

4-1-2022

Simulation analysis and experimental research on arc-extinguishing gap of 35 kV transmission line

Jiaqi KONG

College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China ; Fuzhou Power Supply Branch of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 344000, China

Zhijian XIA

Fuzhou Power Supply Branch of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 344000, China

Jufeng WANG

College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

Shuting CHEN

Guangxi Power Grid Company Limited Beihai Power Supply Bureau, Beihai 536000, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

KONG, Jiaqi; XIA, Zhijian; WANG, Jufeng; and CHEN, Shuting (2022) "Simulation analysis and experimental research on arc-extinguishing gap of 35 kV transmission line," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 37: Iss. 1, Article 24.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.024

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss1/24>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

35 kV 输电线路灭弧间隙的仿真分析与试验

孔佳琦^{1,2}, 夏志坚², 王巨丰¹, 陈舒婷³

(1. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 国网江西省电力有限公司抚州供电分公司, 江西 抚州 344000;
3. 广西电网有限责任公司北海供电局, 广西 北海 536000)

摘要:为解决 35 kV 输电线路普遍存在的雷害问题, 提出一种新型灭弧防雷间隙(NALPG)装置。首先, 为验证装置的可行性, 论述装置的熄弧原理, 研究电弧发展和熄灭的机理, 并借助电磁暂态计算软件(EMTP)搭建雷击 35 kV 输电线路模型来分析装置熄弧之后的暂态运行过程。通过仿真得知 NALPG 具有降低雷击过电压和削减谐波分量的能力。紧接着构建试验电路进行工频电弧截断试验, 得到整个熄弧时间仅需 4.0 ms, 且一段时间内电弧未重燃。防雷改造 NALPG 的实际挂网运行效果优异。

关键词:输电线路; 新型灭弧防雷间隙; 电磁暂态计算软件; 雷击过电压; 谐波

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.024 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2022)01-0202-09

Simulation analysis and experimental research on arc-extinguishing gap of 35 kV transmission line

KONG Jiaqi^{1,2}, XIA Zhijian², WANG Jufeng¹, CHEN Shuting³

(1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Fuzhou Power Supply Branch of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 344000, China; 3. Guangxi Power Grid Company Limited Beihai Power Supply Bureau, Beihai 536000, China)

Abstract: In order to solve the general lightning problems of 35 kV transmission lines, a new arc-extinguishing and lightning protection gap (NALPG) is proposed in this article. So as to verify the feasibility of the device, the principle of arc extinction of the device is discussed, and the mechanism of arc development and extinction is studied. Meanwhile, the electromagnetic transient calculation software is applied to build a 35 kV transmission line model of lightning strike to analyze the transient process of the device after arc quenching. Simulation results show that NALPG has the ability to reduce lightning overvoltage and harmonic components. Then, experimental circuit is constructed to conduct power frequency arc cut off test. The test results show that the entire arc extinction time is only 4.0 ms and the arc does not reignite for a period of time. Until now, the actual lightning protection effect of NALPG shows excellent results in line operation.

Key words: transmission line; NALPG; EMTP; lightning overvoltage; harmonic

全国范围内雷雨天气频繁发生, 由雷击引起的
电网安全事故日益增多, 特别是传统的 35 kV 输电
线路, 因绝缘水平普遍偏低, 加之很多线路又地处雷
害重灾区, 出现雷害状况更是严重^[1-2]。而这些发生

收稿日期: 2020-03-31; 修回日期: 2020-11-08

基金项目: 广西创新驱动和发展撰写资金项目(AA18242050)

通信作者: 王巨丰(1956-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代防雷技术研究; E-mail: 372308095@qq.com

故障的输电线路时常因雷击过电压及伴随的谐波问题导致线路电压增高、电力系统附加损耗上升、输电线路电压波形振荡畸变等严重情况,继而严重影响到变电站站内设备的安全运行、工业生产、人民的日常生活等^[3-9]。然而,传统的防雷手段如降低冲击接地电阻、架设避雷线、铺设耦合地线等,未能从根本上解决上述雷害问题^[10]。近些年,国内外学者提出了一些依靠绝缘配合诱导电弧的并联间隙防雷方式^[11-13],其中最常见的是排气式避雷器和角型避雷器。

排气式避雷器主要是利用灭弧间隙内电弧与产气管内产气材料接触所产生的气体来切断续流的一种避雷器^[14],结构原理如图 1 所示。当雷电击穿隔离间隙时,雷电顺势击穿灭弧间隙,雷电流沿着接地电极顺势流入大地,进而消除雷电过电压^[15]。被雷电击穿的灭弧间隙和隔离间隙在工频电源的作用下,工频续流电弧也随之产生,而灭弧间隙内的橡胶管在工频续流电弧的作用下受热分解出灭弧气体,在狭隘的灭弧间隙内突然出现灭弧气体,致使橡胶管内气压增大,最后从圆形电极方向喷出,从而破坏电弧的结构,致使电弧能在 3 个工频周期内熄灭^[16]。

