

# 10 kV 配电变压器雷电过电压及其防治方法研究

雷 潇<sup>1</sup>, 兰 强<sup>2</sup>, 刘守豹<sup>3</sup>, 崔 涛<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041;

3. 大唐水电科学技术研究院有限公司, 广西 南宁 530007)

**摘要:** 10 kV 台区配电变压器是配电网最重要的设备之一,但在多雷区时常发生雷击损坏故障。根据台区典型设计和现场勘查结果,建立了雷电直击导线和雷电磁感应的电磁暂态仿真模型,分析了配电变压器高压侧绝缘的雷电过电压,结果如下:雷电直击导线后,变压器绝缘承受的电压为避雷器残压和接地引下线电压之和,过电压幅值极易超过标准雷电耐受电压 75 kV;雷电磁应的能量较小,过电压幅值超过标准雷电耐受电压的概率非常小。同时,研究了加装避雷线对雷电直击过电压的防治效果,发现避雷线可大大降低过电压幅值,若在此基础上缩短避雷器横担至变压器支架的电气距离,可大大降低变压器损坏概率。

**关键词:** 配电台区; 避雷器; 配电变压器; 雷电过电压

**中图分类号:** TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2020)02-0048-05

**DOI:** 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.02.010

## Research on Lightning Overvoltage of 10 kV Distribution Transformer and It Prevention Method

Lei Xiao<sup>1</sup>, Lan Qiang<sup>2</sup>, Liu Shoubao<sup>3</sup>, Cui Tao<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, Guangxi, China)

**Abstract:** Distribution transformer in 10 kV power distribution area is one of the most important equipment in distribution network. However, it is often be damaged by lightning in the area with more lightning activities. According to the typical design and the field investigation, the electromagnetic transient simulation model for lightning direct striking and lightning induction is established, and the lightning overvoltage of high voltage side insulation on distribution transformer is analyzed. The results are as follows: After lightning directly striking conductor, the voltage suffered by transformer insulation is the sum of the residual voltage of lightning arrester and the voltage of ground lead. The amplitude of overvoltage easily exceeds the standard lightning withstand voltage, which is 75 kV. Because the energy induced by lightning is small, the probability that overvoltage amplitude exceeding the standard lightning withstand voltage is very small. The preventive effect of adding lightning arrester on lightning direct overvoltage is studied. It is found that lightning arrester can greatly reduce the amplitude of overvoltage. If the electric distance between the arrester cross-arm and the transformer support is shortened on this basis, the probability of transformer damage can be greatly reduced.

**Key words:** distribution transformer service area; lightning arrester; distribution transformer; lightning overvoltage

## 0 引 言

雷击跳闸和设备损坏是多雷区 10 kV 配电网面临的主要问题<sup>[1-3]</sup>。在降低雷击跳闸率方面,目前

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助(川藏高海拔地区电网雷电基础参数综合分析与工程化应用研究)

已有大量研究,并取得了一定效果<sup>[4-6]</sup>。然而,配电网设备雷击损坏故障率仍然较高。台区配电变压器是配电网最重要的设备之一,其雷击损坏不仅造成经济损失,伴随而来的长时间停电还对供电可靠性有明显影响。

配电变压器雷击损坏主要原因是雷电过电压对

绝缘产生了永久性破坏。部分文献<sup>[7-9]</sup>研究了雷电过电压在高低压绕组间的传递,分析了变压器低压侧表计损坏的机理,但未研究变压器一次绕组绝缘承受的过电压,且以感应雷为主。而在山区和丘陵地区,位于山顶、山脊等区域的台区也有较大雷电直击风险。文献[10]对配电变压器在雷电直击和雷电感应两种情况下进行了过电压仿真,但雷电直击分析中未考虑避雷器。根据配电网典型设计要求<sup>[11]</sup>,台区需三相安装避雷器。但对各地市公司的调研发现,时常发生变压器雷击损坏而避雷器完好的情况。

