要。当波头时间小于 $10 \mu\text{s}$ 的雷电电流经过 MOV 时,其残压值比波头时间大于 $10 \mu\text{s}$ 的雷电电流流经后的残压值要大,而电流小。李鹏等(2006)研究发现,当波头时间为 $1.2\text{--}8 \mu\text{s}$ 时残压峰值增加约 6%。事实上过电压在通过 MOV 时,其动作特性不仅与放电电流有关,还与电流的上升速率有关,这一特性称之为频率有关的动作特性,因此需要比简单静态非线性电阻模型更加复杂的模型进行 MOV 仿真试验。

以往研究的 MOV 仿真模型虽然模拟精度都能达到预期的效果,但模型中的参数确定具有一定的难度:一些参数需要通过一定的迭代计算确定,另外一些需要通过特定的实验得到(Schmidt et al, 1989; Jones et al, 1992; Kim et al, 1996; Pinceti and Giannettoni, 1999; 李鹏等, 2006; 刘艳等, 2014)。因此,需要建立一个参数的确定更加简单、更加实际有效的 MOV 模型。

文中,首先介绍了一种简单的 MOV 仿真模型 IEEE 模型,通过调整模型中的参数得到 F-D 模型,利用 ATP-EMTP 电磁暂态仿真软件进行模拟仿真,对比分析 IEEE 模型和 F-D 模型在残压误差上的优缺点。通过对模型中影响仿真结果最大的电感(L_1)取值进行讨论,将仿真结果与实验结果对比,分析在波形为 $8/20 \mu\text{s}$ 和不同峰值的雷电电流冲击下, F-D 模型中参数 L_1 的最佳取值。

1 F-D 模型的建立

1.1 IEEE 模型简介

Pinceti 和 Giannettoni(1999)提出了一个与频

率相关的 IEEE 模型(图 1),主要包括 A_0 和 A_1 两个非线性电阻,在它们之间用 R_1 - L_1 滤波器隔开,该滤波器主要用于分析不同波头时间浪涌电流下残压值的大小。对于波头时间较长的冲击波, R_1 - L_1 并联支路的阻抗较小,相当于 A_0 和 A_1 两者并联;对于波头时间较短的冲击波, R_1 - L_1 并联支路的阻抗增大。由于 L_1 的作用,使流过 A_0 的电流增加, A_0 上的电压高于 A_1 上的电压,使残压值比 A_0 和 A_1 简单并联时有所增加,从而与 MOV 动作特性相似。

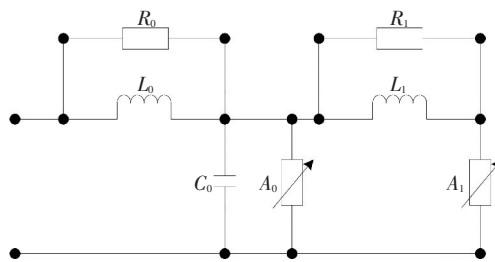


图 1 IEEE 模型电路原理图

Fig. 1 Schematic circuit diagram of IEEE

图 1 中 L_0 为电感,表征 MOV 附近很小的磁场; R_0 为电阻,它用于在仿真的过程中抑制残压值波形的震荡; C_0 为 MOV 的杂散电容。图 1 中非线性电阻 A_0 和 A_1 电流特性由以下公式求出(Dau, 2012):

$$A_0 = A_{w_0} \frac{U_{8/20\mu\text{s};10\text{kA}}}{1.6} \quad (1)$$

$$A_1 = A_{w_1} \frac{U_{8/20\mu\text{s};10\text{kA}}}{1.6} \quad (2)$$

其中, $A_{w_0} = c_0 i_{A_0}^{0.051}$ (3)

$$A_{w_1} = c_1 i_{A_1}^{0.051} \quad (4)$$

式(1)、(2)中, $U_{8/20\mu\text{s};10\text{kA}}$ 为 MOV 在波形 $8/20 \mu\text{s}$ 和峰值为 10 kV 的雷电电流冲击下的残压值;式(3)、(4)中 i_{A_0} 和 i_{A_1} 为流经 A_0 和 A_1 的电流, c_0 和 c_1 为常数。在确定了氧化锌压敏电阻片的物理尺寸时,可以通过以下公式计算得到电路模型中 R_0 、 C_0 、 R_1 和 L_0 的值(Jones et al, 1992):