排气式避雷器的灭弧能力受到工频续流的制约,其熄灭电弧的能力与工频电弧的大小有关。另外,橡胶管承担着产生灭弧气流以及直接作用电弧的作用,这对橡胶管本身的结构就是一个巨大隐患,即存在橡胶管炸裂的危险。因此排气式避雷器的相关标准早已作废,取而代之的是金属氧化物避雷器^[17]。

角型避雷器主要是由日本学者 Mikimasa Iwata 等专家联合电力公司研发的另一类气体灭弧防雷装置^[18]。角型避雷器的安装方式如图 2 所示。

该装置继承并联间隙的工作方式,当雷击时,由于并联间隙的雷电冲击击穿电压远远小于绝缘子串的雷电冲击击穿电压,确保闪络发生在并联间隙内。与并联间隙最大的不同之处在于角型避雷器的内部结构,如图 3 所示。绝缘筒体由聚酰胺树脂制成,当电弧进入绝缘筒体时,筒内的材料会分解出灭弧气体,并在筒内形成高压,使电弧沿绝缘筒体向外喷射而出,加速了电弧形态破坏,最终在一个工频周期内将电弧熄灭^[19]。

角型避雷器与排气式避雷器都是必须利用电弧的高温烘烤产生灭弧气体,即属于“被动式”灭弧^[20],产生灭弧气体的大小以及气体作用在电弧上的作用均受到电弧的影响,并且产气的次数以及效果还与产气材料有关,对约束条件还有待进一步考究。这 2 种方法确实在很大程度上保护了绝缘子免受电弧烧蚀,但因电弧不能得到快速熄灭(通常依靠电弧自熄灭)以及材料的消耗致使避雷器失去灭弧效果,电网安全依旧受到威胁。

针对上述存在的雷害难题及现有防雷措施存在的技术、无法主动灭弧的难点,基于“疏导型”防雷理

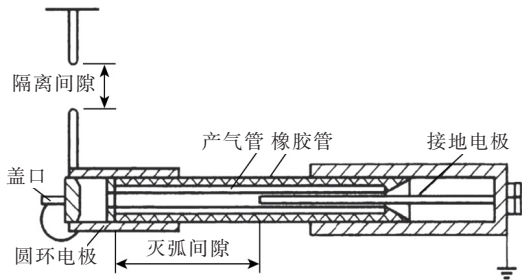


图 1 排气式避雷器的结构原理

Figure 1 Structural principle of exhaust type arrester

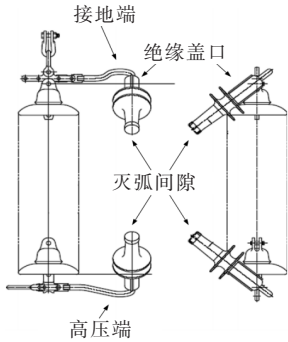


图 2 角型避雷器安装^[18]

Figure 2 Installation of angle arrester^[18]

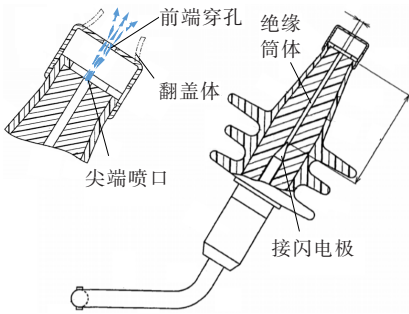


图 3 角型避雷器结构

Figure 3 Structure of angle arrester

念研制出了一种能主动熄弧的新型灭弧防雷间隙 (new arc-extinguishing and lightning protection gap, NALPG) 装置。该装置借鉴了并联间隙利用绝缘配合诱导电弧方式, 将电弧诱导至装置间隙, 利用其自主熄弧的优势来截断电弧, 从而迅速降低雷击形成的过电压, 削弱谐波引起的振荡, 为输电线路稳定运行提供了保障。

本文通过研究分析电弧的发展与熄灭机理, 并借助电磁暂态计算软件 (electro-magnetic transient program, EMT) 模拟线路安装 NALPG 后暂态稳定情况, 进行强气流截断工频电弧的试验, 统计 NALPG 在实际运行中的数据, 最终充分印证 NALPG 应用于 35 kV 输电线路的可行性。

1 装置的熄弧原理

NALPG 连接示意如图 4 所示。接地电极与灭弧装置之间电气连接, 可调节的高压电极、灭弧装置与绝缘子形成有效地绝缘配合, 当雷击时, 高压电极与灭弧装置之间形成的并联间隙的雷电冲击击穿电压远远小于绝缘子穿的雷电冲击击穿电压, 确保闪络发生在并联间隙内^[21], 整个装置通过导电连接体与绝缘子串并联连接。