针对上述问题,在台区防雷措施调研的基础上,开展了电磁暂态仿真,研究了雷电直击和雷电感应下变压器绝缘承受的过电压,并提出相应防治方法。

## 1 台区防雷设计

根据配电网典型设计,台区配电变压器仅由三相氧化锌避雷器保护。避雷器一般布置于10 kV导线下方4~8 m,配电变压器支架高3~4 m。避雷器横担接地引下线与变压器外壳接地引下线在杆塔某处汇接后入地,设计如图1所示。而根据现场勘查,

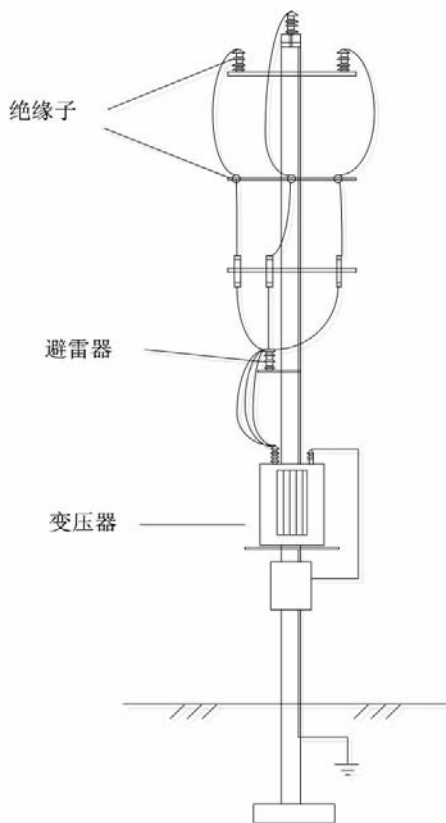


图1 避雷器与变压器相对位置

部分台区的布置受地形、施工条件及技术的影响,避雷器接地引下线至汇接点的距离具有一定分散性。一些台区的避雷器接地引下线甚至未与变压器接地引下线汇接,而是分别连接在接地装置上。避雷器在雷电过电压下动作时,接地引下线也会因流过雷电流而产生过电压,导致变压器绝缘承受的过电压大于避雷器残压。当变压器绝缘承受电压高于标准雷电耐受电压75 kV时,可能造成绝缘击穿。

## 2 仿真模型

为了研究台区配电变压器在雷电直击和雷电感应下的过电压,在ATP-EMTP中建立电磁暂态仿真模型。雷电流采用标准波形,即波前时间2.6 μs,半波时间50 μs。雷电直击仿真模型中的雷电流采用Heidler模型。雷电感应仿真模型中的过电压计算部分采用文献[12-13]的模块,如图2所示。

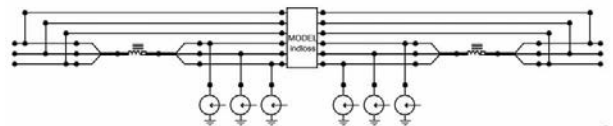


图2 感应过电压计算模块

台区杆塔设为13 m,三相导线成三角形排列。避雷器横担接地引下线与变压器支架连接后入地。变压器支架高3 m,避雷器横担距变压器支架分别设为2 m、4 m和6 m,以研究避雷器接地引下线长度对过电压的影响。接地引下线的电感设为0.8 μH/m。杆塔接地电阻为4 Ω。台区电路模型如图3所示,其中变压器绕组电路模型如图4所示<sup>[7]</sup>。10 kV避雷器伏安特性如表1所示<sup>[14]</sup>。

