

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.05.008

基于阻容网络的避雷器阻性电流计算方法研究

马志伟¹, 阮江军¹, 甘 艳², 张 昌², 王 建¹, 杜志叶¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072; 2. 华中电网有限公司, 武汉 430000)

摘要: 避雷器是目前防止雷击过电压最为有效的措施, 其中应用最为广泛的避雷器类型就是氧化锌避雷器。阻性电流是对氧化锌避雷器的健康状态进行判断的重要依据, 但是由于部分电容干扰, 现有测量方式很难从全电流中准确得到阻性电流。文中以 500 kV 氧化锌避雷器为例, 利用 MATLAB 中的 Simulink 模块对三相避雷器进行简化建模, 考虑了避雷器的分节情况, 考虑了各节之间的部分电容和各相之间的相间电容, 得到了三相分节的避雷器阻容网络路模型, 可以有效地滤除全电流中的容性分量, 计算得到阻性电流。对于路模型中的各部分电容的取值, 通过在 Ansoft 中利用有限元方法计算得出; 对于路模型中的电阻的取值, 通过高压试验的方法获得, 文中进行了 500 kV 单节避雷器在工作电压附近的交流高压试验, 单节避雷器没有相间干扰和各节之间的部分电容干扰, 可以通过现有测量仪器直接测得阻性电流, 利用施加电压和阻性电流求得交流电阻。

关键词: 氧化锌避雷器; 阻容网络; 有限元仿真; 交流高压试验

Research on Resistive Current Calculation Method of MOA Based on RC Network

MA Zhiwei¹, RUAN Jiangjun¹, GAN Yan², ZHANG Chang², WANG Jian¹, DU Zhiye¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Central China Grid Company Limited, Wuhan 430000, China)

Abstract: Arrester is the most effective measure to prevent lightning over-voltage. One of the most widely used arrester type is zinc oxide arrester. Resistive current is an important basis for judging the health status of zinc oxide surge arresters. However, due to partial capacitance interference, the current measuring method is difficult to accurately obtain the resistive current from the total current. Taking the 500 kV Zinc Oxide lightning arrester as an example, the three-phase arrester resistance RC network model modeled by Simulink module in MATLAB, considering the arrester section conditions, taking into account the partial capacitance between the sections and the phase-to-phase capacitance between the phases, can effectively filter out the capacitive component of the total current, calculate the resistive current. The value of the capacitance of each part in the RC network is calculated by using the finite element method in Ansys; The resistance value of the RC network is obtained by the high voltage test. In this paper, the AC high voltage test of 500 kV single section lightning arrester near working voltage was carried out. Without the interference between phases and partial capacitance between the various sections, the resistance current of single-phase surge arresters can be measured directly through the existing measuring instrument. Then obtained the AC resistance by the voltage applied and the resistive current.

Key words: MOA; RC network; finite element simulation; AC high voltage test

0 引言

随着中国电力系统网络的不断发展, 因为雷击

而引发的事故日益增多, 据电网故障分类统计显示, 在中国跳闸率比较高的省市, 由雷击引起的跳闸次数占总跳闸数的 40%~70%, 给国家和电力公

收稿日期: 2018-10-21; 修回日期: 2018-12-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划) (2006CB200303, 2006CB2003056)。

Project Supported by the National Basic Research Program (973 Program) (2006CB200303, 2006CB2003056)。

司带来了巨大的安全隐患和经济损失。

安装避雷器是目前电力系统中防止雷击过电压最为有效的措施,而氧化锌避雷器由于其优良的伏安特性、快速的响应速度、较高的可靠性等原因,已经成为应用最为广泛的避雷器类型。随着氧化锌避雷器工作年限的增加,性能会慢慢变差,判断避雷器状态是否正常的重要方法是准确测定避雷器泄漏电流中的阻性电流分量,即确定阻性电流的增量^[1-2]。但是由于高压避雷器周围带电设备以及避雷器自身存在着复杂的部分电容网络,存在着很大的部分电容电流干扰,甚至会占全电流的95%以上^[3],导致很难准确计算出阻性电流分量^[4-6]。目前国内广泛采用的阻性电流测量方法有补偿法、谐波法、投影法等方法,无法准确滤除全电流中的容性分量,导致阻性电流计算不准确,无法准确反应避雷器的运行状态^[7-9]。