NALPG 的内部结构如图 5 所示。当雷电流流经引弧电极时, 安装在引弧电极上的感应模块激发了气丸仓内的气丸爆炸, 并释放出强气流于灭弧筒内。由于产生强气流是在雷电流阶段, 而且强气流还作用在工频电弧发展的早期阶段, 因此加速了电弧的熄灭, 强气流加速了电弧的对流散热并抑制了电弧热量传导, 电弧能量不断消散, 最终在四分之一的周期内将电弧被截断, 间隙绝缘强度迅速恢复^[22]。

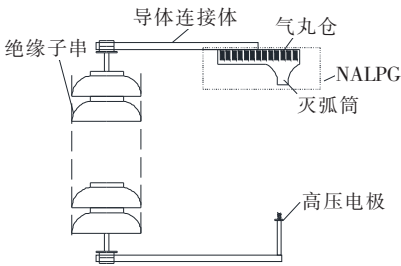


图 4 NALPG 连接

Figure 4 Connected schematic of NALPG

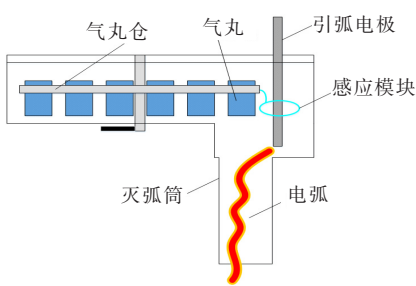


图 5 NALPG 内部结构

Figure 5 The internal structure of NALPG

根据上文气体灭弧中的管式避雷器、角型避雷器和 NALPG, 总结了当前利用气体灭弧的防雷装置的技术参数和特点, 如表 1 所示。

表 1 气体灭弧防雷技术的相关技术参数与特点

Table 1 Parameters and characteristics of gas arc-extinguishing protection technology

名称	灭弧时间	特点
排气式避雷器	3 个工频周期内	被动式灭弧, 熄弧能力受电弧大小制约
角型避雷器	1 个工频周期内	被动式灭弧, 产气受前期产气消耗内壁材料和电弧大小制约
NALPG	1/4 个工频周期内	主动灭弧, 气丸爆炸产生气流并且维持不受电弧制约

2 电弧的发展与熄灭

电弧等离子体在刚性的半封闭灭弧筒内与强气流耦合时, 将满足 Navier-Stokers 方程及电流守恒方程, 其控制方程^[23-26]如下。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程为

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] \tag{2}$$

能量守恒方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = \frac{\partial T}{\partial t} \left(\frac{5k_B T}{2q} \right) (\nabla T \cdot \mathbf{J}) + E \cdot \mathbf{J} + Q_{\text{rad}} \tag{3}$$

气体状态方程为

$$p = \beta \rho R T \tag{4}$$

电流守恒方程为

$$\begin{aligned} \nabla \cdot J &= 0 \\ J &= \sigma E \\ E &= -\nabla \varphi \end{aligned} \tag{5}$$

式(1)~(5)中 ρ 为密度; t 为时间; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; p 为压力; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; μ 为动粘度系数; J 为电流密度; T 为温度; E 为电场强度; k_B 为波尔兹曼系数; q 为电子电荷; c_p 为定压比热容; Q_{rad} 为辐射源项; φ 为电势。

分析式(3)可知,流体焓的变化等于对流散热、传导散热、辐射散热与电子焓传递、焦耳热之间的差值。其中焦耳热是流体温度升高的“症结”所在,这即是空气间隙因雷电冲击及工频续流产生电弧的原因。电弧温度下降与对流散热、传导散热、辐射散热密切相关,而辐射散热与电弧温度有关,无法人为干预^[27],那么可以通过利用气丸产生的强冲击气流来控制对流散热及传导散热,从而达到熄灭电弧并抑制雷击过电压的目的。

3 仿真设计

接下来借助 EMTP 仿真软件来验证 35 kV 输电线路杆塔遭遇雷击故障时,在安装有 NALPG 之后的暂态稳定情况。以上文论述的装置熄弧原理及电弧的发展与熄灭机理为基础建立电弧 EMTP 模型、NALPG 的 EMTP 模型及 35 kV 输电线路的 EMTP 仿真电路。