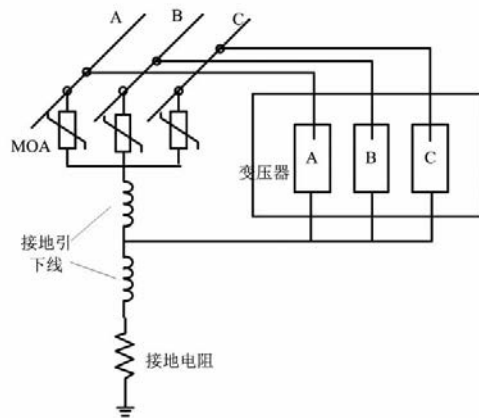


图3 台区模型

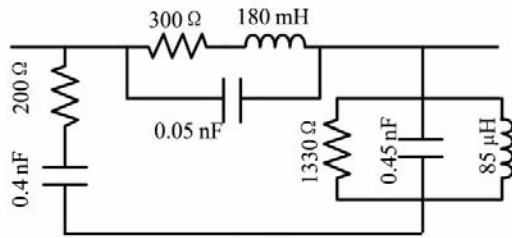


图4 变压器绕组模型

表1 10 kV 避雷器伏安特性

电压/V	电流/A
20 820	$0.9 \times 10^{-3}$
25 980	$1.2 \times 10^{-3}$
29 100	$0.6 \times 10^{-3}$
31 140	0.06
33 300	0.6
47 460	3000
51 000	6000
56 640	12 000

### 3 过电压分析

#### 3.1 雷电直击过电压

雷电直击过电压与雷电流幅值密切相关。以雷击中相导线且避雷器接地引下线至变压器支架距离  $d$  为 4 m 的情况为例,在雷电流幅值为 10 kA、20 kA 和 30 kA 时,变压器高压侧中相绕组对壳过电压如图 5 所示,其峰值分别为 67 kV、90 kV 和 113 kV。

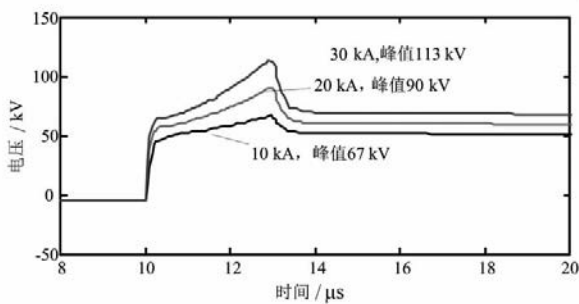


图5 变压器高压侧中相电压( $d$ 为4 m)

雷电流幅值 20 kA 下,变压器高压侧三相绕组对壳过电压如图 6 所示。未遭受雷击的相位承受过电压的峰值仅为 30 kV,且发生在 2.6  $\mu$ s 附近。遭受雷击相位的过电压峰值也出现在 2.6  $\mu$ s 附近。这是由于雷电流经过避雷器接地引下线时,接地引下线的等效电感产生了过电压,其极性与遭受雷击相位的避雷器一致。变压器中相绕组对壳电压即为

避雷器残压与接地引下线电感电压之和,如图 7 所示。避雷器在通过 20 kA 雷电流时的残压最大值为 60 kV,而接地引下线上的电压峰值为 30 kV。对于未遭受雷击的相位,避雷器在横担电位抬升后对导线反击,变压器绕组承受的电压为避雷器残压与接地引下线电压之差。

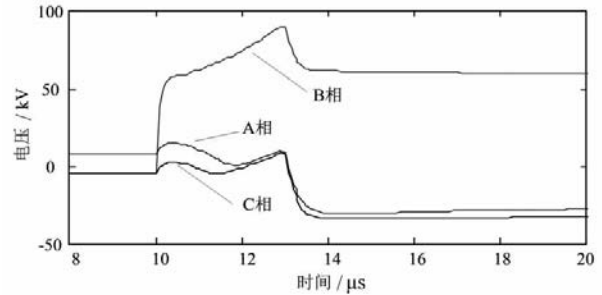


图6 变压器高压侧三相电压( $d$ 为4 m)

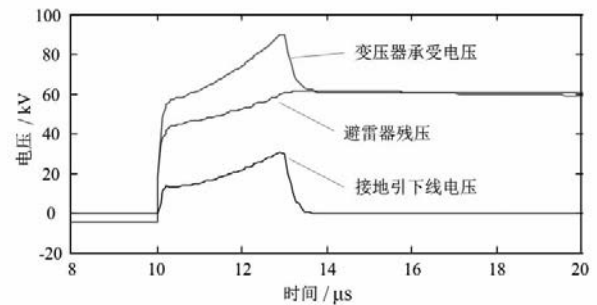


图7 变压器高压侧中相绝缘、避雷器、接地引下线的直击雷过电压( $d$ 为4 m)

