

# 应用高频磁环并联阻尼电阻抑制 变压器雷电过电压的方法

关永刚<sup>1</sup>, 廖福旺<sup>2</sup>, 岳功昌<sup>1</sup>, 黄海鲲<sup>2</sup>, 刘卫东<sup>1</sup>, 林海渊<sup>2</sup>

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;  
2. 福建省电力试验研究院, 福建省 福州市 350007)

## An Approach to Suppress Lightning Overvoltage of Transformer by High Frequency Magnetic Ring With Paralleled Damping Resistance

GUAN Yonggang<sup>1</sup>, LIAO Fuwang<sup>2</sup>, YUE Gongchang<sup>1</sup>, HUANG Haikun<sup>2</sup>, LIU Weidong<sup>1</sup>, LIN Haiyuan<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. Fujian Electric Power Test and Research Institute, Fuzhou 350007, Fujian Province, China)

**ABSTRACT:** In view of the fact the arrester can only suppress the magnitude, but not the steepness, of a lightning overvoltage, so the failures of power transformers due to lightning overvoltage happen occasionally. The authors propose an approach to suppress lightning overvoltage of transformers located in substations by means of high-frequency magnetic rings, which connect in parallel with damping resistor, in series with transmission line in appropriate position. Through the test and simulation of oscillation circuit, an EMTP model to simulate and calculate high-frequency magnetic rings is built. Simulation and calculation results of a certain actual 220 kV substation show that by means of choosing proper material as well as proper shape and size for magnetic rings, the proposed approach can effectively suppress the amplitude of lightning overvoltage and alleviate its steepness, thus it can be used as a supplementary measure to the arresters.

**KEY WORDS:** transformer; lightning overvoltage; overvoltage suppression; high frequency magnetic ring

**摘要:** 采用避雷器可以限制雷电过电压的幅值,但不能抑制陡度,变压器因雷电过电压造成的事故还时有发生。提出将高频磁环并联阻尼电阻后串接在线路的适当位置来抑制变电站变压器雷电过电压的方法。通过振荡回路的试验和仿真建立了高频磁环的EMTP仿真计算模型。针对某实际220 kV变电站的仿真计算结果表明,通过选择适当的磁环材料和优化磁环的形状和尺寸,采用该方法可有效降低变压器雷电过电压的幅值和陡度,可作为避雷器保护的补充和完善措施。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50077012)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50077012).

**关键词:** 变压器; 雷电过电压; 过电压抑制; 高频磁环

## 0 引言

我国电力行业标准规定在变电站的母线和主变端口安装金属氧化物避雷器作为过电压保护措施之一。研究表明,避雷器对雷电过电压有比较好的抑制效果<sup>[1-4]</sup>。实际运行中,仍有因雷电过电压导致变压器损坏的事故发<sup>[5-8]</sup>,可见雷电过电压仍是导致变压器绕组匝间绝缘损坏的一个重要原因。

当变电站附近发生近距离雷击时,雷电侵入波传播到变电站的距离短、衰减小。避雷器仅能限制过电压的幅值,不能降低过电压的陡度,即到达变压器的过电压波仍可能具有很高的陡度,造成变压器绕组上电压分布很不均匀,严重时可能造成变压器端部绕组的匝间绝缘损坏<sup>[9-10]</sup>。因此,同时抑制雷电过电压的幅值和陡度对于确保变压器的安全运行具有实际意义,仅用避雷器作为变压器的雷电防护措施并不十分充分。

在利用高频磁环抑制电力系统快速过电压的研究领域,本文作者已经取得一定成果<sup>[11-14]</sup>。在以往工作的基础上,提出了利用高频磁环并联阻尼电阻来抑制变压器雷电过电压的方法,作为避雷器保护的补充和完善措施,并进行了相应的模拟试验和仿真分析,证明了该方法的可行性。

## 1 过电压抑制原理

利用高频磁环抑制变压器雷电过电压的方法

是将高频磁环和阻尼电阻并联后安装到与变压器相连接的线路上，改变线路的参数，增加雷电波传播路径中的电感和能量损耗。雷电波经过高频磁环和阻尼电阻之后幅值和陡度被削弱，从而保护了变压器。