3.1 绝缘子串以及空气间隙的 EMTP 模型

结合作单位线路实际运行状况,仿真选用 3 片绝缘子,总长度为 480 mm。采用相交法确定雷电冲击下绝缘子串是否闪络^[28],相应的绝缘子串近似伏秒特性为

$$U_{\text{flash}} = 400 \times L + 710 \times \frac{L}{t^{0.75}} \tag{6}$$

式中 L 为绝缘子串总长度,mm; t 为从雷击持续时间, μs 。当绝缘子串两端电压大于 U_{flash} 时,绝缘子串发生闪络。

此外实验条件下测得当 NALPG 的空气间隙长度为绝缘子长度的 85% 时,能达到最佳的绝缘配

合^[29],再根据麦考林数据^[30]棒—棒电极间隙在正、负极性标准雷电波作用下,空气间隙的 50% 闪络电压正、负极性闪络电压分别为

$$U_{\text{CFO}}^+ = 60 + 581 \times l \tag{7}$$

$$U_{\text{CFO}}^- = 87 + 623 \times l \tag{8}$$

式(7)、(8)中 l 为空气间隙长度,mm。当空气间隙两端电压大于 U_{CFO}^+ 、 U_{CFO}^- 时,空气间隙发生闪络。

故此,式(6)作为不加装 NALPG 仿真电路中绝缘子串发生闪络的数学模型,式(7)、(8)作为加装 NALPG 仿真电路中空气间隙发生闪络的数学模型。

3.2 闪络电弧的 EMTP 模型

发生闪络既形成闪络通道,为简化这一过程,利用闪络电弧阻抗来表征,并在仿真中采用分段函数形式来模拟动态闪络电弧阻抗,并用 R_{arc} 表示。当绝缘子或空气间隙 2 端电压大于式(6)~(8)电压值时,绝缘子串或空气间隙发生闪络, R_{arc} 由 $10^{18} \Omega$ 变为 0.015Ω ^[31],得到如图 6(a)所示的逻辑关系,在 EMTP 中使用计算模型元件控制 R_{arc} 时变电阻,实现闪络过程,图 6(b)为仿真中闪络电弧对应的 EMTP 模型。

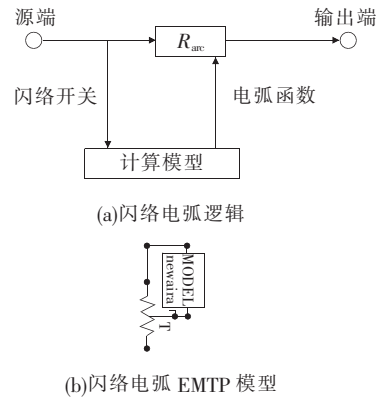


图 6 等值闪络电弧电路模型

Figure 6 Circuit model of equivalent flashover arc

3.3 NALPG 的 EMTP 模型

为建立 NALPG 的 EMTP 模型,在设计好的闪络电弧 EMTP 模型上增加熄弧过程,输出的闪络电弧阻抗依然采用分段函数实现。由于 NALPG 结构中的间隙长度为绝缘子串长度的 85%,即保证 NALPG 中的间隙优先绝缘子串击穿。此外,设击穿电流值为 i_{arc} ,形成的闪络电弧阻抗为 R_{arc} , R_{arc} 初值 0.015Ω ,当 $\partial i_{\text{arc}} / \partial t$ 大于设定值时,NALPG 发生动作,装置中的灭弧气丸发生爆炸而产生高速爆炸气流沿灭弧筒纵吹作用于电弧,空气间隙绝缘迅

速恢复,输出的 R_{arc} 变为 $10^{18}\ \Omega$,如图 7(a)所示的逻辑关系,同样利用计算模型元件控制 R_{arc} 时变电阻,得到图 7(b)仿真中 NALPG 的 EMTP 模型。

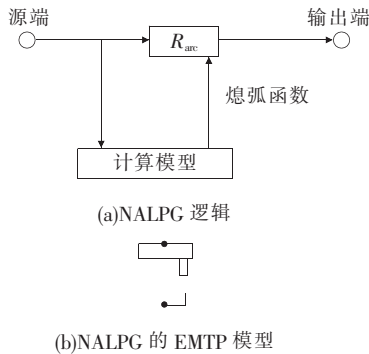


图 7 等值 NALPG 电路模型

Figure 7 Circuit model of equivalent NALPG

3.4 35 kV 输电线路的 EMTP 仿真电路

建立完上述模型之后再利用合作单位提供的该条 35 kV 线路参数建立 EMTP 仿真电路(以 6 基杆塔为例),得到如图 8 所示的仿真电路。其中情况 1 (不加装 NALPG 的暂态运行情况)的电路图是在图 8 的蓝框内嵌入图 6(b)的模型,情况 2(加装 NALPG 的暂态运行情况)的电路图是在图 8 的蓝框内嵌入图 7(b)的模型。具体仿真过程如下。

模拟稳态运行中的 35 kV 输电线路,在 $t = 10\text{ ms}$ 时, #4 杆塔塔顶突然遭受雷电冲击,对比加装与不加装 NALPG 情况下,输电线路的暂态稳定状况,仿真设置的雷电流幅值为 50 kA,仿真步长为 $5\times 10^{-6}\text{ ms}$,总运行时间为 30 ms。