文中采用阻容网络的方法,对500 kV变电站母线避雷器进行建模仿真,对部分电容网络进行充分考虑,在MATLAB中的Simulink模块建立三相避雷器的阻容网络模型^[10-11],在Ansoft中建立有限元模型,通过有限元仿真的方式得到各个部分电容的数值,同时进行交流高压试验,通过试验数据分析得到每节避雷器的电阻和自电容值,将所有数据带入到阻容网络中进行计算^[12],通过路模型仿真计算出阻性电流。此方法由于对部分电容进行了严谨的考虑,可以准确滤除容性电流,得出阻性电流,为避雷器的在线监测提供依据。

1 有限元仿真

1.1 几何模型的建立

为了计算出各部分电容的数值,需要对实际的变电站母线避雷器进行几何建模,襄阳某500 kV变电站避雷器(一相)图见图1,500 kV变电站避雷器三相避雷器呈一字型排列,每相避雷器都分为三节,避雷器上端有一个均压环。

以A相避雷器为例,避雷器顶端导体与避雷器均压环相连,视为同一导体,可编号为导体1,下方共有法兰3个,从上至下依次编号为导体2、导体3,最下方法兰与接地柱相连,视为大地的一部分。由此A相共有导体1、导体2、导体3共3个导体,B相依次导体编号方式,可得导体4-6,C相依次导体编号方式,可得导体7-9。大地编号为导体0。

根据以上特征并根据避雷器实际尺寸,可以建立500 kV避雷器的几何模型,见图2。



图1 襄阳某500 kV智能变电站避雷器(一相)

Fig. 1 A 500 kV intelligent substation lightning arrester (one phase) in Xiangyang

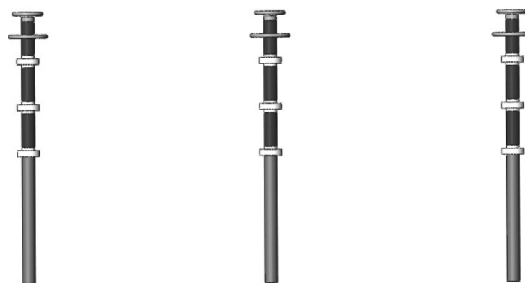


图2 500 kV变电站避雷器几何模型

Fig. 2 Geometrical model of lightning arrester working condition in 500 kV substation

1.2 部分电容仿真计算

三相避雷器与电压互感器有1-9号导体共9个导体,加上大地共有10个导体,每两个导体之间都会产生部分电容。部分电容参数可以由有限元仿真计算得出^[13-14]。

将几何模型导入到Ansoft中进行有限元计算,避雷器的有限元模型见图3。

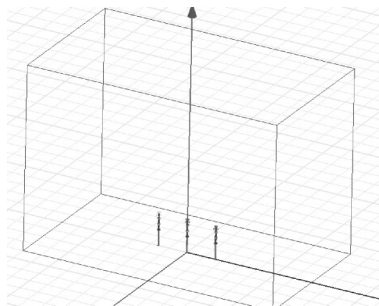


图3 避雷器有限元仿真模型

Fig. 3 Finite element simulation model of lightning arrester

图3中外部的方框为空气边界,仿真中空气边界设置已足够大,可以模拟避雷器在无限大空气中

的情况。

计算得到各导体之间的互电容,三相各自相间导体之间的互电容见表1。A相与B相之间的互电容及B相对地电容见表2,A相与C相之间的互电容及C相对地电容见表3,B相与C相之间的互电容及A相对地电容见表4。

表1 各相自身部分电容

Table 1 The self-capacitance of each phase									pF
A相			B相			C相			
C_{12}	C_{13}	C_{23}	C_{45}	C_{46}	C_{56}	C_{78}	C_{79}	C_{89}	
17.896 0	3.913 3	5.746 9	18.056 0	3.898 4	5.813 8	18.013 0	3.934 6	5.804 7	

表2 A相与B相之间的互电容及B相对地电容

Table 2 The mutual capacitance between the A phase and the B phase and the relative capacitance of the B					pF
导体	0	1	2	3	
4	48.179 00	1.755 50	0.538 55	0.558 46	
5	17.620 00	0.538 00	0.183 96	0.206 70	
6	28.355 00	0.557 57	0.206 26	0.250 02	

表3 B相与C相之间的互电容及C相对地电容

Table 3 The mutual capacitance between the B phase and the C phase and the relative capacitance of the C					pF
导体	0	4	5	6	
7	50.295 00	1.759 00	0.539 55	0.558 44	
8	18.317 00	0.540 32	0.184 45	0.206 93	
9	29.135 00	0.560 33	0.207 30	0.250 91	

