

# 66kV 干式变压器雷电冲击试验故障分析

李 辉, 杨 杰, 王耀强, 张 明, 陈 伟, 施 璇

(海南金盘智能科技股份有限公司, 海南 海口 570216)

**摘要:**本文中作者针对研发的一台 66kV 等级干式变压器雷电冲击试验过程出现的故障进行了研究,通过有限元仿真方法再现了试验故障原因,并通过仿真数据优化设计方案后,使得产品顺利通过了试验验证,证明了仿真分析的有效性及准确性。

**关键词:**干式变压器;电压分布;电场仿真;雷电冲击试验

中图分类号:TM406

文献标识码:B

文章编号:1001-8425(2024)05-0065-06

DOI:10.19487/j.cnki.1001-8425.2024.05.012

## Analysis of Lightning Impulse Test Failure of 66kV Dry-type Transformer

LI Hui, YANG Jie, WANG Yaoqiang, ZHANG Ming, CHEN Wei, SHI Xuan

(HainanJapan Smart Technology Co., Ltd., Haikou 570216, China)

**Abstract:**The fault occurred in the lightning impulse test of a 66kV dry-type transformer is studied. The cause of the test fault is reproduced by finite element simulation method, and the design scheme is optimized by simulation data, which made the product successfully pass the test verification, proving the effectiveness and accuracy of the simulation analysis.

**Key words:**Dry-type transformer; Voltage distribution; Electric field simulation; Lightning impulse test

### 0 引言

近年来,随着经济水平的发展,全国对电力能源提出了更高的要求。在国家“碳达峰、碳中和”的战略目标引领下,产业结构和能源结构调整不断优化,电力系统包括新能源等都拓宽了原有的建设规模,其应用电压等级也有明显的提升,构建新型电力系统成为必然趋势。

干式变压器作为一种环保型电力设备,拓展产品应用领域,突破 35kV 等级绝缘壁垒也势在必行。目前在 66kV 及以上高电压等级干式变压器领域,生产及运行经验较少,如何有效保证产品性能成为重中之重。雷电冲击试验作为变压器绝缘考核的主要方式之一,对于干式变压器新产品研制来说,其重要性不言而喻,若试验过程出现故障,需要快速进行有效的诊断。

本文中所介绍的雷电冲击试验过程发生的产品质量问题是研制试验过程中发现的,其表现出来的

问题比较典型,所以笔者对其进行了分析和研究。

### 1 产品基本情况

产品为一台应用于风电场合的 66kV 等级干式变压器,产品型号为 SCLB12-7700/69,电压比为  $69\pm 2\times 2.5\%/1.18\text{kV}$ ,联结组标号为 Dyn11。

变压器在测试过程中,例行试验均顺利通过,性能指标均优于国标要求,但产品在进行雷电冲击试验时发生故障,绕组发生放电现象,部分位置绝缘树脂被击穿,出现黑色碳化痕迹及树脂崩开现象,但产品雷电冲击试验后空载试验、局部放电试验及感应耐压试验均无异常,具体表现如下:

1)绕组不同位置发生树脂击穿痕迹,表现为碳化或者树脂崩开,如图 1 和图 2 所示;C 相放电击穿位置及现象与 B 相类似。

2)雷电冲击全波波形的波形明显异常,A 相绕组冲击波形图如图 3 和图 4 所示,其他两相波形类似。

### 2 产品故障原因理论分析



图 1 高压 A 相端部内壁绝缘击穿



图 2 高压 B 相内壁绝缘击穿

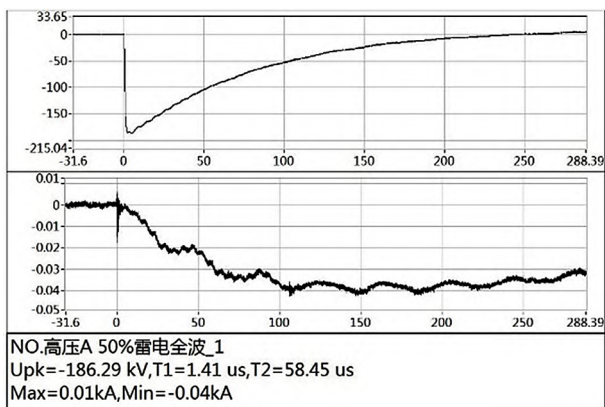


图 3 高压 A 相 50%冲击波形

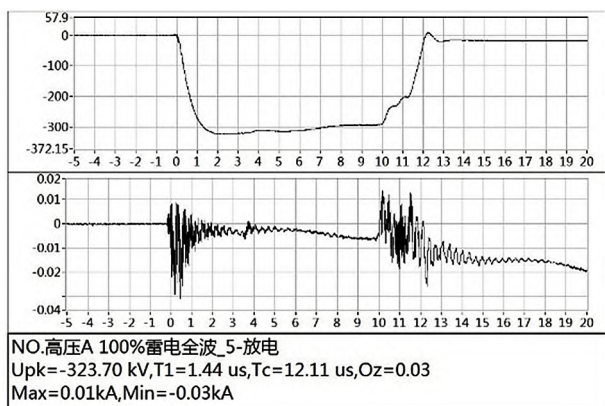


图 4 高压 A 相 100%冲击波形

结合产品生产制造经验,分析雷电冲击试验时故障发生的主要原因如下:

1) 高压绕组内部绝缘强度设计裕度不足,导致

绕组段间、匝间、层间发生放电击穿。

2) 主绝缘设计裕度不足,导致雷电冲击试验时高压绕组外表空气电场场强部分位置超过临界值,导致空气发生放电。

3) 高压绕组对地爬电距离不够,导致雷电冲击试验时发生绕组对地放电。

4) 产品外观存在污秽或者水珠,导致绕组表面电场非常不均匀,在雷电冲击试验时发生放电。

5) 裸露的高压端子附近空气电场场强超标,导致绕组附近空气发生放电。

结合设计及生产试验过程进行分析,产品在试验前已做了表面清洁整理,设计阶段也对产品爬距进行了设计校验,产品爬电比距均大于 28.5mm/kV,可以至少满足 3 级污秽等级环境运行要求;设计阶段对裸露的接线端子位置也进行了电场仿真分析校验,附近空气场强值最大值 1.9kV/mm,均远小于空气耐受临界值要求,且接线端子位置增加了均匀电场的屏蔽罩,也避免了不均匀电场导致故障问题发生的情况;且综合故障位置的情况分析,基本可以排除 3)~5) 项原因。

另外产品内部绝缘设计是参考 35kV 干式变压器设计标准的,理论上也不会存在击穿问题,但无法排除生产制造过程导致的局部绝缘破损引起的绝缘薄弱点的可能性,此薄弱点绝缘厚度可能满足局部放电试验及感应耐压的绝缘要求,但是无法满足雷电冲击试验要求。主绝缘尺寸的设计在基于 35kV 干式变压器的设计标准上进行了增强设计,但由于 66kV 及以上干式变压器缺少生产制造经验,此数据为理论计算并给了一定的裕度结果,可能存在不满足 66kV 绝缘设计要求。故综合分析,1) 项和 2) 项都可能是导致故障发生的原因,但 2) 项的可能性较大。

为进一步精确分析原因,将绕组从产品上拆解出来后,对绕组故障点进行了解剖分析,解剖点树脂内部导体间无放电痕迹,仅绕组表层树脂有放电痕迹,说明绕组内部绝缘并没有缺陷,再结合雷电冲击后空载试验、局部放电试验和感应耐压试验结果均无异常,那么初步可以判定故障是由 2) 项导致的。故产品的故障分析后续重点从 2) 项原因分析,分析过程进一步佐证不是 1) 项原因导致。

### 3 产品故障原因有限元分析及优化

通过理论分析及对样品进行故障点解剖分析,对故障的原因进行了定性的分析,但由于雷电冲击过程及绕组结构复杂,无法通过理论计算的方式得

到各匝雷电冲击试验下的电压分布, 从而通过电场仿真分析计算得到故障位置的空气场强大小, 因此期望通过有限元仿真得到各匝雷电冲击电压分布, 从而确定各位置的电场强度大小, 定量确认故障原因并对后续产品优化提供数据支撑。

### 3.1 雷电冲击下空气击穿放电的原理

气体在正常状态下是不导电的, 是良好的绝缘介质, 但当作用在气体上的电压或者电场强度超过某一临界值时, 气体就会突然失去绝缘性能而发生放电, 导致气体间隙短路, 称为气隙的击穿。由于雷电冲击电压的持续时间极短, 会使气隙的击穿特性受到影响。