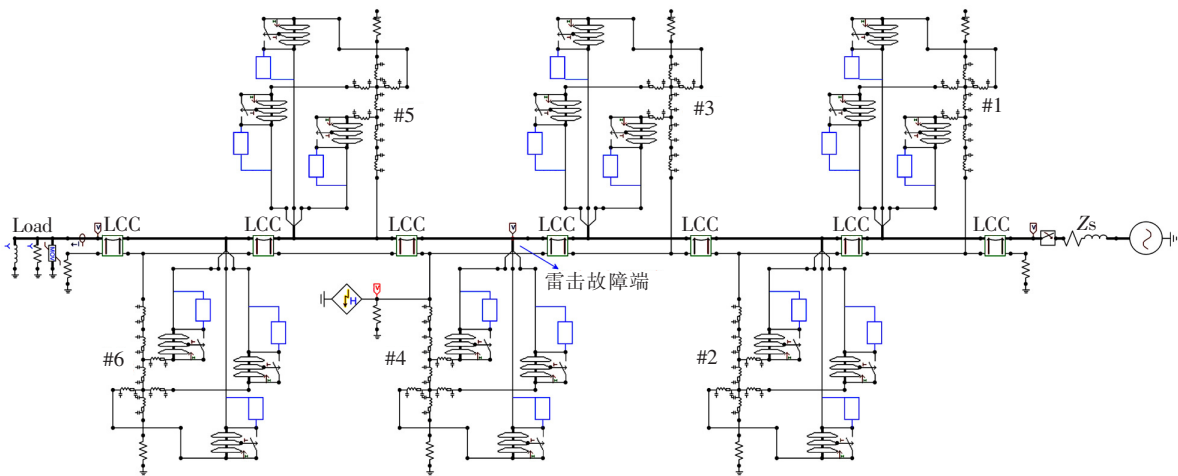


图 8 仿真电路

Figure 8 Simulation circuit diagram

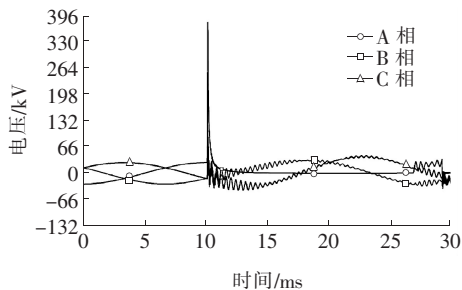
3.5 仿真结果及分析

图 9 为仿真得到的故障端各相在情况 1、2 条件下暂态运行电压的波形。其中,图 9(a)为不加装 NALPG 的暂态运行情况,图 9(b)为加装 NALPG 的暂态运行情况。对比分析图 9 可知,没有加装 NALPG 的输电线路在雷击杆塔瞬间,A 相绝缘子闪络击穿,继而引发 A 相出现了高达 383.16 kV 的过电压,形成的闪络通道又为后续工频电流提供了路径,致使 A 相出现了接地故障,与此同时,B、C 也因受到雷电脉冲及故障相(A 相)电磁耦合影响,出现了严重的波形畸变和振荡情况。然而,加装 NALPG 的输电线路运行情况却与之截然相反,雷击杆塔瞬间,NALPG 的空气间隙会优先于绝缘子

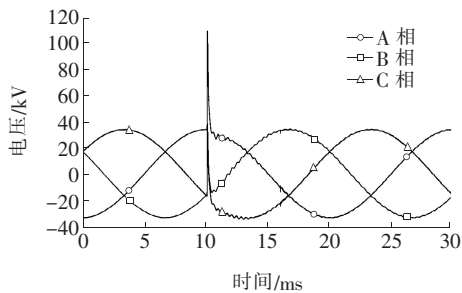
击穿,从图 9(b)波形图中可知,雷击初期受雷电流影响,虽然各相线路上出现了短暂的雷击过电压情况,但随着灭弧装置的迅速动作,强气流纵吹作用于不仅作用在雷电冲击电弧上还处在“萌芽期”的工频电弧,加快了电弧能量的消散,空气间隙的绝缘强度很快恢复,整个过程既保护了绝缘子免于电弧灼烧又快速疏导并抑制了输电线路上的雷击过电压及后续的工频电流,等到约 12 ms 左右,三相过电压及波形畸变情况基本消失,再到 16 ms 时波形振荡情况也基本消失,三相电压已恢复至稳态状况。

仿真中借助傅里叶变换进一步分析故障端(这里以较为严重的故障相 A 相为代表来展开分析)在情况 1、2 条件下的基波和谐波幅值,得到的结果如

图 10、11 所示。分析图 10 可知,由于雷电脉冲及后续工频续流能量未能得到及时消除抑制,引起的线路谐波次数高达 100 次,且谐波幅值大部分为基波幅值的 30%~70%,如此高的谐波分量就是线路电压出现畸形震荡的主要原因;图 11 为情况 2 的运行结果,由于 NALPG 的快速动作,截断雷电弧的同时又及时抑制了后续的工频续流,只存在少量的 2~12 次谐波,且谐波平均幅值只有基波幅值的 0.6% 左右,由此可见,加装 NALPG 之后,输电线路的谐波分量确实得到了一定程度的遏制。



