

# 基于磁环的输电线路雷击过电压抑制方法

周利军<sup>1</sup>,胡琛<sup>1</sup>,黄林<sup>1</sup>,王东阳<sup>1</sup>,吴统帅<sup>1</sup>,张栋<sup>1</sup>,陈斯翔<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756;2. 广东电网有限责任公司 佛山供电局,广东 佛山 528000)

**摘要:**提出一种基于磁环抑制的方法对输电线路进行雷击防护。首先采用曲线拟合得到磁环材料的磁化函数,进而基于微元法与电磁场理论计算建立了磁环的磁链计算模型,并利用有限元法(FEM)验证磁链计算模型的合理性;然后,利用磁环的磁链计算模型在ATP/EMTP中建立磁环电磁暂态模型,进而分析了不同磁环材料、磁环截面积、磁环长度及磁环形状对磁环抑制雷击过电压效果的影响。基于典型的110 kV输电线路对所提方法进行仿真。结果表明:磁环磁链计算模型与FEM计算结果最大误差低于5%,验证了所提方法的合理性;增加磁环的截面积和长度能加强磁环的雷击过电压抑制效果,但在外半径、长度分别取60 mm、6 m后出现了饱和现象。现场试验结果表明,安装磁环后,雷击过电压得到了有效的降低,仿真和试验结果之间的最大误差为5.92%,验证了所提磁环磁链计算模型、电磁暂态模型的正确性以及磁环抑制雷击过电压方法的可行性。

**关键词:**磁环;雷击过电压;防雷;ATP/EMTP;输电线路  
**中图分类号:**TM 86 **文献标志码:**A

DOI:10.16081/j.epae.202203027

## 0 引言

随着我国电力系统的迅速发展,输电线路长度不断增加,穿过雷击频繁、土壤电阻率高的地区的线路越来越多。根据电网的运行数据,绝大多数的输电线路跳闸事故是由雷击造成的,雷击引起的输电线路停电每年都给电力系统带来了巨大的经济损失及沉重的检修工作负担<sup>[1-4]</sup>。

为减少雷击跳闸事故的发生,众多防雷措施被应用到输电线路中,例如通过改造接地装置降低杆塔接地电阻、减小架空地线保护角、架设耦合地线、增加绝缘子片数和安装线路型避雷器等<sup>[5-8]</sup>,这些防雷措施的雷击防护效果各不相同,但是涉及的防雷改造工程的工程量及难度都较大,对已有输电线路进行防雷改造时容易浪费人力、财力<sup>[9]</sup>,故目前缺少施工简单且防雷效果较好的方法对已有的雷击跳闸率较高的输电线路进行防雷改造。在电力系统中,相关研究表明磁环可用于特快速暂态过电压(VFTO)的防护<sup>[10-17]</sup>。文献[10-11]提出利用铁氧体磁环抑制气体绝缘开关(GIS)中VFTO的方法,并通过低压试验验证了其可能性;文献[12]研究了铁氧体性能参数对抑制VFTO的影响,并提出一种能达到理想抑制效果的磁环尺寸计算方法;文献[13]利用高压模拟试验研究了3种磁环材料的VFTO抑制效果及材料磁饱和影响;文献[14]研究了利用磁环抑制特高压GIS设备中VFTO的可行性,并对比分析了铁氧体与非晶2种磁环材料的效果及差异;文献[15-17]

利用真型252 kV GIS试验平台进行高压对比试验,分析磁环的VFTO的抑制效果及其对VFTO波形主要参数的影响。考虑到磁环抑制GIS中VFTO的效果及VFTO与雷击过电压有一定相似性(电流幅值大且能量集中在高频)<sup>[16]</sup>,故此方法对于输电线路防雷有一定的借鉴意义。但与雷击过电压相比,VFTO的波形存在更多大幅振荡,其波头上升时间更短,可以短至几纳秒,因此本文针对磁环抑制雷击过电压的方法开展了相关研究。

本文提出一种基于磁环的输电线路雷击过电压抑制方法:首先采用曲线拟合得到磁环材料的磁化函数,进而基于微元法与电磁场理论计算建立了磁环的磁链计算模型,并利用有限元仿真验证了磁链计算模型的合理性;然后,利用磁环的磁链计算模型在ATP/EMTP中建立了磁环电磁暂态模型,进而分析了不同磁环材料、磁环截面积、磁环长度及磁环形状对磁环抑制雷击过电压效果的影响;最后,利用典型的110 kV同塔双回输电线路对所提方法进行现场试验。本文方法对于输电线路,特别是已有输电线路,实施相对简单,无须改变线路、杆塔、接地装置的固有结构,将磁环通过人工安装在避雷线上即可。

## 1 磁环的磁链计算模型

### 1.1 磁环饱和特性及其磁链计算模型

理论上,磁环能够抑制输电线路雷击过电压,其简易电路原理如图1所示。图中: $u$ 为磁环前的电压行波; $L_R$ 为安装磁环后避雷线相应位置的电感值; $Z$ 为磁环后的杆塔波阻抗; $u_z$ 为杆塔波阻抗首端电压,