单独使用磁环仅可以降低雷电波的陡度，不能消耗其能量；而且，由于雷电波幅值很高，磁环很容易因磁饱和而失去作用。因此，作为避雷器保护的补充，本文使用高频磁环并联阻尼电阻来抑制雷电过电压，图 1 为原理示意图。由多个磁环组成的磁环串套装在变压器的连接导线上，阻尼电阻并联在磁环两端。雷电波到达磁环串后，由于磁环电感的作用，一部分雷电流通过阻尼电阻分流，雷电波的幅值被衰减。研究表明，磁环串电感越大，则可以选择越大的阻尼电阻，获得更大的衰减作用；在磁环串电感一定的情况下，阻尼电阻有一个最优值，产生最大衰减。阻尼电阻的存在还有另一个重要作用，即通过对雷电流的分流作用，减小磁环饱和程度。

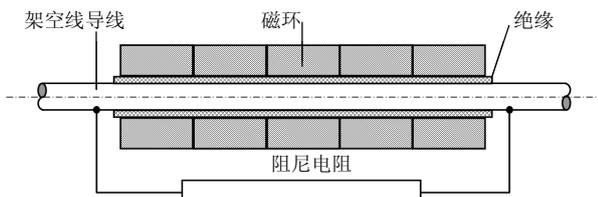


图 1 高频磁环串和阻尼电阻并联结构

Fig. 1 Diagram of high frequency magnetic ring paralleled with damping resistance

图 2 为所采用的非晶磁芯材料(FJ37 型)的磁化曲线。如需有效抑制雷电波陡度，即需要足够大的磁环串电感。磁环串电感取决于磁环材料特性和磁环串尺寸。在实际应用中，须尽可能选择高饱和、高磁导率、高工作频率的磁性材料。要保证高频磁环串的工频阻抗很小，在工频电流通过时损耗和压降很小，不影响系统的正常运行。此外，还应根据应用条件优化磁环的几何形状和尺寸。本文选取的

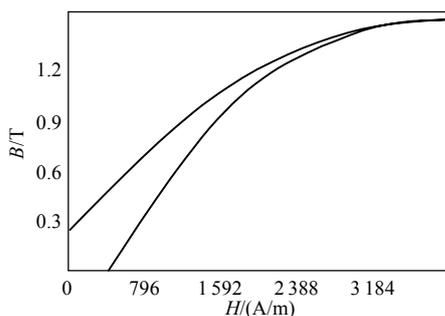


图 2 仿真用非晶磁芯材料的磁化曲线

Fig. 2 B-H curve of amorphous magnetic material

磁环由非晶磁芯构成，非晶磁性材料的频率范围为 300 kHz，相对磁导率 200~1 000，饱和磁感应强度约 1.5 T。非晶磁芯为铁基材料，卷制加工，便于制做大尺寸磁环，价格合理。

## 2 振荡回路试验

### 2.1 振荡回路

为了验证高频磁环并联阻尼电阻对高频暂态的抑制作用，本文首先进行了振荡回路试验。

通过选择参数，使得振荡回路中在电容器放电后产生周期约为 1.7  $\mu$ s 的高频振荡，以观测高频磁环和并联电阻对回路中电压和电流波形的影响和作用。

建立的振荡回路模拟试验电路如图 3 和图 4 所示。图中： $C$  为高压电容器； $R_1$ 、 $L_2$  为连接线路的电阻和电感； $L_1$  为磁环电感； $R_2$  为磁环并联的阻尼电阻； $K$  为放电间隙。主要试验设备和参数如表 1 所示。

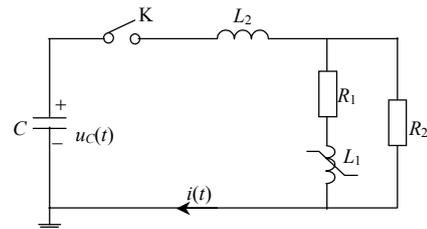


图 3 振荡回路模拟试验电路

Fig. 3 Diagram of the oscillation circuit test



图 4 振荡回路试验系统

Fig. 4 Oscillation circuit test system

表 1 主要试验设备和参数

Tab. 1 Principal test devices and parameters

设备名称	参 数
高压电容器	额定电压：200 kV；电容：9 600 pF
直流充电系统	$\pm 140$ kV
高频磁环	非晶软磁环形磁环 FJ37；单只磁环几何尺寸：内径 25 mm，外径 40 mm，高度 15 mm；磁环数量：200 只；磁环串总长度：3 m
阻尼电阻分流器	高压电阻器 RIG2-25W；数量：40 只；单只阻值：50 $\Omega$ 4.93 m $\Omega$
示波器	型号：Tektronix THS730A；模拟带宽：200 MHz；采样率：1 GMS/s