表4 C相与A相之间的互电容及A相对地电容

Table 4 The mutual capacitance between the C phase and the A phase and the relative capacitance of the A					pF
导体	0	7	8	9	
1	50.211 000	0.338 980	0.097 459	0.100 080	
2	18.258 000	0.097 337	0.028 751	0.030 150	
3	29.014 000	0.099 941	0.030 146	0.032 148	

由表1-4中部分电容仿真数据可以发现,各相自身的部分电容值要比相间的部分电容值大,这是由于一字排列的三相避雷器,相间距离要远大于相内法兰的距离。部分电容中与导体1、导体4、导体7相关的电容值也要比其他电容较大,导体1、导体4、导体7为避雷器顶端导体,与避雷器的均压环相连,在此将二者视为一个导体,这3个导体比其他导体要大很多,所以与这3个导体相关的部分电容要更大一些。

2 交流高压试验

在进行阻容网络路模型中,将每节避雷器等效为一个电阻和一个自电容的并联,为了得到每节避雷器的电阻和自电容数值,文中进行了以下试验。

2.1 交流单节避雷器高压试验

由于存在着复杂的部分电容干扰,对于三相避雷器而言,目前的阻性电流测量设备不能准确地从全电流中得到阻性电流,文中所述的方法就是针对这个问题提出的。对于单节避雷器而言,没有复杂的部分电容网络,可以使用现有的避雷器阻性电流测量设备进行测量。

文中进行了单节 500 kV 避雷器的交流高压试验,试验选用了 Y20W-420/1046 的 500 kV 避雷器作为研究对象,其实物图见图 4。

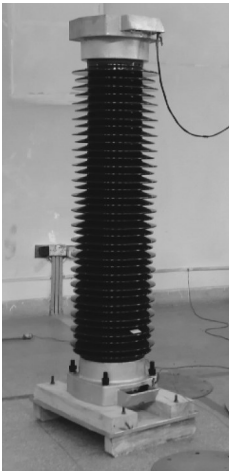


图4 Y20W-420/1046型500 kV避雷器

Fig. 4 Y20W-420/1046 500 kV lightning arrester

试验中采用升压变压器作为试验电源,最高可升压至 750 kV,测量阻性电流采用相位矫正方法是 LCD-4 型补偿式阻性电流测试仪(沈阳产)。

试验的原理接线图见图 5。

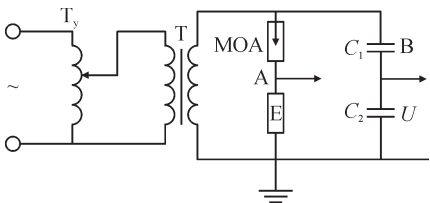


图5 试验原理接线图

Fig. 5 Test wiring diagram

在进行工频交流试验时,由 B 端引出电压信号

来进行测试试验电压, E 为电流取样装置, A 端测试电流。

实际的避雷器试验现场图见图 6。试验室为电磁屏蔽试验室, 可以有效屏蔽外部电磁干扰, 所有的测量仪器均在专门的屏蔽室内, 保证测量的准确性, 接地极采用单独接地极, 接地良好。并且采用电晕屏蔽措施, 避免外部放电, 配有电晕监测设备, 时刻监测电晕情况。

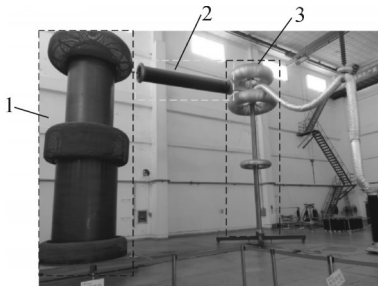


图 6 试验现场图

Fig. 6 Field wiring diagram

图 6 中左框 1 内为升压变压器, 中框 2 为限流电阻, 框 3 内为分压器, 最右方为试验的避雷器, 避雷器上方引线外套铝箔软管, 可以增加高压引线半径, 有效防止电晕的出现, 避免外部放电。

文中所研究的对象为变电站母线避雷器, 对于 500 kV 智能变电站避雷器而言, 取相电压, 取电压峰值, 并考虑到变电站出线电压高电网额定电压 10%, 理想状态下三节避雷器均匀分压, 则有每节避雷器分压大小为 149.69 kV(交流峰值)。所以交流试验在有效值 105.85 kV 左右进行。部分试验数据见表 5。

