

串联电抗器雷电冲击试验的方法差异与仿真研究

杨建立,袁数数,陶 磊

(许继变压器有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:串联电抗器的电气绝缘性能是其安全运行的重要保障,电抗器雷电冲击试验是检验该性能的重要手段,目前我国实行的标准 JB/T5346-2014 及 DL/T462-2025 的电抗器相间雷电冲击试验方法有所不同,对电抗器造成的绝缘损害也有所差异。对此,论文基于上述两种标准运用试验和仿真的方法对电抗器相间雷电冲击试验进行研究。试验和仿真结果显示,标准 JB/T5346-2014 中干式空心和铁心电抗器 35kV 感应峰值电压分别为 312.09kV 和 270.35kV 超出标准值 56% 和 35%;最大场强值分别为 1.75kV/mm 和 1.64kV/mm;标准 DL/T462-2025 中感应峰值电压与标准值一致,最大场强值均为 1.19kV/mm。标准 JB/T5346-2014 中电抗器雷电冲击试验方法导致更高的感应过电压和局部场强,对绝缘设计提出更高裕度要求。

关键词:电抗器;相间;雷电冲击;电场强度;绝缘

Differences in Methods and Simulation Research for Lightning Impulse Testing of Series Reactors

YANG Jianli, YUAN Shushu, TAO Lei

(XuJi Transformer Co., Ltd., Xuchang Henan 461000)

Abstract: The electrical insulation performance of series reactors is a crucial guarantee for their safe operation, and lightning impulse testing serves as a significant means to evaluate this performance. Currently, the lightning impulse testing methods for reactors in China's standards JB/T5346-2014 and DL/T462-2025 differ, leading to varying degrees of insulation damage to the reactors. In response, this paper employs experimental and simulation methods to study the lightning impulse testing of reactor phase-to-phase insulation based on the aforementioned standards. The experimental and simulation results indicate that the induced peak voltages for dry-type air-core and iron-core reactors in standard JB/T5346-2014 are 312.09 kV and 270.35 kV, respectively, exceeding the standard values by 56% and 35%; the maximum field strength values are 1.75 kV/mm and 1.64 kV/mm, respectively. In standard DL/T462-2025, the induced peak voltage aligns with the standard value, and the maximum field strength value remains at 1.19 kV/mm. The lightning impulse testing method for reactors in standard JB/T5346-2014 results in higher induced overvoltages and local field strengths, necessitating higher margin requirements for insulation design.

Key words: reactor;phase to phase;lightning impulse test;electric field intensity;insulation

0 引言

串联电抗器是电力系统中广泛应用的元件之一,在其安全运行过程中电气绝缘性能起着至关重要的作用^[1-2]。电抗器的相间雷电冲击试验主要用来考核电抗器的电气绝缘性能^[3-4]。

目前,我国施行的串联电抗器相间雷电冲击试验方法有所不同,我国主要依据机械行业标准 JB/T 5346-2014《高压并联电容器用电抗器》^[5]和电力行业标准 DL/T 462-2025《高压并联电容器组用串联电抗器使用技术条件》^[6],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》^[7],国标 GB/T 1094.4-2005《电力变压器第4部分:电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则》^[8]。

JB/T 5346-2014 中的试验规范,将串联电抗器 A、C 相端子首端悬空,尾端短接并接地,B 相尾端悬空并在其首端加入模拟状态下的雷电冲击波,通过多次试验,对比尾端 50% 电压波形和 100% 电压波形是否有变化来判断试品是否通过试验^[9-13];而 DL/T 462-2025,是 A、C 相首尾段短接接地,将 B 相首尾短接后再进行相间雷电冲击波的加载。GB/T 1094.3-2017 是雷电冲击试验的绝缘水平及试验原则的主要依据,而 GB/T 1094.4-2005 则给出了试验导则与波形判据,二项国标都没有规定接线方法。JB/T 5346-2014 和 DL/T 462-2025 两种试验方法在电抗器 B 相尾端检测到的感应峰值电压相差较大^[14]。

当前,对电抗器雷电冲击试验的研究主要聚焦于试验和仿真两个方面。文献[15]运用 Matlab 语言建立了变压器雷电冲击试验回路的数学模型,但是未能将其成果应用于实践。文献[16]通过试验和仿真研究了电抗器雷电冲击试验线路中各个元件参数的变化对试验波形结果的影响规律,然而未能进一步研究雷电冲击的电场分布。文献[17]、[18]将试验和仿真相结合研究了雷电冲击和工频耐压两种情况下干式变压器的