试验原理及过程如下：

1) 使电容  $C$  充电至要求的电压值  $U_{C0}$ ；2) 减小  $K$  的间隙距离使其击穿，在回路中产生高频

振荡；3) 通过分流器测量回路中的高频电流  $i(t)$ ；  
4) 根据  $i(t)$  积分求得  $C$  上的电压波形  $u_C(t)$ ；  
5) 加入  $L_1$  和  $R_2$ ，重复上述试验过程，观测对  $i(t)$  和  $u_C(t)$  的影响。

### 2.2 试验结果

试验在3种情况下进行：1) 无磁环串；2) 仅有磁环串，无阻尼电阻；3) 同时有磁环串和阻尼电阻。图5~7为试验测得的回路电流  $i(t)$  波形和根据  $i(t)$  积分求得的电容电压  $u_C(t)$  波形，图中各条曲线的起始处为本曲线的零点。各电压和电流波形图中的3个波形由上而下依次对应3种电容充电电压

的情况，分别为：36.5(试验1)、71.3(试验2)和106.8 kV(试验3)。3种试验的结果如表2所示。无磁环串时的试验结果表明，电路电流和电压波形随电容充电电压线性变化。电压波形由零上升到峰值的时间大致为 0.4  $\mu\text{s}$ ，3种试验电压下，电容器上的最大电压峰值分别约为 64、126 和 190 kV。

表2 振荡回路试验结果

Tab. 2 Oscillation test results									
电容充电电压/kV	最大电流峰值/kA			最大电压峰值/kV			电压首峰值时间/ $\mu\text{s}$		
情况1	情况2	情况3	情况1	情况2	情况3	情况1	情况2	情况3	
36.5	1.10	0.38	0.36	64	64	50	0.80	2.50	2.10
71.3	2.10	1.60	0.75	126	125	102	0.80	1.90	1.90
106.8	3.10	2.90	2.00	190	188	158	0.80	1.40	1.30

注：情况1—未加磁环串及阻尼电阻的试验情况；情况2—仅加磁环串的试验情况；情况3—同时加磁环串和阻尼电阻的试验情况。

在试验回路连线上仅加装磁环串的试验结果显示，在磁饱和前，磁环串使暂态电压的振荡周期显著增加，而对幅值没有明显的影响。在试验电压较低时(如 36.5 kV)，磁环基本没有饱和，电流和电压波形接近为衰减的三角函数振荡，电压首峰值的时间更是增加到 2.5  $\mu\text{s}$ 。随着试验电压升高，回路电流增大，磁环进入不同程度的饱和状态，电流和电压波形发生畸变。如在 106.8 kV 的试验电压下，回路最大电流达到了 2.9 kA，磁环明显饱和，但仍使得电压首峰值的时间增加到 1.4  $\mu\text{s}$ 。试验结果表明，磁环串对高频振荡的抑制作用随着饱和程度的增加而减弱。

在试验回路连线上同时加装磁环和阻尼电阻的试验显示，阻尼电阻可以加速电容电压的衰减。在磁环串和并联阻尼电阻的作用下，电容电压的振荡周期得到了延长(相当于抑制了陡度)，幅值也得到了抑制。在 125  $\Omega$  阻尼电阻的情况下，电压第1峰值分别降为约 50、102 和 158 kV。

试验结果表明，与磁环串并联的阻尼电阻能够通过回路中电流的分流作用减小磁环的饱和程度，并加速暂态振荡的衰减。使用磁环串并联阻尼电阻，可以同时抑制电压波形的幅值和陡度。过小的阻尼电阻会过度分流而使得磁环串不能充分发挥作用，过大的阻尼电阻会分流不足而使磁环因过度饱和而失效。对于给定的电路和磁环串，综合考虑电压幅值和陡度，阻尼电阻应有一最优值。对于振荡回路试验而言，125  $\Omega$  阻尼电阻的效果要优于 250  $\Omega$  电阻。