其表达式如式(1)所示。

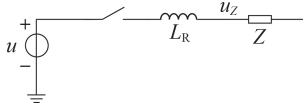


图1 磁环抑制的简易电路原理图

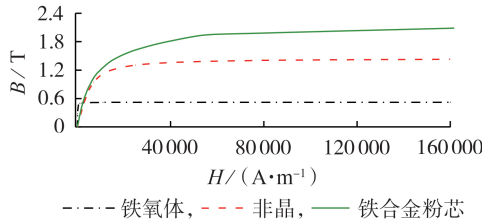
Fig.1 Simple circuit diagram of magnetic ring suppression

$$u_Z = u \left( 1 - \exp\left(-\frac{Z}{L_R} t\right) \right) \quad (1)$$

式中: $t$ 为时间。

若 $u$ 为无限长直角波,当其向磁环后传播时,由于电感 $L_R$ 的作用,此时 $u_Z$ 从0开始按指数规律上升,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $u_Z$ 的幅值达到 $u$ 的幅值;若 $u$ 不是无限长直角波,而是波长很短的电压行波(例如雷击过电压),则能在一定程度上降低 $u_Z$ 的幅值,使 $u_Z$ 的幅值小于 $u$ 的幅值<sup>[18]</sup>。

由于雷电流的幅值巨大且其能量主要集中于高频段,所以要求磁环材料具有高磁饱和特性和高工作频率,为此本文选取铁氧体、非晶和铁合金粉芯3种磁环材料,对应的磁化曲线如图2所示。图中: $B$ 为磁感应强度; $H$ 为外磁场强度。



--- 铁氧体, - · - 非晶, — 铁合金粉芯

图2 磁环材料的磁化曲线

Fig.2 Magnetization curves of magnetic ring materials

当磁环应用于抑制输电线路雷击过电压时,需要承受数千安培甚至数十千安培的雷电流,这必定会使磁环的大部分区域工作在磁饱和状态。文献[19]利用材料的磁导率得到磁环电感模型,而忽略了在大电流下磁环的饱和效应,这将导致雷击暂态响应计算不准确。

为了更加精准地建立适用于雷击时的磁环模型,需考虑磁环材料的饱和特性,即基于材料的磁化曲线建立模型。本文首先采用曲线拟合的方法得到磁环材料的磁化函数,如式(2)所示。

$$B = \frac{p_1 H}{p_2 + H} + \frac{p_3 H}{p_4 + H} + \frac{p_5 H}{p_6 + H} \quad (2)$$

式中: $p_1 \sim p_6$ 为磁环材料的磁化特性参数,具体数值见附录A表A1。

3种磁化材料的磁化曲线之间存在差异,其中铁氧体材料具有较高的初始磁导率,但是其饱和磁通密度及饱和磁化强度较低,而非晶和铁合金粉芯

材料的初始磁导率低,抗饱和性能更高,更适用于大电流下的防护。从表A1中的拟合结果可知,3种材料的磁化函数拟合确定系数 $R^2$ 均高于0.999,表明本文的磁化函数对磁环材料的磁化曲线的拟合程度较高。

图3为磁环模型示意图。图中: $I$ 为流经导线的电流大小; $l$ 为磁环长度; $R_1$ 为导线半径; $R_2$ 、 $R_3$ 分别为磁环内、外半径; $d\rho$ 为同心微元圆环的环宽; $\rho$ 为同心微元圆环内半径; $dS$ 为轴向长度为 $l$ 、宽为 $d\rho$ 的微元矩形; $B_r$ 为同心微元圆环处磁感应强度大小。本文基于式(2)所示的磁化函数,利用微元法得到考虑磁环饱和特性的磁环磁链计算模型,将磁环区域分为 $n$ 个环宽为 $d\rho$ 的同心微元圆环( $n \rightarrow \infty, d\rho \rightarrow 0$ )。

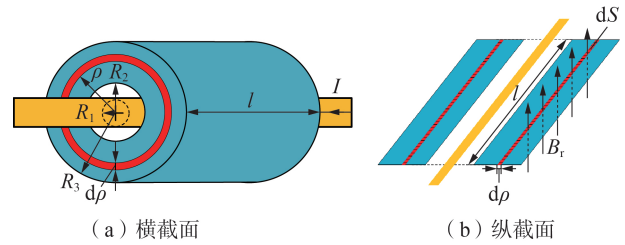


图3 磁环模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of magnetic ring model

根据安培环路定律可得同心微元圆环处磁场强度大小 $H_r$ 为:

$$H_r = \frac{I}{2\pi\rho} \quad (3)$$

同心微元圆环处磁感应强度大小 $B_r$ 与其内半径 $\rho$ 及流经导线的电流大小 $I$ 相关,将式(3)代入式(2)可得 $B_r$ 如式(4)所示。

$$B_r = \frac{p_1 I}{2\pi p_2 \rho + I} + \frac{p_3 I}{2\pi p_4 \rho + I} + \frac{p_5 I}{2\pi p_6 \rho + I} \quad (4)$$

穿过轴向长度为 $l$ 、宽为 $d\rho$ 的微元矩形的微元磁通 $d\Phi_r$ 为:

$$d\Phi_r = B_r dS = B_r l d\rho \quad (5)$$

积分可得磁环区域的磁链 $\psi_r$ 为:

$$\psi_r = \Phi_r = \int d\Phi_r = \int_{R_2}^{R_3} B_r l d\rho \quad (6)$$

将式(4)代入式(6)计算可得:

$$\psi_r = Il \left[ p_1 \ln \frac{I + 2\pi p_2 R_3}{I + 2\pi p_2 R_2} / (2\pi p_2) + p_3 \ln \frac{I + 2\pi p_4 R_3}{I + 2\pi p_4 R_2} / (2\pi p_4) + p_5 \ln \frac{I + 2\pi p_6 R_3}{I + 2\pi p_6 R_2} / (2\pi p_6) \right] \quad (7)$$