表 5 试验数据表

Table 5 Test data table

电压有效值/kV	全电流有效值/mA	阻性电流峰值/mA
104.6	1.48	0.115
106.4	1.52	0.120

2.2 便携式避雷器带电测试仪测试试验

便携式避雷器带电测试仪操作简单、显示齐全, 目前市面上已经有很多种便携式避雷器带电测试仪出售, 该试验所采用的便携式避雷器带电测试仪实物图见图 7。

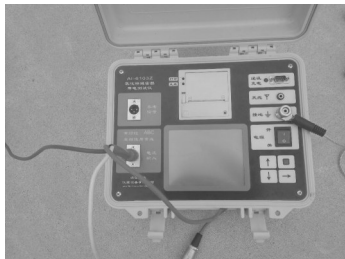


图 7 便携式避雷器带电测试仪

Fig. 7 Portable lightning arrester charged tester

高压试验的基本原理仍见图 7, 只是将测量设备 LCD-4 型补偿式阻性电流测试仪改为由便携式避雷器带电测试仪进行测量。

该仪器可以显示的结果有电压值、全电流、阻性电流、阻性电流基波、电容等。接线只需将电流线接避雷器底部, 电压线由试验的测试信号引出(即图中 5 中 B 点), 设置好变比, 接好地线, 即可开始测量。

部分试验数据见表 6。

表 6 便携式设备测量数据

Table 6 Portable device measurement data

电压有效值/kV	全电流有效值/mA	阻性电流峰值/mA	阻性电流基波峰值/mA	电容/pF
104.4	1.480	0.115	0.113	44
106.2	1.503	0.123	0.118	44

2.3 单节避雷器交流电阻和自电容

可以看出便携式带电测试仪测量所得的结果与 LCD-4 型补偿式阻性电流测试仪测量所得的结果有很好的对应性。当电压为 105.85 kV 时, 阻性电流峰值约为 0.12 mA, 阻性电流基波峰值约为 0.116 mA, 以此来计算避雷器单节阀体的在正常工作情况下的交流电阻。计算结果为 1.29 GΩ。

便携式避雷器带电测量仪同时测得电容为 44 pF。该试验所用的避雷器为 Y20W-420/1046 的 500 kV 避雷器, 其内部结构见图 8。

避雷器内部每 3 片阀片为 1 组, 每组阀片之间通过垫块相连接, 垫块为金属材质, 其规格与阀片相同。单节避雷器共有阀片 42 个, 垫块 26 个, 阀片及垫块串在一个绝缘杆上, 两端通过弹簧压接, 阀片规格为内直径 32 mm, 外直径 105 mm, 厚度 22.5 mm。

利用工频介质损耗测量仪(可测电容)对单片阀片测量, 此种阀片的电容值约为 2 000 pF 到 2 200 pF, 每节避雷器共有阀片 42 个, 垫块为金属材质, 相当于导体, 按照电容串联的定理可估算一节避雷器的电容值约为 47.6 pF 到 52.4 pF, 便携式测量仪的测量结果与此结果相差不大, 误差在可以接受的范围内, 单节避雷器的自电容取为 44 pF。

3 路模型仿真

3.1 建立路模型

每一相避雷器有 3 节, 三相避雷器共有 9 节, 在建立路模型时, 认为 9 节避雷器只有位置不同, 其他的材料、结构、电阻、自电容参数等都是相同的。每节避雷器阀体等效为一个自电容和一个电阻的并