## 3 仿真模型

### 3.1 磁环仿真模型

在电磁暂态仿真(EMTP)计算中，磁环串可表示为集中参数的非线性电感。本文根据磁环材料的磁

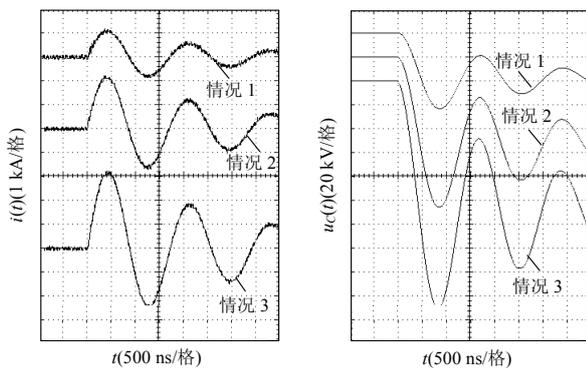


图5 无磁环串时的电流和电压波形  
Fig. 5 Current and voltage waveforms when no magnetic ring is used

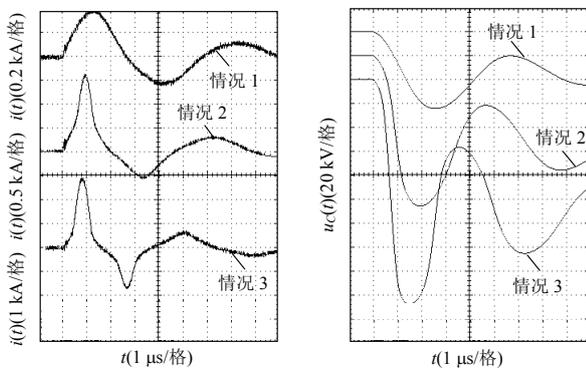


图6 仅安装磁环串时的电流和电压波形  
Fig. 6 Current and voltage waveforms when only magnetic rings are used

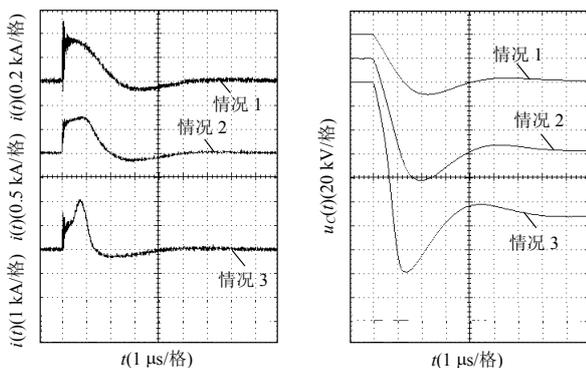


图7 安装磁环串和 125  $\Omega$  阻尼电阻时的电流和电压波形  
Fig. 7 Current and voltage waveforms when magnetic rings and 125  $\Omega$  damping resistance are used

化特性及磁环的实际几何尺寸，首先计算出磁环的总磁链  $\Psi$  随电流  $i$  变化的关系曲线(如图 8 所示)。将该结果输入到 EMTP 的非线性电感模型中，完成磁环串电感的仿真建模。为简化，本文忽略了磁环材料的磁滞特性，采用其基本磁化曲线用于计算。

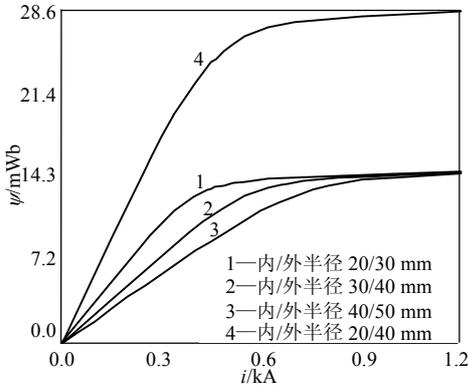


图 8 单位长度不同半径磁环串的  $\Psi$ - $i$  关系曲线

Fig. 8  $\Psi$ - $i$  curves of magnetic rings with unit length and different radius

### 3.2 振荡回路试验的仿真

仿真电路图 3 中各种参数根据图 5 所示的无磁环时试验结果以及二阶电路公式测算得出，具体数据如下：电容  $C=9\ 600\ \text{pF}$ ，磁环串以外回路连线的电感  $L_2=4.75\ \mu\text{H}$ ，回路连线损耗电阻  $R_1=4.46\ \Omega$ 。为便于与试验结果对照，仿真时电容  $C$  初始电压与试验时取值相同，即分别为 36.5、71.3 和 106.8 kV，电感取零初始状态，关合开关 K，计算回路电流  $i(t)$  和电容电压  $u_C(t)$  波形。