(a) 不加装 NALPG 的暂态运行情况



(b) 加装 NALPG 的暂态运行情况

图 9 故障端三相暂态运行电压波形

Figure 9 Three-phase transient operating voltage waveform at the fault end

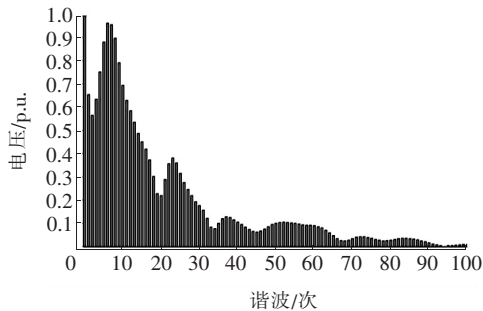


图 10 不加装 NALPG 故障相 A 相谐波分析

Figure 10 Harmonic Analysis of A fault phase without NALPG

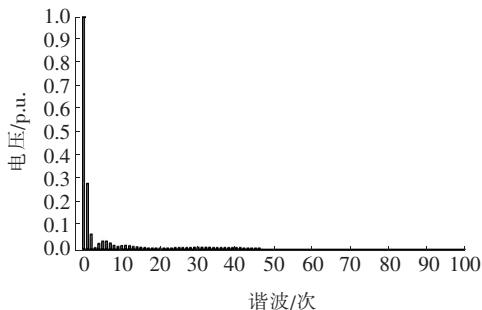


图 11 加装 NALPG 故障相 A 相谐波分析

Figure 11 Harmonic analysis of A fault phase with NALPG

4 熄弧试验

众所周知,雷电脉冲冲击时间很短,雷击杆塔引发绝缘子闪络最可怕的不是雷电形成的短暂电弧,而是后续的工频续流,而前文仿真很好地验证了 NALPG 成功动作之后线路暂态运行情况良好,但其中最关键的关键还是 NALPG 的熄弧能力。因此,为了检验 NALPG 熄灭工频电弧的能力进一步验证其科学性,对装置进行工频熄弧试验。图 12 是设计的试验回路。具体试验步骤如下。

1) 按试验回路图连接好电路,调节熔丝与高压电极之间的距离,打开高清摄像机准备对灭弧过程进行拍摄。

2) 接通试验电源,打开示波器,工频电流流经熔丝以及测量电阻 R_1 ,记录 R_1 的电压波形和 NALPG 触发脉冲波形,并在 $t=0$ ms 时合上手动开关 K_1 ,观察波形变化并记录灭弧时间。

高速摄像机拍摄的灭弧图像如图 3 所示,从 $t=0.01$ ms 开始,熔丝迅速熔断并快速形成光亮细长的弧光;0.5~1.0 ms 时,此阶段明显看见电弧上端弧光光圈变大迹象,说明此时间段 NALPG 已发生动作产生高速气流并作用于电弧;2.5~3.0 ms 时,电弧上端被完全切断并逐渐消失;3.5~4.0 ms 时,电弧上端再无连续弧光,间隙部分绝缘明显恢复,并且没有出现电弧重燃的现象。示波器采集到的熄弧动作波形如图 14 所示,其中 U_1 为测量电阻 R_1 的电压, U_2 为 NALPG 动作的触发脉冲电压,示波器显示每格为 5 ms。其中 $t=0$ ms 时,合上手动

开关 K_1 对应 M 点,开关合上后电弧形成并触发 NALPG 动作产生高速气流,气流纵吹作用于电弧,加速了带电粒子扩散和复合,最终电弧被截断,到达 N 点时,测得 R_1 两端电压为 0 V ,即交流电弧已熄灭,且后续未见重燃现象。

