

预制式柔性电缆终端弯曲运行电场特性研究

顾文沛¹, 汪波¹, 张静², 李锐¹, 罗传仙²

(1. 云南电网有限责任公司昭通供电局, 云南 昭通 657000

2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对目前预制式柔性电缆终端弯曲运行引起的闪络、电腐蚀性击穿及绝缘屏蔽层断口处击穿三种故障,基于有限元数值仿真对工频电压下预制式柔性电缆终端弯曲角度与弯曲位置的电场分布进行模拟计算,找出了不同弯曲位置引发故障类型的机理,确定了弯曲角度对电场分布不均匀度的影响。结果表明:预制式柔性电缆终端故障类型与弯曲位置密切相关,当弯曲角度低于 30° 时,电场分布变化较小,可保证预制式柔性电缆终端安全、稳定运行。

关键词: 预制式终端; 柔性电缆; 有限元; 弯曲角度; 电场仿真

中图分类号: TM246 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2015)05-0032-04

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2015.05.007>

Electric field characteristic research on prefabricated terminal of flexible cable bending operation

GU Wenpei¹, WANG Bo¹, ZHANG Jing¹, LI Rui¹, LUO Chuanxian²

(1. Zhaotong Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Zhaotong Yunnan 657000, China;

2. Wuhan Nanrui Co., Ltd. of State Grid Power Research Institute, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Aiming at the three kinds of faults such as flashover, electric corrosion breakdown and insulation shielding fracture breakdown, caused by bending operation of prefabricated terminal of flexible cable, based on finite element numerical simulation, makes analog computation on electric field distribution of bending angle and bending position of prefabricated terminal of flexible cable under power frequency voltage, finds out the mechanism of different bending position causing fault type, confirms the influence of bending angle on inequality degree of electric field distribution. The result shows that the faults type of prefabricated terminal of flexible cable has closely related with the bending position, when the bending angle is below 30° , the change of electric field distribution is smaller, can ensure the safe and steady operation of the prefabricated terminal of flexible cable.

Key words: prefabricated terminal; flexible cable; finite element; bending angle; electric field simulation

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2015.05.007

基金项目: 云南电网公司科技项目 K-YN2014-013.

收稿日期: 2015-06-14

作者简介: 顾文沛(1974),男,工程师,从事电网规划建设及电力工程技术工作。

预制式柔性电缆终端以制造过程一致性高、安装工艺简便、减小电场畸变效果好、运行可靠且无需维护而被广为使用^[1-3]。随着城市电缆化改造工程迅速膨胀,预制式柔性电缆终端随之大量增加。经过多年运行,济南、哈尔滨、广州等全国多地预制式柔性终端发生击穿故障,给电缆的安全运行带来严重隐患。

笔者通过对多起预制式柔性电缆终端故障的分析,发现 90% 以上的故障终端都存在着不同弯曲程度运行的现象,弯曲引发的电缆终端闪络故障与永久性绝缘击穿屡见不鲜^[4-6]。通过已报道的电缆终端弯曲故障,可将其分为闪络故障、电腐蚀性击穿及绝缘屏蔽层断口处击穿,但研究均未涉及终端弯曲引起击穿故障的机理,也未提出弯曲位置与弯曲角度等对运行状态影响。本文采用有限元数值仿真分析方法,研究不同弯曲角度及不同弯曲位置对运行中电缆终端电场的分布的影响,找出弯曲对电缆终端运行状态及可能引发电缆终端击穿的原因,有针对性地提出防止终端弯曲及终端弯曲后运维方法,为电缆终端安装工艺控制及运行维护提出理论依据。

1 电缆终端有限元模型仿真分析

1.1 模型的建立

从工程实际近似角度出发,忽略杆塔、支架、导线等对电缆终端电场和电位分布的影响,在电场仿真软件 Comsol Multiphysics 中根据不同的弯曲角度及弯曲位置建立预制式柔性电缆终端的简化二维轴对称仿真模型,计算其在相应弯曲条件下的电位和电场分布。

考虑到柔性电缆终端的实际运行情况及电场变化的差异性,对电缆终端同一弯曲位置不同的弯曲角度与同一弯曲角度的不同弯曲位置进行了分别仿真。0 号模型表示电缆终端弯曲 0°,1 号模型表示电缆终端在伞群中部弯曲 30°,2 号模型表示电缆终端在伞群中部弯曲 60°,3 号模型表示电缆终端在伞群中部弯曲 90°,4 号模型表示电缆终端在伞群底部弯曲 90°,5 号模型表示终端底部电缆弯曲 90°。

1.2 仿真参数

110 kV 预制式柔性电缆终端结构高度 1650 mm,大伞间距 50 mm,伞群数有 19 个。计算时施加的电压是以运行电压作为高压端施加电压,即 64 kV。仿真参数配置:电缆绝缘层的相对介电常数为 2.4,预制式柔性电缆终端的伞群与应力锥绝缘的相对介电常数为 3.2,应力锥的相对介电常数为 10,空气场的的相对介电常数为 1。