$$L_0 = 0.2d/n \quad (5)$$

$$R_0 = 100d/n \quad (6)$$

$$L_1 = 15d/n \quad (7)$$

$$R_1 = 65d/n \quad (8)$$

$$C_0 = 100n/d \quad (9)$$

其中, n 为并联氧化锌压敏电阻片的个数; d 为氧化锌压敏电阻片的厚度。

1.2 F-D 模型的建立

图 2 为在 IEEE 模型基础上建立的新模型 F-D

模型电路图。该模型主要用于模拟波头时间为 $8 \mu\text{s}$ 波形的雷电电流。在非线性电阻 A_0 和 A_1 之间只考虑了电感 L_1 , 忽略电阻 R_0 和电感 L_0 。与 A_0 并联的 R_2 是防止仿真过程中抑制残压值波形震荡的电阻。

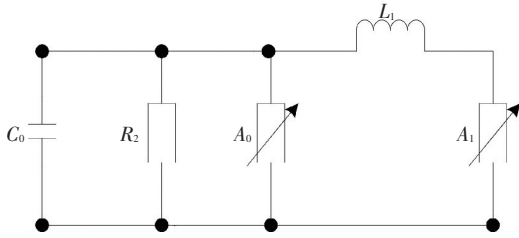


图 2 F-D 模型电路原理图
Fig. 2 Schematic circuit diagram of F-D

通过调整 IEEE 模型(图 1)和 F-D 模型电路(图 2)中的非线性电阻 A_0 和 A_1 的非线性特性, 以满足实验中对于雷电电流冲击的残压值的要求。此外, 还需考虑在电压保护范围内非线性电阻 A_0 和 A_1 的分流比 γ 的值。Fernandez 和 Diaz(2001)研究发现, 当分流比 γ 为 0.02 时仿真效果最好。因此, 通过调整式(3)、(4)中常数 c_0 和 c_1 的值, 使分流比 γ 为 0.02。计算杂散电容 C_0 公式为:

$$C_0 = 100/d \quad (10)$$

式中, d 为氧化锌压敏电阻片的厚度。电感 L_1 的计算公式为:

$$L_1 = nL'_1 \quad (11)$$

式中, n 为比例因子; L'_1 和 n 的取值可以参考相关文献(Fernandez and Diaz, 2001)。

2 模型的仿真结果之间对比分析

2.1 仿真模型的建立

利用 ATP-EMTP 电磁暂态仿真软件对 IEEE 模型和 F-D 模型进行过电压保护的仿真模拟。实验所用的氧化锌压敏电阻是单片直径为 32 cm、厚

度为 4 mm 的圆形电阻片, 故将 $d=0.004 \text{ m}$, $n=1$ 代入式(1)~(11), 得到 IEEE 模型中各参数值: $L_0 = 0.0008 \mu\text{H}$, $L_1 = 0.06 \mu\text{H}$, $R_0 = 0.4 \Omega$, $R_1 = 0.26 \Omega$, $C_0 = 25 \text{ nF}$, $c_0 = 1.378$, $c_1 = 1.083$; F-D 模型各参数取值: $C_0 = 25 \text{ nF}$, $L_1 = 2.5 \mu\text{H}$, $R = 1 \text{ M}\Omega$ 。图 3、4 分别为在 ATP-EMTP 软件中建立的 IEEE 模型和 F-D 模型电路原理图。

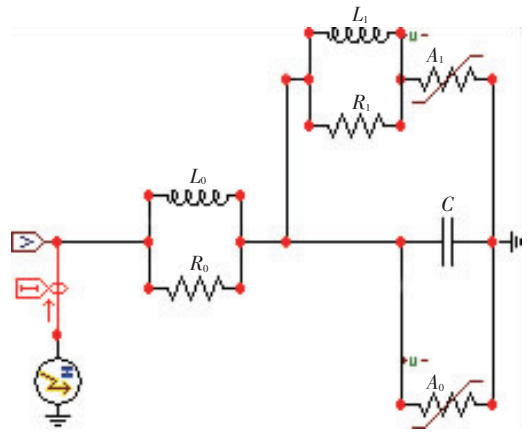


图 3 ATP-EMTP 软件中建立的 IEEE 模型电路原理图

Fig. 3 Schematic circuit diagram of IEEE model based on the ATP-EMTP software

2.2 仿真结果分析

图 5 给出了在波形为 $8/20 \mu\text{s}$ 和峰值为 10 kA 的雷电电流冲击下, 采用两种模型模拟和实验得到的仿真和实际残压波形。分析可见, IEEE 模型的最大残压值为 1 105.0 V, F-D 模型的最大残压值为 1 064.6 V, 而实验残压值为 1 040.0 V。为对两种模型的仿真结果与实验结果进行对比, 利用下式计算残压误差 e :