利用同样的方法计算得到导体区域的磁链 $\psi_c$ 、气隙区域的磁链 $\psi_g$ 分别如式(8)、(9)所示。

$$\psi_c = \frac{\mu_0 Il}{8\pi} \quad (8)$$

$$\psi_g = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (9)$$

式中： $\mu_0$ 为真空磁导率。

磁环模型的完整磁链 $\psi$ 包括 $\psi_c$ 、 $\psi_g$ 和 $\psi_r$ 三部分，如式(10)所示。

$$\psi = \mu_0 I l \left[ \frac{1}{8\pi} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{p_1 \ln \frac{I+2\pi p_2 R_3}{I+2\pi p_2 R_2}}{2\pi \mu_0 p_2} + \frac{p_3 \ln \frac{I+2\pi p_4 R_3}{I+2\pi p_4 R_2}}{2\pi \mu_0 p_4} + \frac{p_5 \ln \frac{I+2\pi p_6 R_3}{I+2\pi p_6 R_2}}{2\pi \mu_0 p_6} \right] \quad (10)$$

## 1.2 有限元法仿真验证

为验证磁环的磁链计算模型的正确性，本文采用有限元法FEM(Finite Element Method)进行对比验证。本文采用高精度有限元计算软件COMSOL Multiphysics建立磁环FEM模型，如附录A图A1所示。模型参数设置为：导线半径为6.18 mm，导线材料为铜；磁环的内、外半径分别为20、40 mm，长度为2 m。利用磁环FEM模型和磁链计算模型得到的3种材料磁环的完整磁链 $\psi$ 与 $I$ 的关系曲线如图4所示。

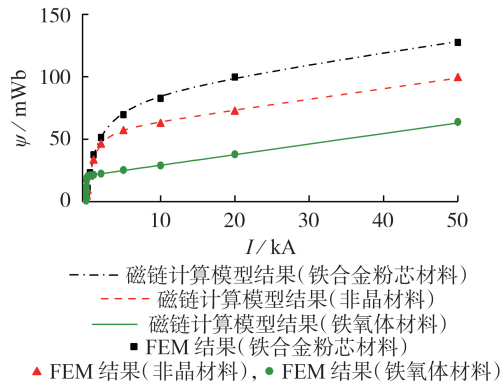


图4 FEM模型与磁链计算模型的计算结果对比  
Fig.4 Comparison of calculation results between FEM model and flux calculation model

3种材料的 $\psi$ - $I$ 曲线存在以下异同。

1)相同点：在小电流区域， $\psi$ 随着 $I$ 的增大而急剧增长，曲线较陡，曲线的斜率相对较大且基本不变；当 $I$ 增大到较大数值后，从磁环半径较小的区域开始出现一定的饱和，使得 $\psi$ - $I$ 曲线的斜率下降，曲线由陡转平；而在大电流区域，磁环的全部区域已基本饱和，此时 $\psi$ - $I$ 曲线的斜率也基本不变且数值较小。

2)主要不同点：同样的电流下，3种材料的完整磁链 $\psi$ 有所不同；3种材料的小电流区域、较大电流区域和大电流区域的范围各不相同，铁合金粉芯材料的小电流和较大电流区域比其他2种材料的范围

更广，意味着该材料在同样的电流下更不容易出现饱和现象，雷击过电压抑制效果更好。

FEM模型与磁链计算模型所得结果的误差对比见附录A表A2。由表可见，对于3种材料的磁环，FEM模型与磁链计算模型所得结果的平均误差均在2%以内，且最大误差未超过5%。考虑到材料的磁化函数并不能完全拟合材料的磁化曲线，上述误差在可接受范围内，故可以认为本文所提磁环磁链计算模型与FEM模型所得的结果较为吻合，从而有效验证了磁链计算模型的合理性。

## 2 磁环应用研究

为研究磁环的输电线路雷击过电压抑制效果，本文基于第1节的磁环磁链计算模型在电磁暂态仿真软件ATP/EMTP中建立磁环电磁暂态模型，将其应用于110 kV同塔双回输电线路电磁暂态仿真模型中<sup>[20]</sup>，分析不同磁环材料(铁氧体、非晶和铁合金粉芯)、磁环截面积、磁环长度以及磁环形状对输电线路防雷效果的影响。

### 2.1 输电线路电磁暂态模型

本文搭建的110 kV同塔双回输电线路模型为三基杆塔线路，其示意图见附录A图A2。将雷击点设置在第一基杆塔与第二基杆塔的档距中央，雷电流采用幅值为20 kA的2.6/50  $\mu$ s标准波形，雷电流通道的阻抗为300  $\Omega$ 。在电磁暂态仿真中，可利用非线性电感模拟磁环<sup>[21]</sup>，本文根据第1节提出的磁环磁链计算模型得到磁环的 $\psi$ - $I$ 曲线，将其应用于非线性电感中得到磁环电磁暂态模型。为准确计算雷电流波的折反射过程及雷击过电压，输电杆塔模型采用无损多波阻抗模型，该模型利用输电杆塔的几何参数计算其塔身、横担和支架波阻抗，且支架波阻抗为塔身的9倍<sup>[22]</sup>。仿真中的杆塔为110 kV双回输电杆塔，参数见附录A表A3。

### 2.2 磁环材料的影响分析

为便于比较铁氧体、非晶及铁合金粉芯这3种材料的雷击过电压防护效果，对3种材料的磁环均进行以下设置：内、外半径分别为20、60 mm，长度为4 m，安装位置为避雷线上与第一基杆塔和第二基杆塔的连接处。遭受雷击后，不同磁环材料下第一基杆塔塔顶电压波形如图5所示，具体分析如下。

1)与其他2种材料的磁环相比，铁氧体磁环对第一基杆塔塔顶过电压的抑制效果较差，在0.615  $\mu$ s前，铁氧体的磁饱和效应较弱，表现为其第一峰峰值较无磁环的峰值208.63 kV降低了25.58%。但在0.67  $\mu$ s后，由于雷电流继续上升，铁氧体磁环工作在其 $\psi$ - $I$ 曲线的大电流区域，此时磁环基本饱和，抑制作用基本失效，电压数值继续上升，电压峰值较无磁环时只降低了3.64%，电压波前上升陡度