1.3 计算结果讨论与分析

图 1 为不同弯曲角度及弯曲位置下的仿真模型电势云图。由图 3(a)可以看出正常柔性电缆终端在干燥洁净状态下其周围电场分布具有轴对称性。由图 3(b)~(f)对不同弯曲情况下的电压计算结果可知,电缆终端周围等电位线是以高压端为中心近似呈圆形向周围扩散,高电场主要集中在在高压端附近区域及应力锥附近。对电缆终端弯曲状态下的绝缘性能讨论分为外绝缘与内绝缘两部分。

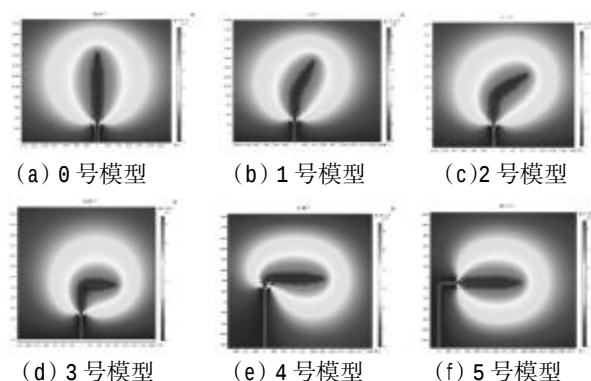


图 1 仿真模型电势云

1.3.1 外绝缘

外绝缘的仿真结果主要考虑的是柔性电缆终端的伞群电场梯度变化的均化程度及应力锥绝缘处的外表面电场强度。

1.3.1.1 伞群处电场

图 2 为电缆终端仿真模型的伞群端部电场分布图。图 2 中,横坐标为伞群编号,按照预制式柔性电缆终端伞群弯曲侧从上至下的编号顺序分别为 1~19 号伞群;纵坐标为电场强度。0 号、1 号、4 号、5 号模型的电场分布趋势基本一致,电场强度梯度变化程度均匀,伞群结构能够起到均化电场的作用。2 号、3 号模型电场出现了不同程度的两端升高而中间降低的现象,其中 2 号模型的 8 号

伞群~12 号伞群电场强度明显降低,3 号模型 6 号伞群~13 号伞群电场强度明显降低,说明柔性电缆终端中部弯曲角度大于 60° 时,部分伞群未起到外绝缘的作用,这会导致爬电距离大幅下降,影响电缆终端的安全稳定运行,甚至引发外绝缘闪络性击穿。

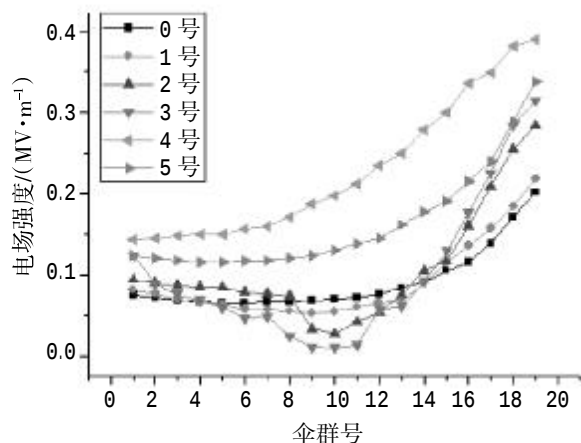


图2 模型伞群电场分布

1.3.1.2 应力锥绝缘外表面电场

表1为应力锥绝缘外表面电场仿真结果。由表1可见,0号模型的应力锥绝缘处的外表面电场强度最低,1号模型电场强度变化较大,3号模型较0号模型最大电场值高出2倍,最小电场值也高出1.97倍。仿真结果证明,电缆终端中部弯曲 90° 时,对应力锥绝缘外表面电场变化影响最大,容易引起应力锥绝缘外表面的电腐蚀,长期弯曲极易产生永久性击穿。

表1 应力锥绝缘外表面电场强度

模型编号	应力锥绝缘外表面场强/($\text{MV} \cdot \text{m}^{-1}$)	
	最小值	最大值
0号	0.185	0.278
1号	0.276	0.404
2号	0.282	0.416
3号	0.364	0.557
4号	0.276	0.419
5号	0.254	0.402

1.3.2 内绝缘

电缆屏蔽层断口处是电场最集中的位置,本文内绝缘研究以终端内部电缆为对象,考虑电缆终端是向右侧弯曲工况,按照电缆弯曲半径由小到大的顺序编号,即节点1为弯曲内侧电缆绝缘屏蔽层断口处节点,节点2为弯曲内侧电缆绝缘