$$e = \frac{U_{rs} - U_{rc}}{U_{rc}} \times 100\% \quad (12)$$

式中, U_{rs} 为仿真得到的残压值; U_{rc} 为实验得到的残

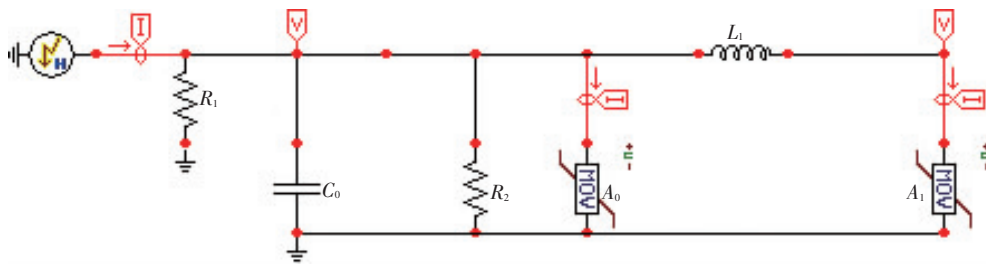


图 4 ATP-EMTP 软件中建立的 F-D 模型电路原理图

Fig. 4 Schematic circuit diagram of F-D model based on the ATP-EMTP software

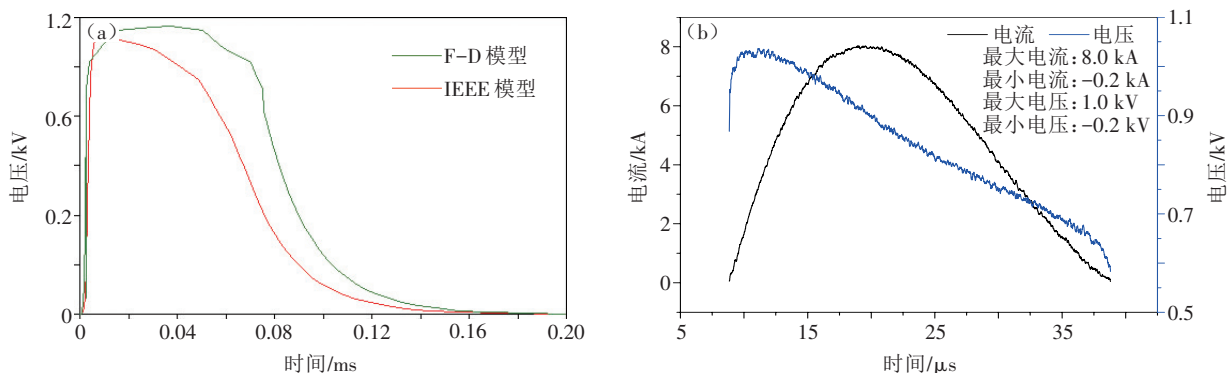


图5 波形为8/20 μs 和峰值为10 kA的雷电电流冲击下模拟(a)和实验(b)残压波形

Fig. 5 The simulated residual voltages of simulation (a) and experiment (b) under the impact of 8/20 μs waveform and 10 kA peak lightning current

压值。通过计算得到 IEEE 模型的残压误差为 6.25%，F-D 模型的残压误差为 2.54%。因此，两种模型模拟出的数据均有效，两者都以良好的准确性再现了实验的残压值。相比之下，F-D 模型的电路组成更简单，且残压误差更小。

在对 F-D 模型进行仿真模拟计算时发现， L_1 的取值大小对仿真的结果影响较大。 L_1 的取值可以参考相关文献(Fernandez and Diaz, 2001)，但其中提出的模型在计算 L_1 时运用了相应的等效，这对仿真结果带来一定的误差，并且讨论的是高压情况。

表1 3组仿真模拟实验 L_1 取值

Table 1 L_1 values for three simulation experiments

实验组	I_{imp}/kA	L_1 取值/mH								
		L_{1-1}	L_{1-2}	L_{1-3}	L_{1-4}	L_{1-5}	L_{1-6}	L_{1-7}	L_{1-8}	L_{1-9}
I	5	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450
II	7	0.020	0.030	0.040	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075
III	10	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005