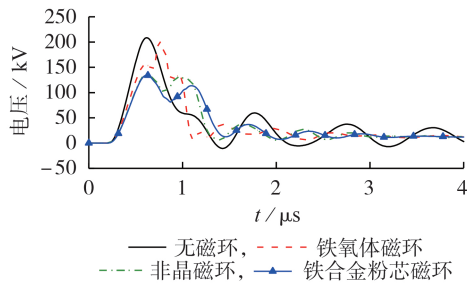


图5 不同磁环材料下第一基杆塔塔顶电压波形

Fig.5 Voltage waveforms at top of first tower with different magnetic ring materials

由无磁环时的  $339.24 \text{ kV} / \mu\text{s}$  下降为  $268.04 \text{ kV} / \mu\text{s}$ 。

2)非晶、铁合金粉芯磁环的电压峰值衰减幅度分别达到了  $34.48\%$ 、 $35.58\%$ ,波前上升陡度由无磁环时的  $339.24 \text{ kV} / \mu\text{s}$  分别下降为  $222.26$ 、 $218.52 \text{ kV} / \mu\text{s}$ 。这说明非晶与铁合金粉芯材料,尤其是后者对雷击过电压的抑制效果显著好于铁氧体材料,由此可见磁环材料的磁化曲线与饱和特性会显著影响磁环对雷击过电压的抑制效果。

由于铁合金粉芯材料的雷击过电压抑制效果在3种材料中最优,下文研究其他因素对磁环的雷击过电压抑制效果的影响时,均采用铁合金粉芯磁环。

### 2.3 磁环截面影响分析

将铁合金粉芯磁环的内半径、长度分别设置为  $20 \text{ mm}$ 、 $4 \text{ m}$ ,在  $30\sim 80 \text{ mm}$  范围内改变磁环的外半径从而改变其截面积,则不同磁环截面积下第一基杆塔塔顶电压波形图如图6所示。由图可见,磁环外半径越大,磁环对电压峰值的削弱效果越强,对后续波形振荡的消除效果越好,对雷击过电压的抑制效果越明显。

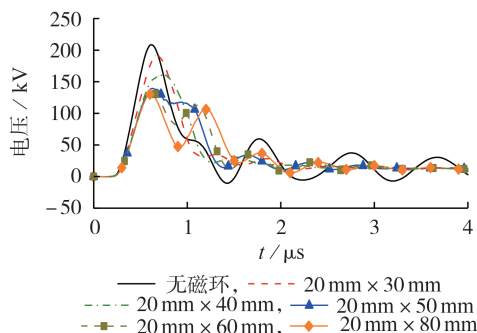


图6 不同磁环截面积下第一基杆塔塔顶电压波形

Fig.6 Voltage waveforms at top of first tower with different magnetic ring cross sections

当磁环外半径由  $30 \text{ mm}$  变化至  $40 \text{ mm}$  和  $50 \text{ mm}$  时,第一基杆塔塔顶电压迅速下降,峰值分别从无磁环时的  $208.63 \text{ kV}$  衰减为  $191.6$ 、 $161.64$ 、 $139.44 \text{ kV}$ ,抑制幅度分别达到  $8.16\%$ 、 $22.52\%$  和  $33.16\%$ ,电压波前上升陡度较无磁环时的  $339.24 \text{ kV} / \mu\text{s}$  分别下降为  $277.7$ 、 $229.28$ 、 $221.33 \text{ kV} / \mu\text{s}$ ,陡度下降速率也

较快。在  $60\sim 80 \text{ mm}$  范围内继续增加磁环外半径,磁环的雷击过电压抑制效果会继续增强,但是已经明显出现饱和,当磁环外半径分别为  $60$ 、 $80 \text{ mm}$  时,第一基杆塔塔顶电压峰值分别衰减为  $134.39$ 、 $130.64 \text{ kV}$ ,相比无磁环时分别下降了  $35.58\%$ 、 $37.52\%$ ,电压波前上升陡度分别下降了  $218.52$ 、 $211.97 \text{ kV} / \mu\text{s}$ ,与磁环外半径为  $50 \text{ mm}$  时相比,变化较微弱,这表明磁环外半径超过  $60 \text{ mm}$  后,磁环的雷击过电压抑制效果将逐渐出现饱和现象。

### 2.4 磁环长度的影响分析

将铁合金粉芯磁环的内、外半径分别设置为  $20$ 、 $60 \text{ mm}$ ,在  $2\sim 10 \text{ m}$  范围内改变磁环长度,仿真得到不同磁环长度下第一基杆塔塔顶电压波形图见附录A图A3。由图可见,当磁环长度为  $2$ 、 $4$ 、 $6$ 、 $8$ 、 $10 \text{ m}$  时,第一基杆塔塔顶电压峰值分别衰减为  $169.43$ 、 $134.39$ 、 $129.67$ 、 $127.23$ 、 $125.8 \text{ kV}$ ,较无磁环时分别降低了  $18.79\%$ 、 $35.58\%$ 、 $37.85\%$ 、 $39.02\%$ 、 $39.7\%$ ;电压波前上升陡度分别下降为  $242.04$ 、 $218.52$ 、 $212.57$ 、 $211.35$ 、 $209.67 \text{ kV} / \mu\text{s}$ 。由此可知,磁环长度对雷击过电压抑制效果的影响与磁环内半径类似,磁环长度越长,第一基杆塔塔顶电压峰值衰减越多,后续波形振荡越平缓,但磁环长度超过  $6 \text{ m}$  后磁环的雷击过电压抑制效果也逐渐饱和。