综上分析,装置的整个灭弧时间约 4 ms ,如此快速的熄弧时间才能为后续线路迅速恢复稳定运行提供可靠保障。

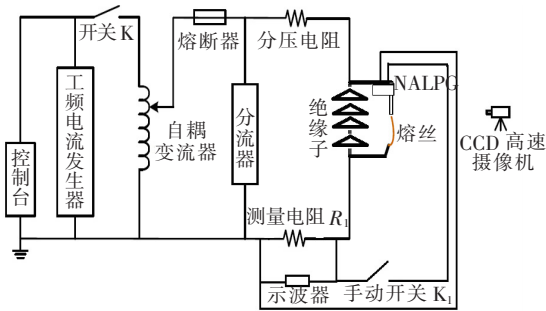


图 12 工频电流试验回路

Figure 12 power frequency current test loop

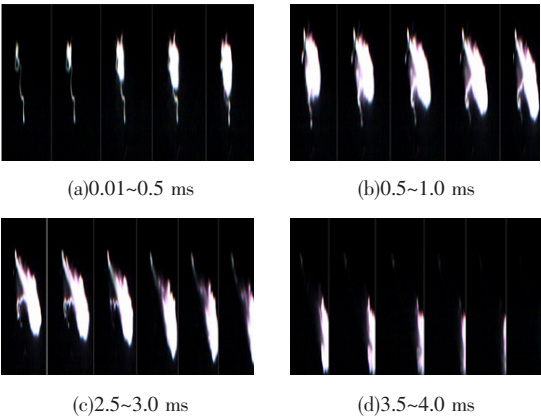


图 13 高速摄像机拍摄的电弧发展过程

Figure 13 Arc development process shot by high speed camera

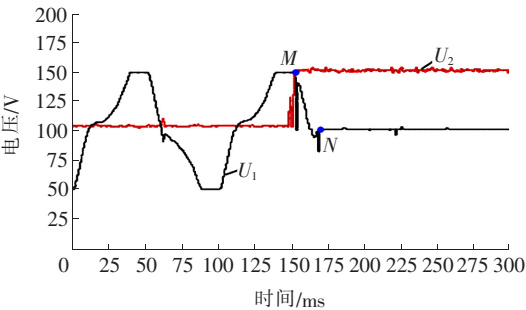


图 14 示波器采集到的熄弧动作波形

Figure 14 Arc-extinguishing waveform collected by oscilloscope

5 实际运行情况

合作单位的该条输电线路地处于喀斯特山区,属于雷害重灾区,并于 2015 年完成防雷改造,现场运行如图 15 所示。据合作单位反馈的运行数据可知,在安装 NALPG 之前,雷击跳闸率高达 $10\text{ 次}/100\text{ km}\cdot\text{雷电日}$,而安装 NALPG 之后未发生雷击跳闸事件,输电线路安全性明显加强,实际运行结果也进一步印证了仿真和试验的科学性,证明 NALPG 运用于 35 kV 输电线路是可行的。

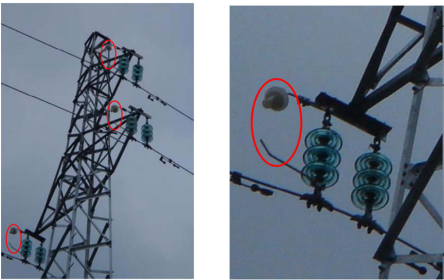


图 15 NALPG 实际运行

Figure 15 Actual operation diagram of NALPG

6 结语

1)仿真验证了拥有自主熄弧能力的 NALPG 完全具有降低雷击过电压和削减谐波分量的能力,截断工频电弧试验又再次论证了 NALPG 的可靠熄弧能力,而且整个熄弧时间仅需 4.0 ms ,为遭受雷害的输电线路能够迅速恢复稳定运行提供了保障。

2)NALPG 实际挂网运行结果优异,这也从侧面验证了仿真和试验结果,论证了 NALPG 运用于 35 kV 输电线路是可行的。

参考文献:

[1] 李经野,宋坤宇. 基于雷击故障辨识的 110 kV 输电线路故障巡线策略[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(2): 175-181.

LI Jingye, SONG Kunyu. Fault patrol strategy for 110 kV transmission line based on the lightning fault identification[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 175-181.