回路中仅串接磁环串和同时安装磁环串并联  $125\ \Omega$  阻尼电阻时的仿真结果如图 9~10 所示，图中左侧曲线为回路电流  $i(t)$ ，右侧曲线为电容电压  $u_C(t)$ 。图中各条曲线的起始处为本曲线的零点，具体波形数据参见表 3。比较图 6 和图 9、图 7 和图 10 可知，仿真波形和试验波形基本一致。对照表 2 和表 3 可知，仿真结果和试验数据也比较相近，电压幅值的相对误差不超过 5%，首峰值时间误差不

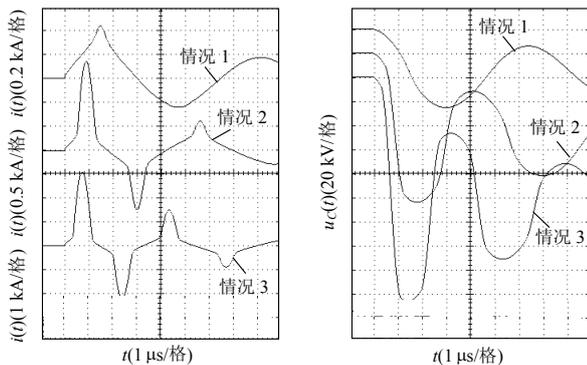


图 9 仅安装磁环串时的仿真波形

Fig. 9 Simulation results when only magnetic rings are used

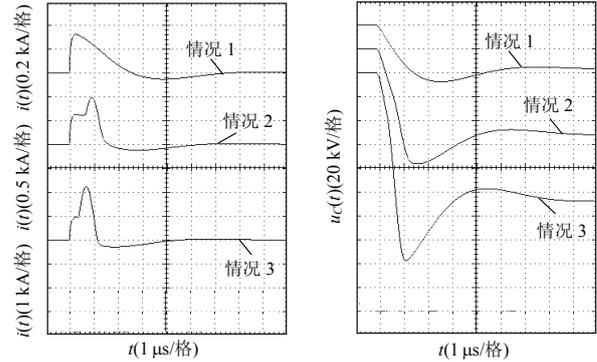


图 10 安装磁环串和  $125\ \Omega$  阻尼电阻时的仿真波形

Fig. 10 Simulation results when magnetic rings and  $125\ \Omega$  damping resistance are used

表 3 振荡回路试验的仿真结果

Tab. 3 Simulation results of oscillation circuit test

电容充电 电压/kV	最大电流峰值/kA		最大电压峰值/kV		首个 1/4 周期/ $\mu\text{s}$	
	情况 2	情况 3	情况 2	情况 3	情况 2	情况 3
36.5	0.44	0.34	64	48	2.8	2.3
71.3	1.85	0.95	124	98	1.8	1.7
106.8	3.00	2.20	186	156	1.4	1.1

注：情况 2—仅加磁环串的情况；情况 3—同时加磁环串和阻尼电阻的情况。

超过  $0.3\ \mu\text{s}$ 。仿真波形和试验波形也存在一些差别。从电流波形来看，磁环在仿真中的饱和程度比试验中稍微严重一些。原因是在建立磁环串非线性电感模型时，为计算简便，对产品样本给出的磁化曲线进行了简化，忽略了磁滞的影响。但总体来看，仿真计算中所采用的磁环模型基本符合实际工作情况，满足工程仿真的要求。

## 4 应用仿真

为分析高频磁环并联阻尼电阻抑制变电站雷电过电压的效果，利用第 3 节所建立的高频磁环的仿真模型，针对某实际 220 kV 变电站进行了仿真计算，分析了磁环和电阻参数及安装位置对雷电过电压抑制效果的影响。图 11 为该变电站的电气主接线，图中标注了设备间的连线长度。该变电站为双母线( $M_1$  和  $M_2$ )接线方式，有 220 kV 主变 2 台，220 kV 进出线 3 回，各进出线线路端口和各变压器端口安装有避雷器(metal oxide arrester, MOA)。