### 2.5 磁环形状的影响分析

在磁环实际应用时应考虑到使用相同体积的材料达到最佳的雷击过电压抑制效果,通过式(10)不难看出,相同体积下,不同形状的磁环  $\psi-I$  曲线一般不同,这将会影响磁环的雷击过电压抑制效果。以内半径为  $20 \text{ mm}$ 、外半径为  $40 \text{ mm}$ 、长度为  $4 \text{ m}$  的磁环的体积为基准,在  $30\sim 80 \text{ mm}$  范围内改变磁环外半径并计算对应的长度,仿真得到不同磁环形状下第一基杆塔塔顶电压波形图如附录A图A4所示。由图可见:在外半径  $80$ 、 $60$ 、 $50$ 、 $40$ 、 $30 \text{ mm}$  对应的5种磁环形状下,第一基杆塔塔顶电压峰值分别衰减为  $201.7$ 、 $192.19$ 、 $180.27$ 、 $161.64$ 、 $142.55 \text{ kV}$ ,电压波前上升陡度分别下降为  $301.04$ 、 $274.56$ 、 $246.95$ 、 $229.28$ 、 $212.76 \text{ kV} / \mu\text{s}$ ;雷击过电压抑制效果最差的磁环形状为“内、外环半径分别为  $20$ 、 $80 \text{ mm}$ ,长度为  $0.8 \text{ m}$ ”,对应的第一基杆塔塔顶电压峰值降低了  $3.32\%$ ,而效果最好的磁环形状为“内、外环半径分别为  $20$ 、 $30 \text{ mm}$ ,长度为  $9.6 \text{ m}$ ”,对应的第一基杆塔塔顶电压峰值降低了  $31.67\%$ 。由此可见,当磁环的体积一定时,磁环的截面积越小,磁环越细长,磁环抑制塔顶雷击过电压的能力越强。

## 3 现场试验验证

### 3.1 试验现场布置

为验证本文所提磁环磁链计算模型及电磁暂态

模型的正确性,开展110 kV同塔双回输电线路现场试验,将仿真结果与试验结果进行对比验证。试验现场为广东电网公司接地技术与工程实验室,试验现场及其布置图如附录A图A5所示。试验现场有三基杆塔,塔高为27 m,第一基杆塔与第二基杆塔的档距为120 m,第二基杆塔与第三基杆塔的档距为30 m。接地装置与试验现场接地网相连,利用红相HX-4051型雷电冲击电阻测试仪对现场杆塔的冲击接地电阻进行测量,测量示意图见附录A图A6。取3次测量的平均值,则三基杆塔的冲击接地电阻分别为1.61、1.56、1.54  $\Omega$ 。

现场试验方式与第2节类似,由冲击发生器产生幅值为20 kA的8/20  $\mu\text{s}$ 电流波并从第一基杆塔与第二基杆塔档距中央注入,测量第一基杆塔塔顶电压,试验时磁环装置采用多个磁环组成的磁环串的形式<sup>[21]</sup>,将之安装于避雷线上,因避雷线弧垂带来的重力水平分量及磁环串前的铜制卡扣使得磁环串能紧密贴合并固定在安装位置,并由高空施工人员确认磁环串中每个小磁环之间接触紧密无间隙。磁环串总长为4 m(由80个内半径为10 mm、外半径为40 mm、长度为50 mm的小磁环组成),安装磁环前后第一基杆塔塔顶电压波形的试验与仿真波形如图7所示。

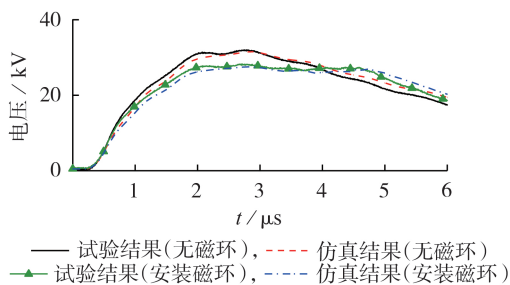


图7 安装磁环前后,第一基杆塔塔顶电压波形的试验与仿真结果

Fig.7 Test and simulative results of voltage waveform at top of first tower with and without magnetic ring

### 3.2 试验结果分析

在无磁环时,试验与仿真的第一基杆塔塔顶电压峰值的试验、仿真结果分别为31.83、31.33 kV,电压波前上升陡度分别为11.35、10.96 kV/ $\mu\text{s}$ ;安装磁环后,试验、仿真的电压峰值分别衰减为28.03、27.3 kV,比安装磁环前分别下降了11.94%、12.86%,电压波前陡度分别下降为10.31、9.7 kV/ $\mu\text{s}$ 。安装磁环前后,仿真与试验结果的最大误差为5.92%,这充分证明了本文所提磁环磁链计算模型和电磁暂态模型的正确性以及磁环抑制输电线路雷击过电压方法的可行性。

此外,雷击避雷线中央时,雷击点过电压较大,磁环抑制作用会使其过电压进一步上升,空气间隙

有击穿的风险,故本文针对该情况开展仿真研究,磁环参数设置与2.4节一致,雷击点波形图见附录A图A7。由图可见,安装磁环后雷击点附近的电压的上升幅度较安装前的上升幅度小(最大上升幅度为6.92%),远不足以击穿避雷线与最近相线的空气间隙使得防雷失败。针对磁环抑制方法的雷击过电压防护效果,第2节的仿真结果表明,磁环的雷击过电压抑制幅度最高可达39.7%,而文献[6]中接地电阻从30  $\Omega$ 降至15  $\Omega$ 后,塔顶电压下降了约43%,对比可知两者效果接近,但在实际改造中,降低接地电阻需要大幅增加杆塔接地装置尺寸或外引接地,工程量巨大,而磁环只需人工安装于杆塔避雷线附近即可,工程量小且实施简单,更适用于对已有输电线路的防雷改造。