注： I_{imp} 为雷电电流峰值。

3.2 实验结果分析

利用 ATP-EMTP 软件对 F-D 模型进行模拟，将模拟的残压值与实验的残压值进行对比，利用式(12)计算出残压误差，从而得出符合一般实验规律的最佳 L_1 取值。实验结果表明，波形为 8/20 μs 和峰值分别为 5、7、10 kA 的雷电电流波形冲击下，实验的残压值分别为 877.0、942.3、1 040.0 V，而经过优化后的 F-D 模型利用 EMTP-ATP 软件仿真模拟的残压值分别为 877.2、941.6、1 042.0 V，误差分别为 0.023%、0.74%、0.22%，误差几乎可以忽略不计。

由此可知，当雷电电流的峰值增加时，为使实验结果更符合实验的实际情况，必须减小 L_1 取值。

因此，以下将重点讨论对仿真模拟结果影响较大的 L_1 取值，以实现 F-D 模型进一步优化处理。

3 F-D 模型中 L_1 的取值

3.1 实验设计

利用前文提出的压敏电阻片的各个参数特性，F-D 模型中 L_1 分别取 9 组不同的值，在波形为 8/20 μs 和峰值分别为 5、7、10 kA 的雷电电流 (I_{imp}) 的冲击下，进行 3 组冲击实验以及仿真模拟实验，结果如表 1 所示。

这是由于随着雷电电流峰值的增加，雷电电流波形的斜率变大，只有当 L_1 取值减小，才能使 A_0 和 A_1 上流过的电流比例更符合实际情况，这也与 IEEE 模型的工作原理相符。

4 结论

文中首先介绍了一种简单的 MOV 仿真模型 IEEE 模型，在此基础上对 IEEE 模型中的参数进行调整，建立了一种新的 MOV 仿真模型 F-D 模型。基于 ATP-EMTP 电磁仿真软件进行仿真模拟实验，并且对比分析了 IEEE 模型和 F-D 模型的残压误差，得出以下结论：

1) 相比于 IEEE 模型，F-D 模型能更好地再现

雷电电流冲击后的残压值。

2) F-D 模型中电感参数的取值对仿真模拟的结果影响比较大,其大小与残压误差呈负相关关系。

3) 波形为 $8/20 \mu\text{s}$ 和峰值分别为 5、7、10 kA 的雷电电流波形冲击下,F-D 模型中电感的最优取值分别为 0.450、0.075、0.005 mH,此时的残压误差可以忽略不计。

综上所述,优化后 F-D 模型能很好地反映出 MOV 的动作特性,与 IEEE 模型相比,F-D 模型更简单、灵活,调整的原理更简单,也更具实用价值。

参考文献 (References)

- ATP-EMTP Commission. 2006. XIXI-“ZNO FITTER” to punch Type-92 ZnO branch cards[M]. Norway: ATP-EMTP Commission Press:363-367.
- Dau S. 2012. Modelling of metal oxide surge arresters as elements of overvoltage protection systems [C]. Lightning Protection (ICLP). International Conference on IEEE:1-5.
- Fernandez F, Diaz R. 2001. Metal Oxide Surge Arrester Model for fast transient simulations[C]. Brazil: The International Conference on Power System Transients IPAT01, Rio De Janeiro: 20-24.
- IEC. 2009. Surge arresters. Part 4: Metal oxide surge arresters without gaps for AC systems[S]. Geneva: International Electro technical Commission.
- Jones R A, Clifton P R, Grotz G, et al. 1992. Modeling of metal-oxide surge arresters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 7(1): 302-309.
- Kim I, Funabashi T, Sasaki H, et al. 1996. Study of ZnO arrester model for steep front wave[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 11(2):834-841.
- 李鹏,张俊民,李航,等. 2006. MOV 冲击等效电路模型及其应用[J]. 电气技术,60(12):41-44. Li P, Zhang J M, Li H, et al. 2006. MOV impact equivalent circuit model and its application [J]. Electr Eng, 60(12):41-44. (in Chinese)
- 刘艳,张其林,李祥超. 2014. 基于电子电路仿真软件(PSPICE)的 MOV 全电流仿真模型的建立[J]. 科学技术与工程,(2):112-115. Liu Y, Zhang Q L, Li X C. 2014. The Full Current Model of Modeling with PSPICE[J]. Science Technology and Engineering,(2):112-115. (in Chinese)
- Pinceti P, Giannettoni M. 1999. A Simplified model for zinc oxide surge arresters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 14(2): 393-398.
- Schmidt W, Meppelink J, Richter B, et al. 1989. Behaviour of MO-surge-arrester blokes to fast transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 4(1):292-300.