仿真参数：架空导线双分裂，分裂间距 300 mm，计算直径 26.8 mm， $20^\circ\text{C}$  直流电阻  $0.074\ \Omega/\text{km}$ ；避雷线计算直径 13.6 mm， $20^\circ\text{C}$  直流电阻  $0.41\ \Omega/\text{km}$ ；进线线路长度选择足够长，避免远端反射波的影响。变电站内导线采用无损阻抗模型，波阻抗为  $362\ \Omega$ 。杆塔采用多波阻抗模型<sup>[15-16]</sup>，杆塔接地电阻  $10\ \Omega$ 。绝缘子串闪络采用压控开关模型，220 kV 绝缘子串的 50% 冲击放电电压为 1 300 kV。变压器

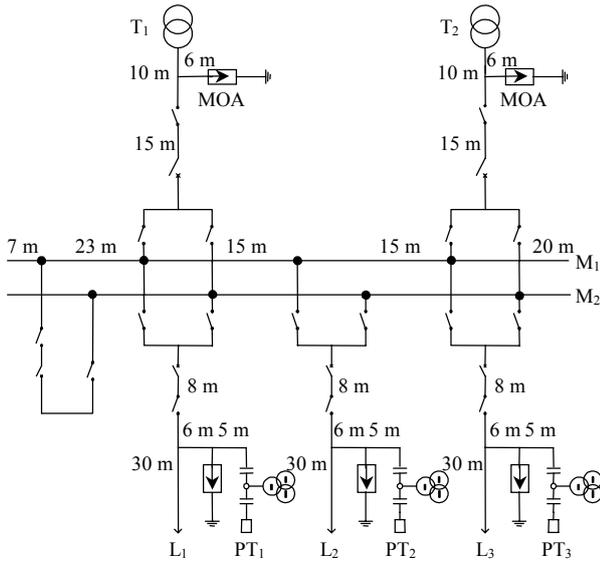


图 11 某 220 kV 变电站电气主接线

Fig. 11 Diagram of the main circuit of a 220 kV substation

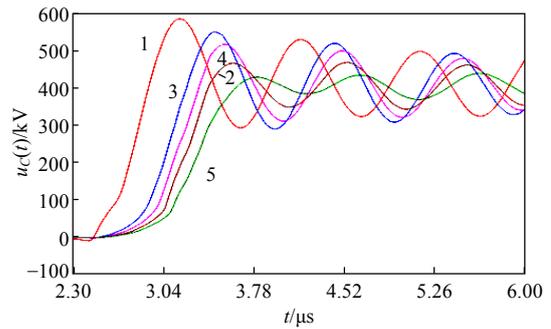
和电容式电压互感器用等值端口电容等效, 变压器等值入口电容 2 000 pF; 电容式电压互感器等值入口电容 5 000 pF。线路和主变避雷器为相同类型氧化锌避雷器, 额定电压 200 kV, 10 kA 雷电冲击电流残压峰值 496 kV。雷击点雷电流幅值 120 kA, 波形参数 2.6/50  $\mu\text{s}$ , 主放电通道波阻抗 400  $\Omega$  [17]。

仿真时选择变电站运行方式为过电压最严重的单线(L<sub>1</sub> 出线)单变(T<sub>1</sub> 主变)运行方式, 考虑雷击出线 L<sub>1</sub> 上的杆塔, 反击绝缘子串产生闪络, 雷电波沿线路侵入变电站。为控制磁环串总体造价, 仿真时取磁环串体积为一定值 0.039 m<sup>3</sup>, 在该条件下比较磁环串内外径和长度变化对雷电过电压抑制效果的影响。

仿真结果表明, 高频磁环串并联阻尼电阻后对雷电过电压的抑制效果优于单独的高频磁环串。磁环串安装于避雷器和母线之间的抑制效果优于安装于避雷器和变压器之间。在磁环串体积的前提下, 细长形状的磁环串抑制效果优于短粗形状的磁环串, 与磁环串并联的阻尼电阻存在最优值。

仿真结果还表明, 无磁环串、仅由避雷器进行保护时, 变压器处雷电过电压幅值为 581.9 kV, 波前陡度为 1 000.3 kV/ $\mu\text{s}$ 。图 12 和表 4 为仅安装高频磁环串时的仿真结果。图中各曲线对应磁环串的形状不同, 但体积均为 0.039 m<sup>3</sup>。可以看出, 曲线 5 由于使用的是最为细长的磁环串, 雷电过电压的抑制效果最好, 无论过电压的幅值还是陡度均得到了最大程度的抑制。