## 4 结论

针对输电线路的雷击过电压防护,尤其是针对已有输电线路的防雷改造,本文提出利用磁环抑制雷击过电压的方法,主要结论如下。

1)根据材料的磁化函数能够较好地拟合铁氧体、非晶和铁合金粉芯磁环的磁化曲线,3种材料的磁化函数拟合确定系数 $R^2$ 均高于0.999;3种材料的磁环磁链计算模型与FEM模型的计算结果之间的最大误差低于5%,验证了本文所提磁环磁链计算模型的合理性。

2)磁环材料的磁化曲线会大幅影响磁环的雷击过电压抑制效果,3种材料中抗饱和性能更高的铁合金粉芯材料效果最佳;增加磁环截面积与长度能加强磁环的雷击过电压抑制效果,但随着参数增加会出现饱和现象,实际应用中磁环的外半径、长度分别取60 mm、6 m时效果最佳;磁环形状也对磁环的雷击过电压抑制效果有一定影响,体积一定时,细长形状磁环的雷击过电压抑制能力更强。

3)根据110 kV同塔双回输电线路的现场试验结果,安装磁环后第一基杆塔塔顶电压峰值下降了11.94%,这证明了磁环抑制输电线路雷击过电压的可行性;且仿真与试验结果的最大误差为5.92%,说明本文所提磁环磁链计算模型和电磁暂态模型较贴近实际情况。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 周利军,黄林,王路伽,等. 110 kV输电杆塔的多波阻抗建模与雷击暂态响应分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 158-164.  
ZHOU Lijun, HUANG Lin, WANG Lujia, et al. Multi-wave impedance modeling and lightning strike transient response analysis of 110 kV transmission tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 158-164.
- [2] 胡毅,刘凯,吴田,等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治

- 措施[J]. 高电压技术,2014,40(11):3491-3499.
- HU Yi, LIU Kai, WU Tian, et al. Analysis of influential factors on operation safety of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3491-3499.
- [3] 赵淳, 王佩, 郭钧天, 等. 基于雷电预警的UHVDC系统主动雷击防护策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 116-121.
- ZHAO Chun, WANG Pei, GUO Juntian, et al. Active lightning protection strategy based on lightning warning for UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 116-121.
- [4] 束洪春, 曹璞璘, 张广斌, 等. 雷电流波形参数检测视角下的 $\pm 800$  kV直流输电线路反击电磁暂态分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 1-9.
- SHU Hongchun, CAO Pulin, ZHANG Guangbin, et al. Electromagnetic transient analysis of back flashover in  $\pm 800$  kV DC transmission line to acquire lightning parameters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 1-9.
- [5] 司马文霞, 叶轩, 谭威, 等. 高海拔220 kV输电线路绝缘子串与并联间隙雷电冲击绝缘配合研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 168-176.
- SIMA Wenxia, YE Xuan, TAN Wei, et al. Lightning insulating coordination between insulator string and parallel gap device of 220 kV transmission line at high altitude area [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 168-176.
- [6] 彭向阳, 李振, 李志峰, 等. 杆塔接地电阻对同塔多回线路防雷性能的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3113-3119.
- PENG Xiangyang, LI Zhen, LI Zhifeng, et al. Influence of tower grounding resistance on lightning protection performance of transmission lines with multi-circuits on the same tower [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3113-3119.
- [7] 李瑞芳, 曹晓斌, 张先怡, 等.  $\pm 800$  kV / 500 kV交直流混联输电线路反击耐雷水平[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 101-106, 114.
- LI Ruifang, CAO Xiaobin, ZHANG Xianyi, et al. Back-flashover resistance level of  $\pm 800$  kV / 500 kV AC-DC hybrid transmission lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 101-106, 114.
- [8] 陆佳政, 谢鹏康, 方针, 等. 重覆冰条件下防冰防雷绝缘子电场仿真与伞裙优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 199-204.
- LU Jiazheng, XIE Pengkang, FANG Zhen, et al. Electric field simulation and sheds optimization of anti-icing and anti-lightning insulator under heavy icing condition [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 199-204.
- [9] 赵淳, 阮江军, 李晓岚, 等. 输电线路综合防雷措施技术经济性评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 290-297.
- ZHAO Chun, RUAN Jiangjun, LI Xiaolan, et al. Technology and economy evaluation of comprehensive transmission line lightning protection measures [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 290-297.
- [10] 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.
- [11] 金立军, 刘卫东, 钱家骊. 铁氧体磁环抑制GIS特快速暂态过电压研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(7): 1-3.
- JIN Lijun, LIU Weidong, QIAN Jiali. Research on the suppressing VFTO in GIS by ferrite ring [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(7): 1-3.
- [12] 金立军, 郑元兵, 彭格, 等. 抑制GIS中VFTO的铁氧体的特性研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(4): 7-10.
- JIN Lijun, ZHENG Yuanbing, PENG Ge, et al. Research on the ferrite for suppressing VFTO in GIS [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(4): 7-10.
- [13] 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.
- [14] 关永刚, 张猛, 岳功昌, 等. 磁环抑制特高压GIS设备中特快速暂态过电压的模拟试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 651-657.
- GUAN Yonggang, ZHANG Meng, YUE Gongchang, et al. Simulation test on suppressing VFTO in UHV GIS with magnetic-rings [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 651-657.
- [15] 关永刚, 郭珮琪, 陈维江, 等. 铁氧体磁环抑制252 kV GIS中VFTO的试验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1977-1985.
- GUAN Yonggang, GUO Peiqi, CHEN Weijiang, et al. Test study on suppressing VFTO in 252 kV GIS by ferrite magnetic rings [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1977-1985.
- [16] GUAN Yonggang, YUE Gongchang, CHEN Weijiang, et al. Experimental research on suppressing VFTO in GIS by magnetic rings [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2558-2565.
- [17] HE Jiaxi, GUAN Yonggang, CHEN Weijiang, et al. Experimental research and simulation on VFTO mitigation by ferrite rings in UHV GIS [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 940-948.
- [18] 吴广宁. 高电压技术[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2014: 164-166.
- [19] 曲振旭, 王巨丰, 苏浩益, 等. 应用高频磁环抑制GIS中特快速暂态过电压和雷电过电压仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 50-55, 60.
- QU Zhenxu, WANG Jufeng, SU Haoyi, et al. Analysis and simulation of an approach to suppress very fast transient overvoltage and lightning overvoltage in GIS by high frequency magnetic ring [J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 50-55, 60.
- [20] 杜林, 戴斌, 司马文霞, 等. 架空输电线路雷电过电压识别[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 590-597.
- DU Lin, DAI Bin, SIMA Wenxia, et al. Lightning overvoltage identification in overhead power transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 590-597.
- [21] 关永刚, 廖福旺, 岳功昌, 等. 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[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 149-154.
- GUAN Yonggang, LIAO Fuwang, YUE Gongchang, et al. An approach to suppress lightning overvoltage of transformer by high frequency magnetic ring with paralleled damping resistance [J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 149-154.
- [22] HARA T, YAMAMOTO O. Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(3): 283.