不同接地引下线长度下,变压器绝缘承受过电压与雷电流幅值的关系如图 8 所示。雷电流幅值越高,过电压幅值越高。接地引下线越长,过电压幅值越高。当接地引下线为 6 m 时,使变压器过电压超过标准雷电耐受电压 75 kV 的雷电流幅值仅为 10 kA。而即使接地引下线为 2 m,使变压器过电压超过标准雷电耐受电压 75 kV 的雷电流幅值也仅为 20 kA。根据多雷区雷电流幅值概率分布,雷电流超过 20 kA 的概率达 59%。因此,10 kV 配电变压器在雷电直击台区时极易发生绝缘损坏。

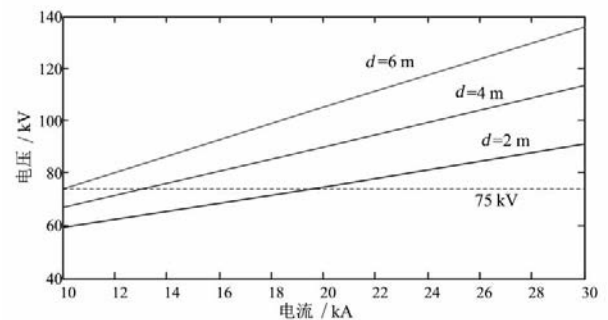


图8 变压器中相绝缘承受电压与雷电流的关系

### 3.2 感应雷过电压

为了防止线路末端的反射影响,将线路总长度设置为5 km,线路末端经与导线波阻抗等值的电阻接地。雷击点距离线路越近,感应雷过电压越大。一般认为线路附近65 m以内的雷击为直击雷,65 m以外为感应雷。这里将雷击点设置为台区65 m,以体现感应雷过电压最严苛的情况。

当接地引下线至变压器支架距离为4 m以及雷电流幅值分别为10 kA、60 kA和100 kA时,变压器绝缘承受的电压如图9所示。雷电流幅值越大,变压器绝缘承受电压越高。图10为雷电流幅值为100 kA的情况下,变压器绝缘、避雷器和接地引下线的电压。由于感应雷的能量比直击雷低,通过避雷器和接地引下线的电流较小,避雷器残压和接地引下线电电压均较低。可见,即使雷电流幅值高达100 kA,过电压也低于标准雷电耐受电压75 kV,感应雷过电压造成变压器绝缘损坏的概率非常小。

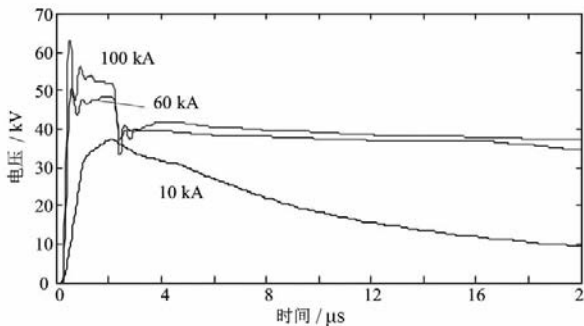


图9 感应雷下变压器高压侧中相电压( $d$ 为4 m)

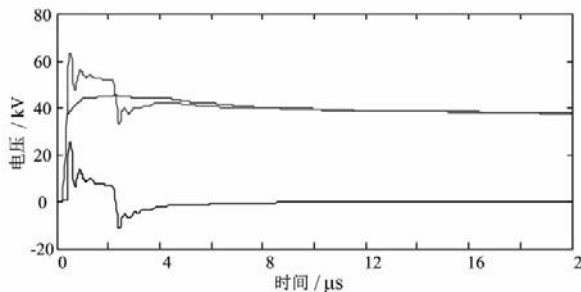


图10 变压器高压侧中相绝缘、避雷器、接地引下线的感应雷过电压( $d$ 为4m)

## 4 防治方法

由上节可知,雷电直击是导致变压器绝缘损坏的主要原因,可采用加装避雷线的方式进行防治。设避雷线在导线上方2 m以确保30°的保护角。在接地引下线至变压器支架距离为4 m的情况下,雷电直击避