层与导体屏蔽层界面处节点,节点3为弯曲外侧电缆绝缘层与导体屏蔽层界面处节点,节点4为弯曲外侧电缆绝缘屏蔽层断口处节点。弯曲引起内绝缘电场仿真结果见图3。

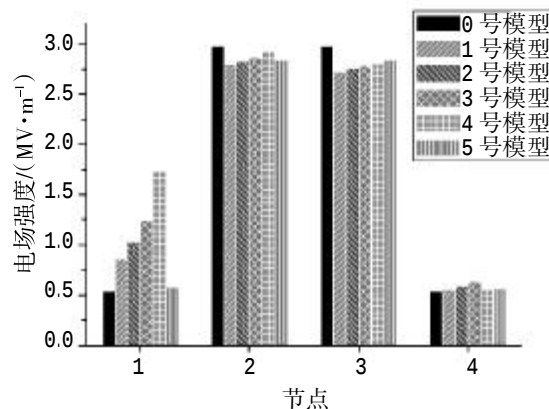


图3 模型中电缆节点电场分布

对比图3中4个节点可以发现0号~5号模型在节点1处的电场场强数值变化最为突出;4号模型(电缆终端伞群底部弯曲 90° 时)电缆绝缘外屏蔽层断口处的电场已达到 1.72 MV/mm ,与0号模型(电缆终端伞群底部弯曲 0° 时)情况相比,电场强度提高了3倍。仿真结果说明终端弯曲后的电缆绝缘层场强会受到较大影响,电缆绝缘外屏蔽层断口处电场强度随弯曲程度变化呈现正比例关系;且电缆弯曲半径最小处的节点(节点1)场强变化最快,当弯曲程度达到 90° 时,弯曲位置在伞群底部的4号模型电场强度最强,容易引起电缆绝缘层放电,长期运行则会导致电缆绝缘层永久性击穿。

2 解决方案

通过数值仿真分析结果可知弯曲对预制式柔性电缆终端的安全运行是十分不利的,为避免预制式柔性电缆终端弯曲运行引发故障,针对不同运行环境,主要从以下几个方面采取措施:

(1)由于柔性终端本体没有支撑件且材料柔软,不适用于有强风、台风的地区,且当终端塔距地面高度大于 10 m 时,应考虑其相应位置的风速对终端的影响。因此,对于该运行环境下的柔性电缆终端,需选用有支撑结构的无油套管。

(2)柔性终端上塔固定后,理想状态为与地面垂直,在实际安装中,为留有一定安全裕度,应根

据现场条件,采用适当的固定方式保证终端安装后和长期运行时,弯曲角度不超过 30° 。

(3)对于已弯曲的预制式柔性电缆终端,应分别考虑内绝缘与外绝缘的绝缘状态,针对不同的弯曲位置与弯曲角度采取不同处理方式。通过仿真结果可得:当弯曲位置位于电缆终端伞群中部时,弯曲角度越大,有效伞群数量越少,有效爬电距离越小,越容易引起外绝缘的闪络及应力锥绝缘外表面的电腐蚀性击穿,可采用局部放电与紫外成像检测来确定其外绝缘状态;当弯曲位置位于电缆终端伞群底部时,弯曲对电缆绝缘外屏蔽层断口处场强影响最大,且其场强与弯曲角度变化呈现正比例关系,弯曲方向的电缆绝缘界面处电场强度最强,容易引起永久性击穿,可采用局部放电与红外热成像检测来确定其内绝缘状态;当弯曲角度超过安全运行要求时应及时对电缆终端的固定方式进行调整,防止引起击穿故障。

3 应用效果

某供电公司自 2005 年以来,已推广使用高压柔性电缆终端 50 余套。仅 2012 年内就有 4 条 110 kV 线路由于弯曲运行,相继发生柔性电缆终端单相击穿故障。通过开展预制式柔性电缆终端运行状态普查,发现弯曲角度超过安全运行要求的有 10 余个,针对不同情况制定了相应的整改措施。图 4 与图 5 为某线路弯曲终端改造前后固定方式现场照片。图 4 所示电缆终端明显存在着不同程度的弯曲,容易引起永久性击穿故障。为矫正



图 4 原电缆终端运行固定方式



图 5 改进后电缆终端运行固定方式

电缆终端的弯曲,对终端塔上的设备连接与固定进行部分改进(如图 5 所示),将原来的垂直安装的合成绝缘子和避雷器的悬挂方式,改变为并排悬挂在加装的槽钢上;同时通过接线板,避雷器将预制式柔性电缆终端头接至导线;将原电缆塔身的抱箍固定支撑件延长,形成横担固定铝抱箍,使柔性终端与下方的电缆方向保持一致。经过现场的应用表明,改进后的电缆终端至今未出现击穿故障,有效提高了预制式柔性电缆终端的安全运行水平。

4 结论

(1)预制式柔性电缆终端伞群中部弯曲时,有效伞群数量减小,容易引起外绝缘的闪络及应力锥绝缘外表面的电腐蚀性击穿故障;终端伞群底部弯曲时,电缆绝缘外屏蔽层断口处场强变化最明显,容易引起永久性击穿故障。

(2)柔性电缆终端的弯曲可能发生在实际安装与运行维护等不同环节中,通过加强线路设计、终端选型、安装与运行维护等手段,使终端弯曲角度低于 30° ,可保证预制式柔性电缆终端安全、稳定运行。

(3)根据预制式柔性电缆终端不同弯曲位置与弯曲角度,运维人员可以有针对性地结合红外热成像、局部放电及紫外成像检测对其运行状态进行评估,从而有效提高检测效率,大大降低电网运行的经济成本和人力成本。

(下转第 44 页)