#### 作者简介:



周利军

周利军(1978—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电气设备状态检测与故障诊断(E-mail: ljzhou10@163.com);

胡琛(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为输电线路防雷(E-mail: chen\_hu\_swjtu@163.com)。

(编辑 任思思)

(下转第198页 continued on page 198)

## Research on power tracking excitation control system of dual-excited synchronous generator

XU Guorui<sup>1</sup>, WANG Zhenzhen<sup>1</sup>, LI Weili<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The DESG (Dual-Excited Synchronous Generator) adopting the traditional dual-channel excitation control system has long dynamic process time and large oscillation amplitude, which is not conducive to the stable operation of the power system. So the incomplete differential control is added to the power feedback loop of DESG, and an excitation control system with power tracking function is proposed. The incomplete differentiation is performed for the active power, reactive power and excitation current difference in the dynamic process of DESG, so as to judge the power change trend, and then adjust the ratio of  $d$ - and  $q$ -axis excitation current to change the direction of the excitation motive force, suppress the power oscillation and finally achieve the effect of increasing system damping. Taking the torque disturbance and reactive power disturbance as examples, the influences of the power tracking excitation control system and the dual-channel excitation control system on the oscillation amplitude and oscillation time in the dynamic process of DESG are compared. The results show that, the power tracking excitation control system can greatly reduce the oscillation amplitude and oscillation time of the system, effectively improve the system damping and provide strong support for the stable operation of the power system.

**Key words:** dual-excited synchronous generator; dual-channel control; power tracking control; incomplete differential control; excitation control

(上接第191页 continued from page 191)

## Lightning overvoltage suppression method based on magnetic ring for transmission line

ZHOU Lijun<sup>1</sup>, HU Chen<sup>1</sup>, HUANG Lin<sup>1</sup>, WANG Dongyang<sup>1</sup>, WU Tongshuai<sup>1</sup>, ZHANG Dong<sup>1</sup>, CHEN Sixiang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 528000, China)

**Abstract:** A method based on magnetic ring suppression is proposed for lightning protection of transmission line. Firstly, the magnetization function of magnetic ring material is obtained by curve fitting, and then the flux calculation model of magnetic ring is established based on infinitesimal method and electromagnetic field theory calculation. The rationality of the flux calculation model is verified by FEM (Finite Element Method). Then, the electromagnetic transient model of the magnetic ring is established in ATP/EMTP by combining the flux calculation model of magnetic ring, and the influence of different magnetic ring materials, magnetic ring cross sections, magnetic ring lengths and magnetic ring shapes on the effect of lightning overvoltage suppression is analyzed. The simulation of the proposed method is carried out based on a typical 110 kV transmission line. The simulation results show that the maximum error between the calculative results of flux calculation model and the FEM is less than 5%, which verifies the rationality of the proposed method. The increase of the cross section and length of the magnetic ring can enhance the suppression effect, but the saturation phenomenon will appear when the outer radius and length reach 60 mm and 6 m respectively. The result of field test show that after the magnetic ring is installed, the lightning overvoltage can be effectively reduced, and the maximum error between simulation and testing results is 5.92%, which verifies the correctness of the proposed flux calculation model and electromagnetic transient model of the magnetic ring and the feasibility of the proposed lightning overvoltage suppression method based on magnetic ring.