雷线后,变压器中相绝缘承受电压波形如图11所示。雷电流较大时,过电压峰值出现在正极性,雷电流较小时则出现在负极性。这是因为避雷器残压与接地引下线电压极性不同所致。雷电流由杆塔接地引下线入地,使避雷器横担处电位抬升后导致避雷器动作,一部分雷电流由避雷器反送至10 kV线路。

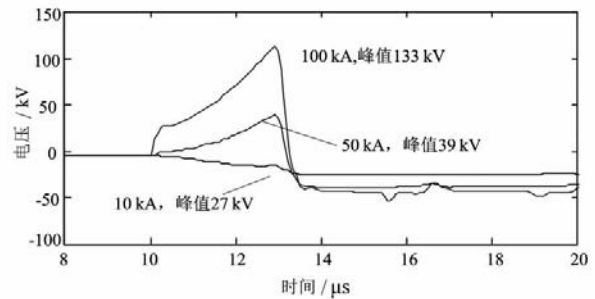


图11 有避雷线时变压器高压侧中相电压( $d$ 为4 m)

以雷电流幅值50 kA的情况为例,如图12所示,接地引下线上的电压峰值为78 kV,而避雷器残压为39 kV且与其极性相反,变压器绝缘承受电压则为两者之差,即39 kV。

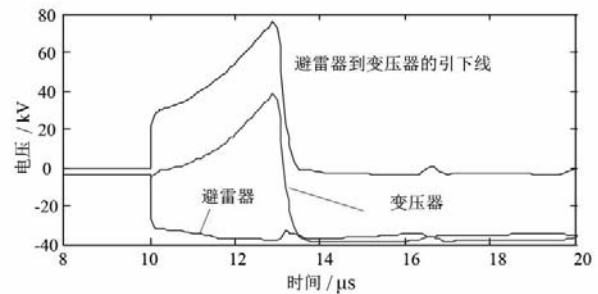


图12 有避雷线时变压器高压侧中相绝缘、避雷器、接地引下线的直击雷过电压( $d$ 为4m)

流过接地引下线和避雷器的雷电流与杆塔接地电阻有关。在雷电流幅值为50 kA、接地引下线为4 m的情况下,不同接地电阻的过电压如图13所示。接地电阻越大,过电压正极性峰值越低。这是由于经接地引下线入地的雷电流随接地电阻的增大而减小,导致接地引下线的正极性电压峰值降低。台区接地电阻的标准规定值为4 Ω,若接地电阻超过该值,变压器绝缘承受的电压反而更小。但不宜刻意增大接地电阻,以免避雷器流过电流过大而损坏。

不同接地引下线长度下,变压器绝缘承受过电压与雷电流幅值的关系如图14所示。当雷电流较小或接地引下线较短时,接地引下线的正极性电压峰值低于避雷器残压,变压器绝缘承受的电压不超过避雷器残压。当雷电流较大且接地引下线较长

时,接地引下线的正极性电压峰值高于避雷器残压,变压器绝缘承受的电压随雷电流幅值线性增大。

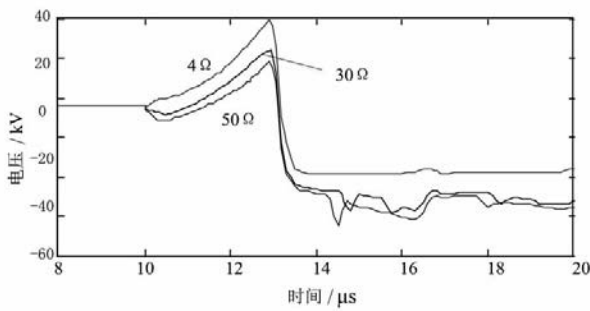


图13 有避雷线时变压器高压侧中相绝缘在不同接地电阻下的过电压( $d$ 为4 m)