图5为冲击电压作用在气隙上的电压波形, 从波形可以看出气隙击穿是需要一定的时间累积的, 放电所需的时间与电压的大小和电场均匀度有关联, 其击穿点也不一定是最高电压点  $U_m$ 。结合雷电冲击试验的故障波形, 后续的分析不应该只关注雷电冲击电压最高点时各匝的电压分布, 而应该关注至少  $0 \sim 20 \mu s$  间电压分布及电场强度的变化。

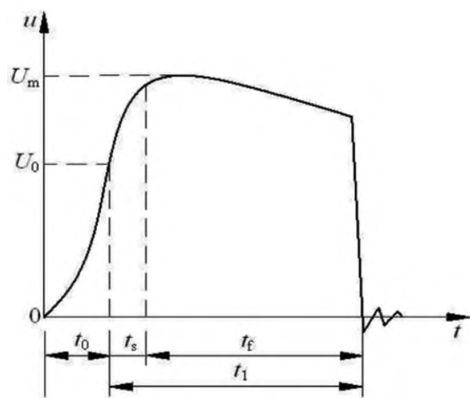


图5 冲击电压下气隙的击穿特性曲线

### 3.2 雷电冲击电压分析的原理

如图6所示, 将绕组沿子午面剖开, 将线匝展成直线, 每一线匝成为一根“传输线”, 这些多“传输线”按线圈绕制关系首尾相连, 变为如图6所示的MTL模型(多导体传输线模型), 根据产品计算或者仿真求解得到的等值参数并导入模型, 即可求解得到各匝的电压分布。

### 3.3 雷电冲击电压分析及优化的求解方法说明

如图7所示, 首先需要按照变压器实际的结构参数建立仿真模型, 包括构建完整的铁心、绕组、绝缘等结构参数尺寸, 设置相应材料特性, 分别设置电流或电压激励, 通过有限元法计算得到绕组分布电容、电导、电感及电阻矩阵。

然后利用 Matlab 软件编程求解。先通过 FFT 变

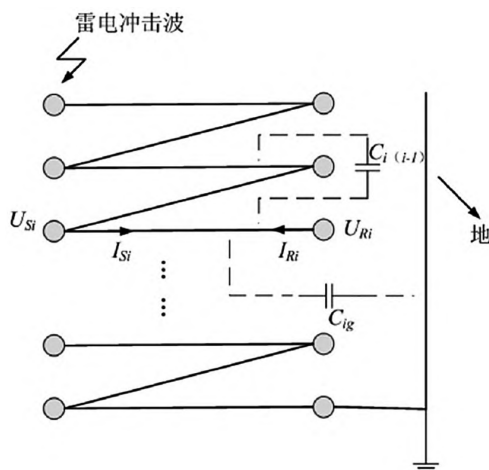


图6 绕组 MTL 模型

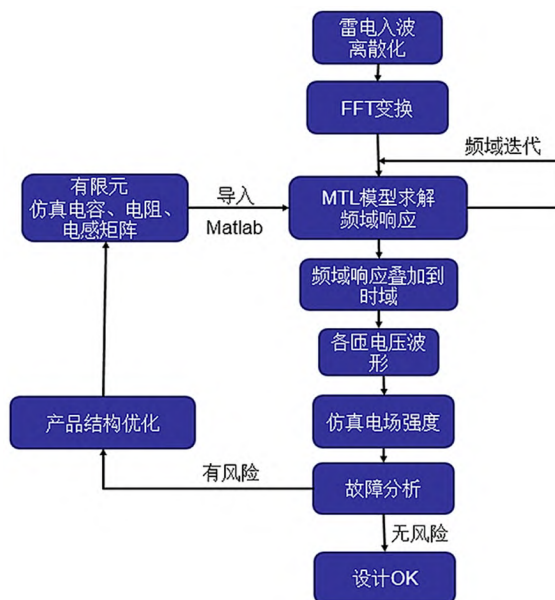


图7 雷电冲击仿真分析及优化流程图

换将雷电波信号分解为一系列单一频率的简谐波, 再将求解得到的分布电容、电导、电感及电阻矩阵导入如下电报方程(1)及(2), 求解各频率正弦激励下相量形式的传输线方程得到沿绕组的电压分布, 再将结果叠加得到时域下总的各匝电压分布波形。通过程序也可实现导出各段间、匝间、层间电压波形。

$$\frac{\partial[u(z,t)]}{\partial z} = -[R][i(z,t)] + [L] \frac{\partial[i(z,t)]}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial[i(z,t)]}{\partial z} = -[G][u(z,t)] + [K] \frac{\partial[u(z,t)]}{\partial t} \quad (2)$$