尺寸为 40 mm×60 mm×25 m 的磁环串安装于避雷器和变压器之间的进一步仿真结果如图 13 和



各曲线对应磁环尺寸(内径×外径×长度):

- 1—无磁环; 2—40 mm×80 mm×10.4 m; 3—80 mm×100 mm×13.9 m;
- 4—60 mm×80 mm×17.9 m; 5—40 mm×60 mm×25 m。

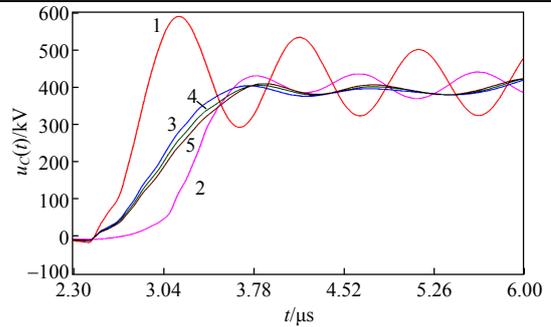
图 12 磁环形状对过电压抑制效果的影响

Fig. 12 Influence of magnetic rings' size on overvoltage suppression effect

表 4 仅安装高频磁环时的过电压抑制效果

Tab. 4 Overvoltage suppression effect when only high frequency magnetic rings are used

磁环尺寸 (内半径/mm)×外半径 /mm)×长度/m)	电压 幅值/kV	电压幅值 下降比例/%	波前陡度/ (kV· $\mu\text{s}^{-1}$ )	波前陡度 下降比例/%
无	581.9	—	1 000.3	—
20×40×10.4	464.6	20.1	730.2	27.0
40×50×13.9	544.5	6.4	892.6	10.8
30×40×17.9	513.6	11.7	836.3	16.4
20×30×25.0	430.6	26.0	540.6	45.9



- 1—无保护; 2—一只加磁环串; 3—磁环串并联 600  $\Omega$  阻尼电阻;
- 4—磁环串并联 700  $\Omega$  阻尼电阻; 5—磁环串并联 800  $\Omega$  阻尼电阻。

图 13 变电站变压器雷电过电压仿真结果

Fig. 13 Simulation results of lightning overvoltage in a substation

表 5 所示。仿真结果表明, 在上述磁环条件下, 若取并联电阻为 600~1 000  $\Omega$ , 变压器雷电过电压幅

表 5 高频磁环并联阻尼电阻后过电压的抑制效果

Tab. 5 Overvoltage suppression effect when high frequency magnetic rings and damping resistance are used

阻尼电阻/ $\Omega$	电压 幅值/kV	电压幅值 下降比例/%	波前陡度/ (kV· $\mu\text{s}^{-1}$ )	波前陡度 下降比例/%
无	430.6	26.0	540.6	45.9
400	424.7	27.0	516.9	48.3
500	404.9	30.4	467.3	53.3
600	400.9	31.1	414.9	58.5
700	402.4	30.8	377.3	62.3
800	406.4	30.1	363.0	63.7
900	410.1	29.5	360.1	64.0
1 000	413.0	29.0	362.2	63.8

值下降约 30%、波前陡度下降约 60%。可见, 只要参数选择适当, 使用高频磁环并联阻尼电阻抑制雷电过电压是可行的, 与避雷器配合使用可以取得较好的保护效果。

## 5 结论

1) 在振荡回路的试验中, 高频磁环串和阻尼电阻对振荡波形的影响显著, 降低了振荡频率并增加了衰减速度。建立的高频磁环 EMTP 仿真模型基本符合实际情况。

2) 对某 220 kV 变电站使用高频磁环并联阻尼电阻抑制变压器雷电过电压的仿真表明该方法有效、可行的。在实际变电站应用时, 要根据实际条件, 综合考虑造价、允许安装的尺寸等因素设计磁环串的几何参数。根据具体电路结构和参数, 优化安装位置和阻尼电阻的取值。