当接地引下线为6 m时,使变压器过电压超过标准雷电耐受电压75 kV的雷电流幅值为50 kA,雷电流超过50 kA的概率为27%,而无避雷线时的概率为77%。当接地引下线为4 m时,过电压超过75 kV的概率仅为15%。而当接地引下线为2 m时,即使雷电流为100 kA,过电压也远低于75 kV。因此,台区加装避雷线后会大大降低变压器雷击损坏概率。

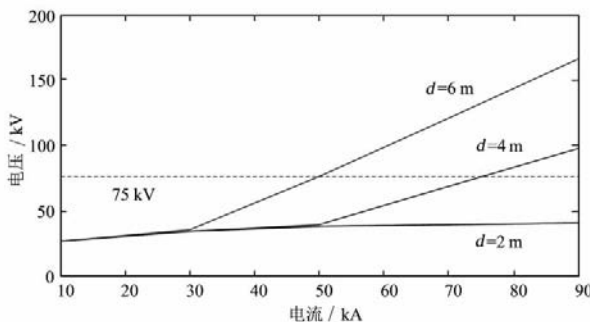


图14 有避雷线时变压器绝缘承受电压与雷电流的关系

## 5 结 语

为了降低10 kV配电变压器雷击损坏故障率,在建立了电磁暂态仿真模型的基础上,研究了变压器绝缘在雷电直击和雷电感应的过电压及防治方法,结论如下:

1) 台区避雷器横担至变压器支架的接地引下线在流过雷电流时会产生过电压,导致变压器绝缘承受的电压超过避雷器残压。

2) 雷电直击台区产生的过电压极易超过变压器标准雷电耐受电压,而雷电感应的过电压超过变压器标准雷电耐受电压的概率很小。因此,变压器雷击损坏多为雷电直击造成。

3) 在台区加装避雷线后,变压器承受的电压明显降低。同时,将避雷器接地引下线至变压器支架的电气距离缩短,可进一步降低雷电直击时绝缘损坏的概率。

### 参 考 文 献

- [1] 李琳,齐秀君. 配电线路感应雷过电压计算[J]. 高压技术,2011,37(5):1093-1099.
- [2] 罗大强,唐军,许志荣. 10 kV 架空配电线路防雷措施配置方案分析[J]. 电瓷避雷器,2012(5):113-118.
- [3] 张利庭. 雷电对配电安全运行的影响及防范研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [4] 王敬春,罗军. 降低配电线路雷击断线和跳闸率的防护措施[J]. 高压技术,2009,35(12):2958-2962.
- [5] 雷潇,刘强,刘守豹. 土壤电阻率对10 kV 架空线路雷害分析的影响研究[J]. 电瓷避雷器,2016(6):116-119.
- [6] 横山茂. 配电线路雷害对策[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [7] 杨剑锋,牛育忠,吕安璞,等. 配电变压器低压侧负载雷电浪涌防护研究[J]. 电瓷避雷器,2018(2):110-114.
- [8] 郭红霞,王兆军,王者龙,等. 智能电表的雷电浪涌防护分析[J]. 电瓷避雷器,2017(8):120-124.
- [9] 王兆军,矫真,刘丽君,等. 智能电表雷电感应的过电压防护分析[J]. 电瓷避雷器,2018(5):93-97.
- [10] 王华云,安义,蔡木良,等. 10 kV 配电变压器雷击过电压仿真计算研究[J]. 电瓷避雷器,2016(5):94-97.
- [11] 刘振亚. 国家电网公司配电网工程典型设计10 kV 配电分层[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [12] H. K. Høidalen. Analytical Formulation of Lightning - induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines above Lossy Ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1): 92-100.
- [13] H. K. Høidalen. Calculation of Lightning - induced Voltages in MODELS Including Lossy Ground Effects [C]. International Conference on Power System Transients, New Orleans, 2003.
- [14] Mario Paolone. Modeling of Lightning - induced Voltages on Distribution Networks for the Solution of Power Quality Problems, and Relevant Implementation in A Transient Program [D]. Italian: University of Bologna, 2001.

### 作者简介:

雷 潇(1988),博士,高级工程师,从事输配电线路雷电防护技术研究。

(收稿日期:2020-01-21)