**Key words:** magnetic ring; lightning overvoltage; lightning protection; ATP/EMTP; transmission line

附录 A

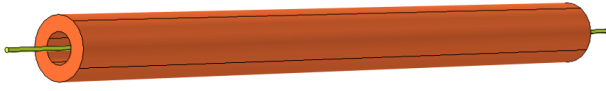


图 A1 磁环 FEM 模型

Fig.A1 FEM model of magnetic ring

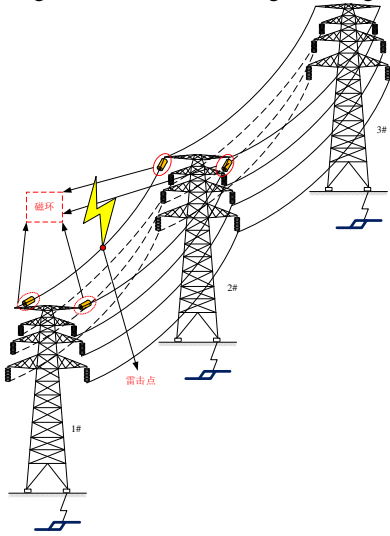


图 A2 输电线路示意图

Fig.A2 Schematic diagram of transmission line

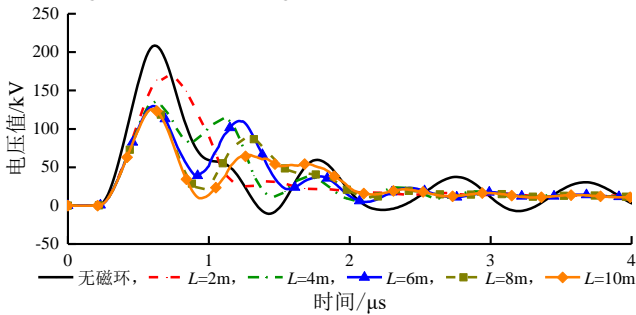


图 A3 不同磁环长度下第一基杆塔塔顶电压波形

Fig.A3 Voltage waveform at top of first tower with different magnetic ring lengths

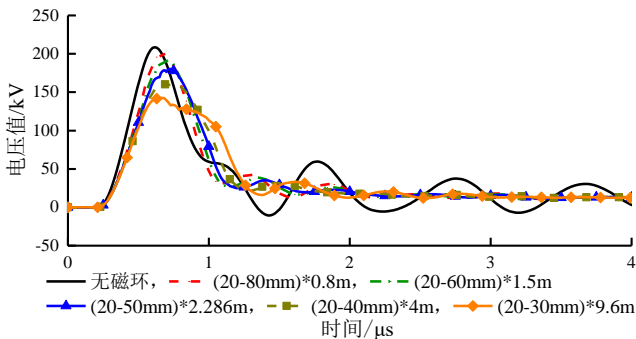
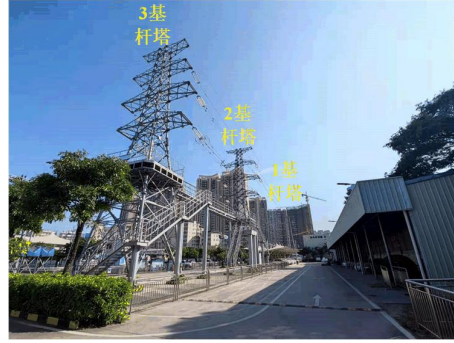
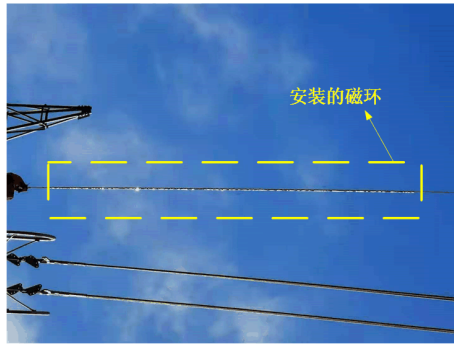


图 A4 不同磁环形状下第一基杆塔塔顶电压波形

Fig.A4 Voltage waveform at top of first tower with different magnetic ring shapes



(a) 试验现场



(b) 磁环布置图



(c) 第一基杆塔接线布置图

图 A5 试验现场及其布置图

Fig.A5 Test site and its layout



图 A6 试验现场冲击接地电阻测试

Fig.A6 Impulse grounding resistance test on test site



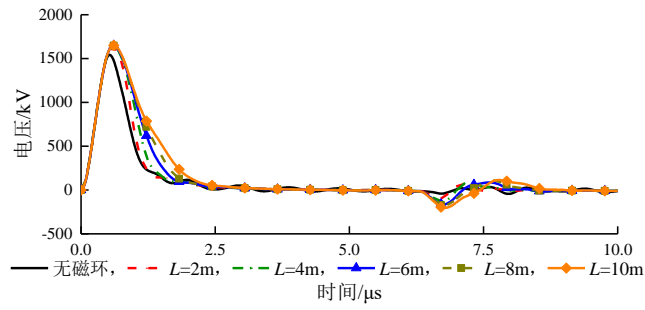


图 A7 不同磁环长度下雷击点电压波形

Fig.A7 Voltage waveform of lightning strike point with different magnetic ring lengths

表 A1 磁环材料磁化特性参数

Table A1 Magnetization characteristic parameters of magnetic ring materials

特性参数	铁氧体	非晶	铁合金粉芯
$p_1$	64.1139	4142.63	1.36726
$p_2$	107.474	4962.24	13443.8
$p_3$	-9.22765	-3296.55	1.39697
$p_4$	84.8019	4908.44	2602.61
$p_5$	-54.3686	-844.661	-0.541226
$p_6$	112.109	5179.52	1217.26
$R^2$	0.99982	0.99992	0.99966

表 A2 FEM 模型与磁链计算模型结果的误差对比

Table A2 Comparison of errors between FEM model and flux calculation model

磁环材料	平均误差/%	最大误差/%
1	1.379	3.308
2	1.83	4.463
3	1.317	3.210

表 A3 输电杆塔波阻抗参数

Table A3 Wave impedance parameters of transmission tower

杆塔分段	塔身波阻抗/ $\Omega$	横担波阻抗/ $\Omega$
1	110	225
2	96	203
3	84	176
4	70	152