## 参考文献

- [1] 李汉明, 陈维江, 张翠霞, 等. 多雷地区 110kV 和 220kV 敞开式变电所的雷电侵入波保护[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 39-43.  
Li Hanming, Chen Weijiang, Zhang Cuixia, et al. Incoming lightning protection for 110 kV and 220 kV open-air substations at lightning intensified area[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 39-43(in Chinese).
- [2] 刘青. 宝能 220kV GIS 变电站雷电侵入波过电压的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 142-144.  
Liu Qing. Research on lightning intruding waves in 220 kV Baoneng gas insulated substation[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 142-144(in Chinese).
- [3] 甘凌霞, 李雷, 李景禄. 500 kV GIS 变电站雷电过电压保护研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 110-114.  
Gan Lingxia, Li Lei, Li Jinglu. Lightning over-voltage protection for 500 kV GIS substation[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 110-114(in Chinese).
- [4] 韩爱芝. 电力变压器综合防雷措施[J]. 变压器, 2010, 47(2): 61-63.  
Han Aizhi. Comprehensive measures of lightning prevention for power transformer[J]. Transformer, 2010, 47(2): 61-63(in Chinese).
- [5] 凌愫, 古正香. 1990—1994 年全国变压器事故统计及分析[J]. 电网技术, 1996, 20(9): 47-52.  
Ling Min, Gu Zhengxiang. Nation-wide fault statistics and analysis of transformers from 1990 to 1994[J]. Power System Technology, 1996, 20(9): 47-52(in Chinese).
- [6] 王梦云, 薛辰东. 1995~1999 年全国变压器类设备事故统计与分析[J]. 电力设备, 2001, 2(1): 11-19.  
Wang Mengyun, Xue Chendong. Nation-wide statistics and analysis on power transformers faults in 1995~1999[J]. Electrical Equipment, 2001, 2(1): 11-19(in Chinese).
- [7] 王梦云. 2004 年度 110 kV 及以上变压器事故统计分析[J]. 电力设备, 2005, 6(11): 31-37.  
Wang Mengyun. Statistics and analysis of 110 kV and the above transformer fault in 2004[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(11): 31-37(in Chinese).
- [8] Parrish D E. Lightning-caused distribution transformer outages on a Florida distribution system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(2): 880-887.
- [9] 朱维政. 110kV 六店变电所主变遭受雷击事故的分析[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 156-157.  
Zhu Weizheng. Analysis of 110kV main transformer subjected to lightning stroke[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 156-157(in Chinese).
- [10] 林春清, 周志强. 一起 220kV 变压器雷击损坏事故原因分析[J]. 变压器, 2008, 45(2): 48-50.  
Lin Chunqing, Zhou Zhiqiang. Reason analysis of lightning fault in 220kV transformer[J]. Transformer, 2008, 45(2): 48-50(in Chinese).
- [11] 刘卫东, 金立军, 钱家骊, 等. 铁氧体磁环抑制 GIS 的 VFTO 的可能性[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 22-25.  
Liu Weidong, Jin Lijun, Qian Jiali, et al. Possibility of suppressing VFTO in GIS by ferrite rings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 22-25(in Chinese).
- [12] 项祖涛, 刘卫东, 钱家骊, 等. 用磁环抑制 GIS 的 VFTO 的高电压模拟试验[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 1-3.  
Xiang Zutao, Liu Weidong, Qian Jiali, et al. High voltage simulation tests of suppressing VFTO in GIS by magnetic rings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 1-3(in Chinese).
- [13] 项祖涛, 刘卫东, 钱家骊, 等. 磁环抑制 GIS 中特快速暂态过电压的模拟试验和仿真[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 101-105.  
Xiang Zutao, Liu Weidong, Qian Jiali, et al. Simulation test and computation of suppressing very fast transient overvoltage in GIS by magnetic rings[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 101-105(in Chinese).
- [14] 董琴, 刘卫东, 孙会刚. 磁环抑制真空重燃过电压的陡度[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 1-3.  
Dong Qin, Liu Weidong, Sun Huigang. Steepness suppression of vacuum restriking overvoltage by magnetic ring[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 1-3(in Chinese).
- [15] Ito T, Ueda T, Watanabe H, et al. Lightning flashovers on 77kV systems: observed voltage bias effects and analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(2): 545-550.
- [16] Ametani A, Kawamura T. A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 867-875.
- [17] Martinez J A, Castro-Aranda F. Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2200-2210.



关永刚

收稿日期: 2010-06-30.

作者简介:

关永刚(1974), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事高压电器、故障电流限制器、过电压机制与防护等方面的研究, E-mail: guanyg@mail.tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 马晓华)