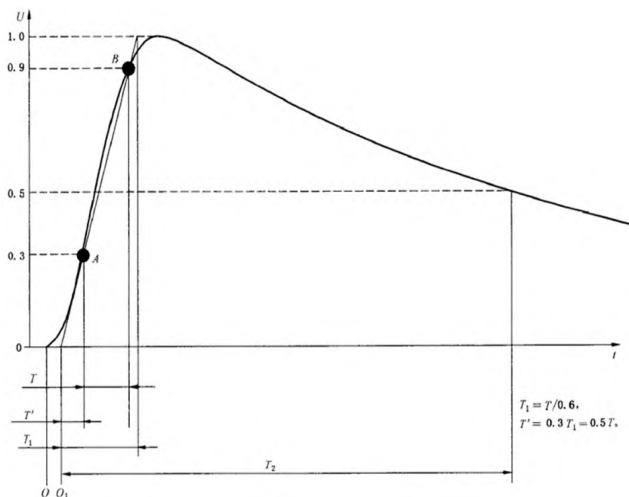
最后, 利用 ElecNet 建立变压器电场仿真模型, 将如上求解得到的各匝电压分布波形作为输入导入, 通过瞬态求解器仿真求解得到不同时刻下绕组内部、外部空气的电场强度分布, 根据电场强度分



布查找产品可能的风险点,并进行产品结构优化。

### 3.4 雷电冲击电压波形的拟合

根据标准 GB/T 16927.1-2011 要求,对于雷电冲击波形有如下要求,如图 8 和图 9 所示。



可以看出,69kV 产品在高压端部内外壁尖角处、高压内外壁处场强均超过了 33kV 产品值,且超过了空气耐受限值 3kV/mm 要求,内壁故障点场强超出空气耐受临界值明显且较多,故容易发生击穿,外壁未击穿可能是此处场强由于接近空气耐受临界值,雷电冲击试验短,累计时间还未达到放电击穿临界点。后续产品应重点优化这几个易发生故障点结构。

3.6 产品设计优化

依据仿真数据作为支撑,采取了一系列加强主绝缘的措施,选取其中最优的设计方案,优化后几个特征点的场强分布情况如表 3 所示。

产品优化设计并重新生产制造绕组后,顺利通过了雷电冲击全波 325kV,雷电冲击截波 360kV 试

验。

4 结束语

本文中笔者通过有限元分析的方法对 66kV 干式变压器雷电冲击试验过程出现的故障进行了定量的分析,对故障现象进行了较好的复现,也为产品结构优化提供了有力的数据支撑,保证了产品顺利通过雷电冲击试验。通过此研究得出,该有限元仿真方法可用于产品雷电冲击故障分析,是一种有效分析产品雷电冲击性能的方法,也可以将此方法应用于操作冲击过电压、特快速过电压等应用场景下变压器电压分布分析,也可以应用于更高电压等级干式变压器产品的开发中,从而提供更加安全可靠的产品。

表 1 69kV 与 33kV 最大电压、场强、位置对比

产品型号		SCLB12-7700/69	SCLB-4779/33
作用电压		冲击全波(325kV)	冲击全波(170kV)
层间最大电压、电场强度及其位置	最大电压/kV	8.235	8.457
	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	12.87	13.21
	位置	首段内层与次内层间	首段内层与次内层间
匝间最大电压、电场强度及其位置	最大电压/kV	1.74	5.41
	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	4.35	12.02
	位置	34 与 35 匝间	140 与 141 匝间
段间最大电压、电场强度及其位置	最大电压/kV	48.72	35.12
	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	2.11	1.60
	位置	第 1 段与第 2 段间	第 1 段与第 2 段间

表 2 69kV 与 33kV 不同位置最大场强对比

产品型号		SCLB12-7700/69	SCLB-4779/33
作用电压		冲击全波(325kV)	冲击全波(170kV)
高压绕组端部内壁尖角空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	3.8	2.77
高压绕组端部外壁尖角空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	3.1	2.07
高压绕组外壁空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	3.08	1.26
高压绕组内壁空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	3.45	2.76
主空道空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	2.28	2.22
低压表面空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	2.88	2.4