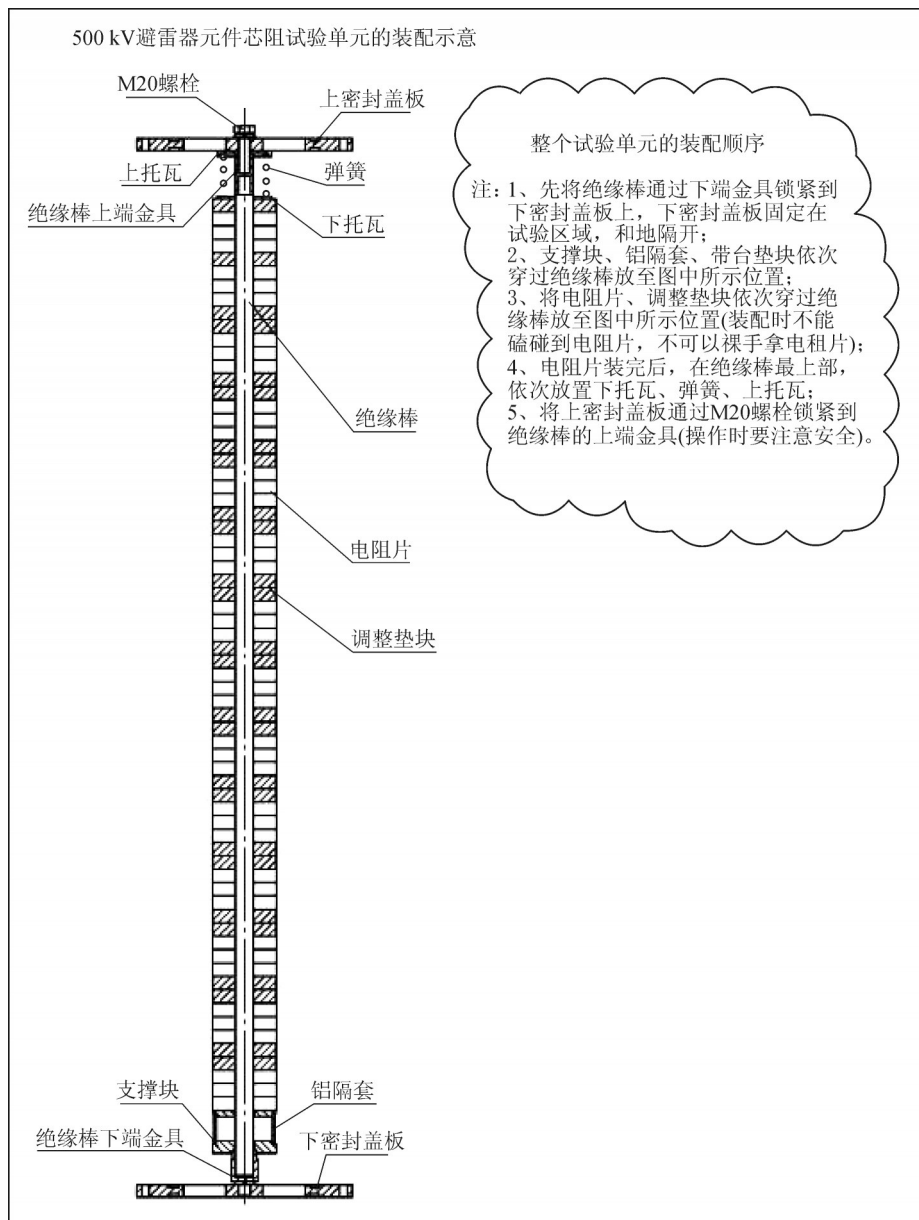


图8 试验避雷器内部结构图

Fig. 8 Internal structure diagram of the test arrester

联, 记A相3节避雷器阀体从上到下依次为1、2、3号阀体, B、C相依此类推, 三相阀体对应的自电容分别为 $C_1, C_2, \dots, C_9$, 电阻分别为 $R_1, R_2, \dots, R_9$ 。

自电容和电阻值由高压试验得到, 由于认为9节避雷器只有位置的差别, 所以 $C_1=C_2=\dots=C_9=44 \text{ pF}$; $R_1=R_2=\dots=R_9=1.29 \text{ G}\Omega$ 。

均压环在路模型中没有直接体现, 其与避雷器上端导体连接, 视为一个导体, 所以均压环的影响体现在了部分电容的数值中, 在图4所示的避雷器有限元模型中有均压环的建模, 所以均压环的影响在有限元仿真得到的部分电容数值中已经体现。

1-9号导体共产生部分互部分电容36个, 每个导体产生一个对地电容, 共9个对地电容, 互部分电

容和对地电容已通过有限元仿真得到, 将仿真得到的电容值带入到阻容网络中。

根据避雷器结构, 忽略避雷器周围其他带电设备, 考虑三相避雷器各部分电容后得到的阻容网络路模型见图9。

3.2 仿真结果

进行路模型仿真, 由图10中电压表记录端电压, 电流表记录全电流, 仿真得到的A相避雷器的端电压和全电流曲线见图10。B、C两相也有类似图形。

由端电压和全电流可以计算出避雷器相角, 进而计算出阻性电流。三相的计算结果见表7。

根据考虑部分电容网络的三相避雷器向量图, 理论分析发现避雷器的全电流和相角具有如下规律^[15]:

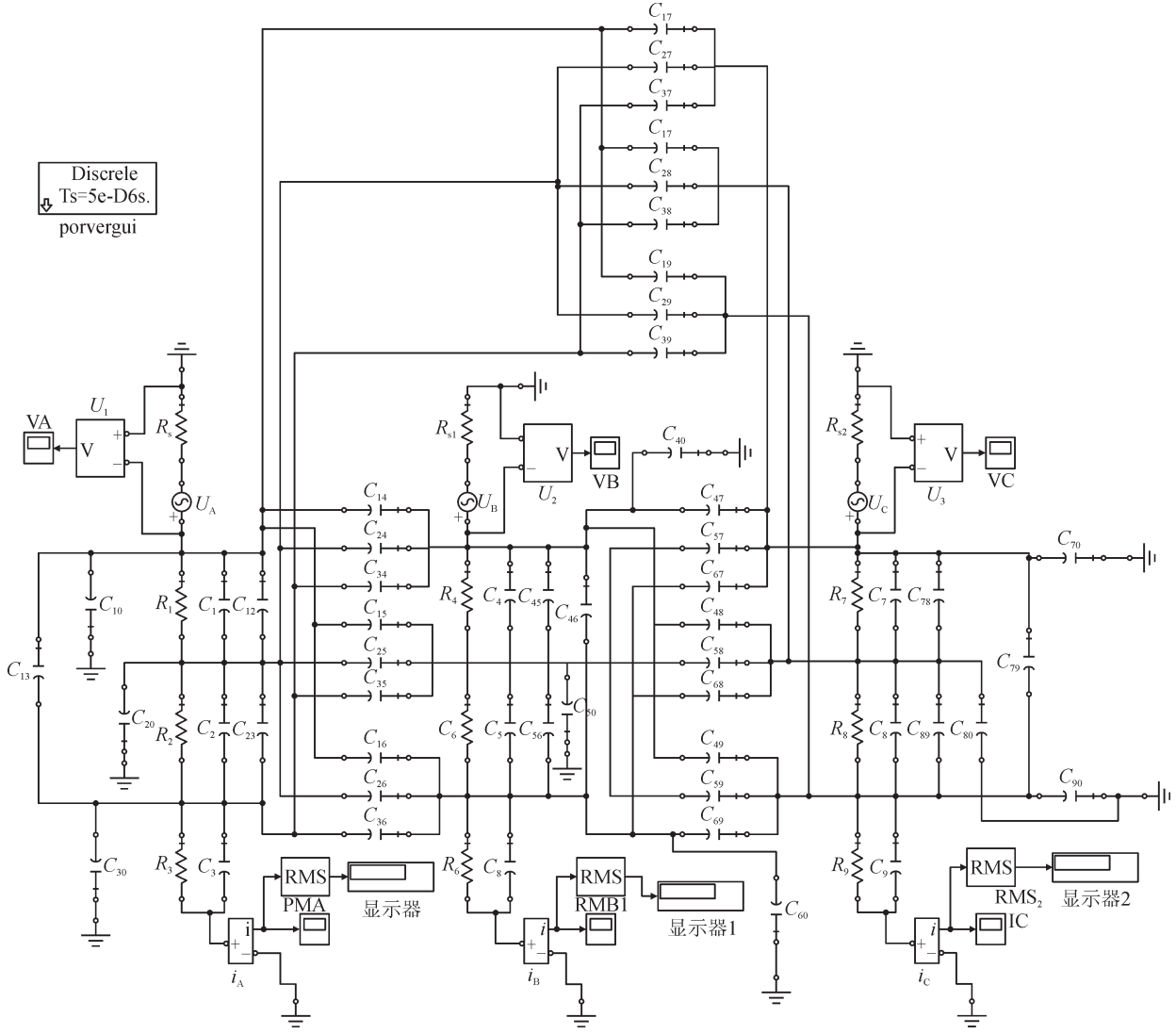


图9 阻容网络路模型

Fig. 9 Model of resistive capacitance network

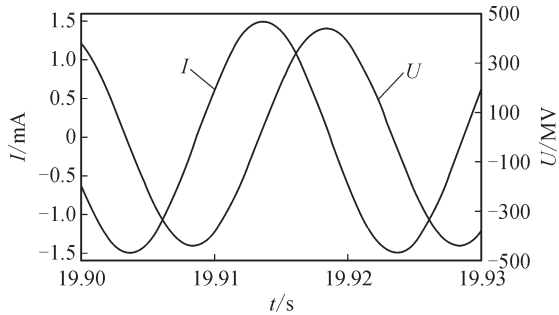


图10 A相端电压和全电流波形图

Fig. 10 A phase voltage and full current waveform

表7 避雷器三相仿真结果

Table 7 Three-phase lightning arrester simulation results

相数	全电流/mA	相角/(°)	阻性电流/mA
A相	1.059	84.69	0.138 70
B相	1.040	86.14	0.098 96
C相	1.057	87.68	0.060 43

1)全电流为 $I_A > I_C > I_B$;