- [2] 马捍超,徐路强,高宝琪,等.不同地形地貌对超特高压输电线路防雷性能影响分析研究[J].电测与仪表,2019,56(23):37-42.
MA Hanchao, XU Luqiang, GAO Baoqi, et al. Analysis of the influence of different topography on lightning protection performance of UHV and EHV transmission line[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 37-42.
- [3] 喻莹. 220 kV 线路出线侧加装避雷器的必要性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(3): 136-139.
YU Ying. Necessity analysis for installed lightning arrester at the end of 220 kV transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(3): 136-139.
- [4] QIAN H, ZHAO R X, CHEN T. Inter-harmonics analysis based on interpolating windowed FFT algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 2(2): 1064-1069.
- [5] HARRIS F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. 1978, 66(1): 51-83.
- [6] KLINGSHIRN E A. High phase order induction motors part I: Description and theoretical considerations[J]. 1983, 102(1): 47-53.
- [7] 李国欣,费骏韬,朱堂宇,等.基于自适应变分模态分解的谐波检测算法[J].供用电,2021,38(11):1-8+13.
LI Guoxin, FEI Juntao, ZHU Tangyu, et al. Harmonic detection algorithm based on adaptive variational modal decomposition[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(11): 1-8+13.
- [8] 贺冬珊,文俊,耿晓红,等.含多电源的送端电网谐波综合特性研究[J].智慧电力,2020,48(2):1-8.
HE Dongshan, WEN Jun, GENG Xiaohong, et al. Research on Comprehensive harmonic characteristics of sending-end power grid with mul-tiple power sources [J]. Smart Power, 2020, 48(2): 1-8.
- [9] 阳登辉,朱明星,徐斌.孤网失稳状态下频率和暂态谐波分析方法[J].中国电力,2021,54(8):27-34.
YANG Denghui, ZHU Mingxing, XU Bin. An analysis method for frequency and transient harmonics of isolated network under instable condition[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 27-34.
- [10] 江进波,杨文,马可,等.220 kV 输电线路跨江段防雷措施研[J].高压电器,2020,56(01):141-147.
JIANG Jinbo, YANG Wen, MA Ke, et al. Study on lightning protection measures of 220 kV transmission line section across river[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 141-147.
- [11] 何金良,曾嵘,陈水明.输电线路雷电防护技术研究(三):防护措施[J].高电压技术,2009,35(12):2917-2923.
HE Jinliang, ZENG Rong, CHEN Shuiming. Lightning protection study of transmission line, part3: protection measures[J]. High voltage Engineering, 2009, 35(12): 2917-2923.
- [12] 司马文霞,张智,杨庆,等.110 kV 复合绝缘子棒形并联间隙工频电弧疏导过程的试验研究[J].中国电机工程学报,2012,32(31):114-121.
SIMA Wenxia, ZHANG Zhi, YANG Qing, et al. Experimental research on power frequency arc movement process of 110 kV composite insulations in rod shape parallel gap lightning protection devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 32(31): 114-121.
- [13] HORINOUCI K, NAKAYAMA Y, HIDAKA M, et al. A method of simulating magnetically driven arcs [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1997, 12(1): 213-218.
- [14] 徐友刚,沈晓峰,杨欢红,等.一种线路避雷器隐患查找用高压直流恒流源研制[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):160-166.
XU Yougang, SHEN Xiaofeng, YANG Huanhong, et al. Research and development of a high voltage DC constant current source for hidden fault detection of line arrester[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 160-166.
- [15] 刘宇晴,王晗钰,林子鉴,等.基于雷电记录与行波数据的雷击故障测距结果优化方法[J].电网与清洁能源,2021,37(1):1-7.
LIU Yuqing, WANG Hanyu, LIN Zijian, et al. Optimization method of lightning fault location results based on lightning records and traveling wave data [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 1-7.
- [16] 沈其工,方瑜,周泽存,等.高电压技术(第四版)[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [17] 赵智大.高电压技术(第三版)[M].北京:中国电力出

- 版社,2013.
- [18] OHTAKA T, KAMEDA H. Effective installation strategies of fault current interrupting arcing horns considering operational coordination with responses of line protection relays[J]. *Electrical Engineering in Japan*,2018,202(2):3-11.
- [19] CHINO T, IWATA M, IMOTO S, et al. Development of arcing horn device for interrupting ground-fault current of 77 kV overhead lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2005,20(4):2570-2575.
- [20] HUANG S, WANG J, LI Z, et al. Influence of an explosion air shock wave on arc quenching inside a cylinder[J]. *AIP Advances*,2020,10(2):025326.
- [21] DL/T 1293—2013. 交流架空输电线路绝缘子并联间隙使用导则[S].
- [22] WANG J, LIU J, WU G, et al. Research and application of jet stream arc-quenching lightning protection gap (JSALPG) for transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2015,22(2):782-788.
- [23] LEI L Z, GARIMELLA S V, CHAN S H. Gas dynamics and electromagnetic processes in high-current arc plasmas, part I. model formulation and steady-state solutions[J]. *Journal of Applied Physics*,1999,85(5):2540-2546.
- [24] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [25] FRETON P, GONZALEZ J J, GLEIZES A. Comparison between a two and a three-dimensional arc plasma configuration[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*,2000,33(19):2442-2452.
- [26] GHORUI S, HEBERLEIN J V R, PFENDER E. Thermodynamic and transport properties of two-temperature nitrogen-oxygen plasma[J]. *Plasma Chemistry & Plasma Processing*,2008,28(4):553-582.
- [27] 过增元,赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [28] HILEMAN A R. Insulation coordination for power system[M]. New York:Marcel Dekker,1999:58-67.
- [29] 王巨丰,郭伟,梁雪,等. 爆炸气流灭弧试验与灭弧温度仿真分析[J]. *高电压技术*,2015,41(5):1505-1511.
WANG Jufeng, GUO Wei, LIANG Xue, et al. Analysis of explosion airflow arc-extinguishing test and arc-extinguishing temperature simulation[J]. *High Voltage Engineering*,2015,41(5):1505-1511.
- [30] TERZIJA V V, KOGLIN H J. Long arc in free air: Testing, modelling and parameter estimation. I[C]// Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings, Orlando, USA: IEEE, 2000:404-409.
- [31] TERZIJA V, PRESTON G, POPOV M, et al. New static“airarc” EMTP model of long arc in free air[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2011,26(3):1344-1353.