表 3 69kV 产品优化后不同位置最大场强对比

产品型号		SCLB12-7700/69	SCLB12-7700/69	SCLB12-7700/69
作用电压		冲击全波(325kV)	冲击全波(360kV)	冲击截波(360kV)
高压绕组端部内壁尖角空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	2.71	2.96	2.98
高压绕组端部外壁尖角空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	2.08	2.28	2.28
高压绕组外壁空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	2.04	2.25	2.25
高压绕组内壁空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	2.41	2.61	2.84
主空道空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	1.72	1.89	2.08
低压表面空气	最大场强/kV·mm <sup>-1</sup>	2.03	2.27	2.47

## 参考文献:

- [1] GB/T 16927.1-2011, 高电压试验技术第 1 部分:一般定义及试验要求[S].
- [2] GB/T 1094.3-2017, 电力变压器第 3 部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙[S].
- [3] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
- [4] 胡启凡. 变压器试验技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2010.
- [5] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [6] 唐炬, 关伟民, 张博. 高电压工程基础(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [7] 王赞基. 电力变压器线圈内暂态电压计算[M]. 北京:中国电力出版社, 2018.
- [8] 解广润. 电力系统过电压(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2018.
- [9] 潘明, 高浩, 顾小虎, 等. 基于有限元软件的 10kV 干式变压器外壳绝缘性能研究[J]. 变压器, 2023, 60(11): 15-18.
- [10] 周丹, 林春耀, 杨贤, 等. 不同类型雷电冲击电压下变压器绕组电压分布特性研究[J]. 变压器, 2023, 60(3): 47-51.
- [11] 陈磊, 张亚杰. “U”形双层低压绕组的应用及雷电冲击特性[J]. 变压器, 2023, 60(6):1-5.
- [12] 庄飞虎, 马金财, 何龙, 等. 一起 10kV 避雷器击穿与互感器烧毁故障原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(6):8-14.
- [13] 赵俊杰, 虞驰, 任华, 等. 1000kV 特高压输电线路特殊形式雷击故障案例分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 107-112.
- [14] 咸日常, 张冰倩, 张启哲, 等. 基于有限元分析的配电变压器匝间绝缘劣化特征分析[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 169-176.
- [15] 张冠军, 田丰, 杜振斌, 等. 一起特高压换流变压器调压绕组击穿故障的原因探究[J]. 变压器, 2022, 59(7): 61-65.

## 作者简介:

李辉(1972-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 高级工程师。

本文彩图可以网上浏览, 网址见本期 29 页

收稿日期: 2024-01-04

## 全国首座 500kV 智能变电站完成母线保护改造

近日, 从国网浙江电力获悉, 全国首座建成投运的 500kV 智能变电站——金华 500kV 芝堰变近日完成了 500kV 母线的保护改造。这是浙江首次实施 500kV 老旧智能变电站保护改造升级, 为我国智能变电站保护改造工程树立了样板, 同时也为停电难、施工难、风险大的智能变电站改造提供了实践经验和技术积累。

500kV 芝堰变于 2009 年 7 月投入运行, 是国家电网公司启动的首批 9 座智能化变电站试点工程之一, 也是当时国内数字化技术应用程度最深、实施范围最广、保护数字化程度最高的 500kV 智能变电站。该站通过两回 500kV 线路与浙能兰溪电厂相连, 是浙江中西部电网的枢纽变电站。经过近 15 年的安全稳定运行, 500kV 芝堰变站内保护、测控等电气二次设备已经达到了寿命周期, 备品备件消耗殆尽且大多已经停产, 因此, 国网浙江电力实施了此次升级改造。

500kV 芝堰变此次升级改造的主要内容是 500kV 母线的保护、测控、智能终端等电气二次设备改造和站控层网络升级。在变电站各级电压设备设施中, 母线是将变压器等大型电气设备与各种电器装置连接的导体, 起到汇集、分配和传送电能的重要作用。

此次母线保护改造过程中, 将芝堰变站控层 MMS 单环网结构改造升级为目前的树状双星型网络结构, 保护装置实现了信号双通道传输, 全面提升设备之间信号的传输可靠性。

改造过程中, 国网浙江电力还充分发挥了智能变电站的数字化、网络化优势, 利用离线验证平台、仿真工具等提前开展模拟验证, 有效压缩改造过程中的重复试验时间, 同时, 结合掏屏改造的方式, 改造效率得到大幅提升, 改造时间较常规减少了 50%以上, 极大降低了 500kV 变电站单母线运行的电网风险。