2)相角为 $\varphi_A < \varphi_B < \varphi_C$ 。

仿真得到的结果可以与此理论上的规律很好地对应,验证了仿真结果的准确性。

三相之间全电流虽然有差别,但是此差别非常小,最大才有1.8%的差别,基本可以认为近似相等,此时发现相角一点微小的变化,都会对阻性电流产生非常大的影响,避雷器相角是影响阻性电流的重要因素,相对于全电流,避雷器相角的大小更能反应避雷器阻性电流的大小。

仿真得到的A相全电流1.059 mA,阻性电流为0.138 7 mA,阻性电流占比13.1%;B相全电流1.040 mA,阻性电流0.098 96 mA,阻性电流占比9.52%;C相全电流1.057 mA,阻性电流0.060 43 mA,阻性电流占比5.72%。可以看出全电流中容性电流占比非常大,阻性电流占比很小,而且三相之间阻性电流的

差别很大,传统的测量方法没有对部分电容网络进行充分的考虑,难以准确滤除容性分量,得到的阻性电流不准确。

4 结论

1)通过交流试验的测量,500 kV 避雷器在正常工作情况下,一节避雷器的自电容约为 44 pF,交流电阻约为 1.29 GΩ。

2)避雷器全电流三相差别不大,避雷器 A 相阻性电流占全电流的 13.1%,B 相阻性电流占全电流 9.52%,C 相占全电流 5.72%,容性电流占了全电流的绝大部分,而且阻性电流三相之间也有很大差别,如果不对部分电容网络进行充分考虑,无法滤除容性干扰,传统阻性电流测量方法没有建立准确的阻容网络,所以测得的阻性电流是不准确的。

3)避雷器相角对阻性电流影响极大,由于避雷器相角都接近于 90°,相角每有一点微小的变化,阻性电流都会产生很大的变化。

志谢:

文中实验方案的制定和实验数据的测量记录工作是在南阳金冠电气有限公司的工作人员的大力支持下完成的,在此向他(她)们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 李庆玲,王兴贵,李效珍,等. 氧化锌避雷器应用一些问题探讨[J]. 高压电器,2009,45(2):130-131.
LI Qingling, WANG Xingguai, LI Xiaozhen, et al. Discussion about application of MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(2):130-131.
- [2] 严璋. 电气绝缘在线检测技术[M]. 北京:中国电力出版社,1995:28.
YAN Zhang. Electrical insulation on-line detection technology[M]. Beijing:China Electric Power Press, 1995:28.
- [3] 王文利,李燕青,律方成. 金属氧化物避雷器在线检测的改进补偿法研究[J]. 高压电器,2005,41(3):192-194.
WANG Wenli, LI Yanqing, LYU Fangcheng. Study on improved capacitive current compensation method of leakage current through MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2005,41(3):192-194.
- [4] 高伟. MOA 绝缘在线监测系统误差及相间干扰的处理[J]. 东北电力技术,2008,29(5):39-42.
GAO Wei. MOA insulation online monitoring system error and interphase interference processing[J]. Northeast Electric Power Technology, 2008,29(5):39-42.
- [5] 唐松平. 金属氧化物避雷器现场带电测试相间干扰研究[J]. 电瓷避雷器,2012(1):56-60.
TANG Songping. Metal oxide ZnO lightning field live test interphase interference[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1):56-60.
- [6] 李燕,杨慧. 无谐波时金属氧化物避雷器带电测试阻性电流相间干扰[J]. 科技传播,2012(1):86.
LI Yan, YANG Hui. When there is no harmonic, the metal oxide arrester electrification test resistive current interphase interference[J]. Science and Technology Communication, 2012(1):86.
- [7] 李金亮,杜志叶,阮江军,等. 基于有限元法的避雷器阻性电流检测的相间干扰计算分析[J]. 电工技术学报,2016(18):184-190.
LI Jinliang, DU Zhiye, RUAN Jiangjun, et al. Calculation and analysis of interphase Interference of resistive current detection of arresters based on finite element method[J]. Acta Electrotechnical Sinica, 2016(18):184-190.
- [8] 王义. 避雷器监测器校验仪的研究与设计[D]. 长沙:湖南大学,2012.
WANG Yi. Research and design of the calibrator of the arrester monitor[D]. Changsha:Hunan University, 2012.
- [9] 胡道明. 基于谐波分析法的 MOA 在线监测数学模型的研究[D]. 南京:河海大学,2005.
HU Daoming. Research on the mathematical model of MOA on-line monitoring based on harmonic analysis[D]. Nanjing:Hohai University, 2005.
- [10] 李金亮,阮江军,杜志叶,等. 基于阻容网络的高压避雷器干扰电流分析[J]. 电瓷避雷器,2013(5):101-106.
LI Jinliang, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. High voltage arresters interference current RC network analysis based on resistance-capacitance network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(5):101-106.
- [11] LI Jinliang, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Analysis of interference current for high-voltage arresters based on resistance-capacitance network[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015,51(3):1-4.
- [12] HAMA M, ISHIZAKA H, SHIMIZU J, et al. Development of advanced built-in surge arresters for distribution system with new zinc-oxide elements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001,16(4):576-581.
- [13] 唐炬,苟海丰,张新强,等. 用部分电容法计算和消除相间干扰[J]. 重庆大学学报(自然科学版),1999,22(6):41-46.
TANG Ju, GOU Haifeng, ZHANG Xinqiang, et al. Calculating and eliminating coupling current using the partial capacitance method[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 1999,22(6):41-46.
- [14] 任卉嵩,李金亮,杜志叶,等. 线路避雷器阻性泄漏电流在线监测中的相间干扰分析研究[J]. 电瓷避雷器,2016(4):83-87.

(下转第 61 页)

- 电定位研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- CHEN Jiao. Time difference algorithm based on energy relevant search in PD location of power transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [15] 唐 炬, 陈 娇, 张晓星, 等. 用于局部放电信号定位的多样本能量相关搜索提取时间差 算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 125-130.
- TANG Ju, CHEN Jiao, ZHANG Xiaoxing, et al. Time difference algorithm based on energy relevant search of multi-sample applied in PD location[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 125-130.
- [16] 印海洋, 朱学成, 李成榕, 等. 基于特高频波形形态的套管局部放电定位时延分析方法[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 180-187.
- YIN Haiyang, ZHU Xuecheng, LI Chengrong, et al. Analysis of TDOA for locating PDs in bushing based on UHF signal features[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 180-187.
- [17] 麦茜坚, 钟 悦, 唐 明, 等. 基于TEV传感器与TOA算法的高压开关柜局部放电定位方法的研究[J]. 电气技术, 2015(6): 1-6.
- MAI Qianjian, ZHONG Yue, TANG Ming, et al. The research on location method of partial discharge in high voltage switchgear based on TEV sensors and TOA algorithm [J]. Electrical Engineering, 2015(6): 1-6.
- [18] 史坤鹏. 基于信号能量分析的电力系统低频振荡模式识别[D]. 长春: 东北电力大学, 2008.
- SHI Kunpeng. Mode identification of power system low frequency oscillation based on signal energy analysis[D]. Changchun: Northeast Electric Power University, 2008.
- [19] 邵先军, 何文林, 徐嘉龙, 等. 利用累积能量函数特征参量优化提取的多源局部放电信号分离技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3348-3358.
- SHAO Xianjun, HE Wenlin, XU Jialong, et al. Separation technique of multiple source PD signals by employing feature optimization extraction of cumulative energy function [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3348-3358.
- [20] 刘明辉, 周银兴, 彭朝勇, 等. 用能量累积法检测地震波雷达信号[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1259-1268.
- LIU Minghui, ZHOU Yinxing, PENG Chaoyong, et al. Using the method of accumulating energy for detecting seismic wave radar signal[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(4): 1259-1268.
- [21] 隐极同步发电机转子重复脉冲(RSO)实验导则: T/CSEE 0041—2017[S]. 2017.
- Guide for the test of repetitive surge oscilloscope (RSO) method on the non-salient pole synchronous generator: T/CSEE 0041—2017[S]. 2017.
- 李天辉(1984—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事电力设备状态检测与故障诊断技术、高电压试验技术方面的研究工作。
- 贾伯岩(1978—), 男, 工学硕士, 正高级工程师, 主要从事电力设备故障诊断分析、电力系统外绝缘方面的研究工作。
- 唐 明(1981—), 男, 工学博士, 博士后研究员, 从事电力安全检测技术研究。

(上接第53页)

- REN Huisong, LI Jinliang, DU Zhiye, et al. Analysis of interphase interference in on-line monitoring of resistive leakage current of line arresters[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(4): 83-87.
- [15] 杨殿成. 金属氧化物避雷器带电测试干扰分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 130-132.
- YANG Diancheng. Study on interphase interference to on-line measurement of metal oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 130-132.
- 马志伟(1994—), 男, 硕士, 主要进行高电压与绝缘方面试验和仿真的学习与研究。