电场分布情况,结果显示冲击电压的峰值过大会危及变压器绝缘结构的安全。文献[19]、[20]对建立的二维轴对称干式变压器电场模型进行静电场仿真,得出了不同位置的最大场强分布情况。

本文针对两种不同的串联电抗器相间雷电冲击试验方法展开研究,运用试验和有限元仿真相结合的研究方法,得出不同电压等级下B相感应电压的峰值及电场强度的分布情况,为电抗器的电气绝缘设计提供借鉴。

1 雷电冲击试验与电场仿真

保护电抗器用的避雷器水平对电抗器雷电冲击试验电压起关键作用,电抗器所承受的雷击过电压是指避雷器放电后的残压,根据该残压,将雷电冲击试验的冲击波形分为截波和全波两类^[21-23],本文选用应用最为普遍的全波冲击方式。

1.1 试验原理

电抗器的相间雷电冲击试验与变压器相同,将模拟的雷电冲击波作用到绕组一端,电抗器内部绕组产生不同的电感和对地电容传播,在中性点为传导电流,上述电压和电流波形为高低频震荡相叠加,标准的雷电冲击全波如图1所示,其对应的双指数函数为式(1)。

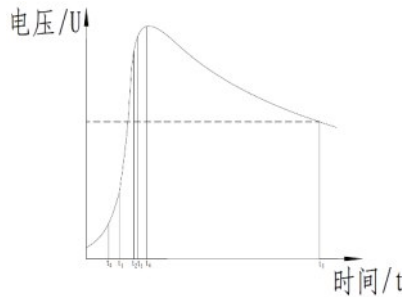


图1 标准雷电冲击全波

Figure. 1 Standard lightning impulse full wave

$$U(t) = U_m(e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (1)$$

式中: α 、 β 为波形调整系数, U_m 为峰值电压, V。

电抗器示伤原理为:电抗器在雷电冲击电压下为线性元件,假定 50% 雷电冲击电压作用下的绕组不会发生破坏,将 50% 雷电冲击作用下的波形与 100% 雷电冲击电压作用下的波形做对比,若在 100% 雷电冲击电压下波形有异样,则认为电抗器发生了故障,即有匝间或者段间绝缘损坏^[24]。此外,本文中的雷电冲击波加载方式分别采用标准 JB/T 5346-2014 和标准 DL/T 462-2025,详见图 2。

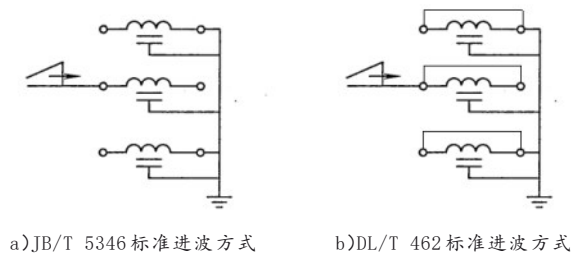


图2 雷电冲击波施加方式

Figure. 2 Application methods of lightning shock waves at home and abroad

1.2 试验过程

本次试验在许继变压器有限公司试验站进行,选用 35kV 电压等级的干式空心、铁心电抗串联器各一组(台),其参数和外形见表 1 和图 3。

试验装置主要由冲击电压发生器本体、测量分压器和控制台等组成,冲击电压测量系统的型号为 RZT-1200(证书编号:ZE202601-1088),见图 4 和图 5^[25]。干式空心 and 铁心电抗器分别按照 10kV、20kV 和 35kV 三

表1 电抗器参数

Table 1 Reactor parameters

参数	干式空心	干式铁心
系列	CKGK	CKSC
电压等级/kV	35	35
容量(三相)/kvar	480	1440
电抗/ Ω	17.41	17.28
绕组材质	铜	铜



a)铁心串联电抗器



b)空心串联电抗器

图3 干式电抗器

Figure. 3 Dry Reactor

种电压等级进行雷电全波冲击试验,每个电压等级运用 50% 电压和 100% 电压各冲击一次和三次,其中空心电抗器采用三相叠放的形式。



图4 冲击电压发生器和操作控制台

Figure. 4 Impulse voltage generator and operator console

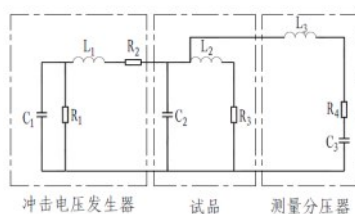


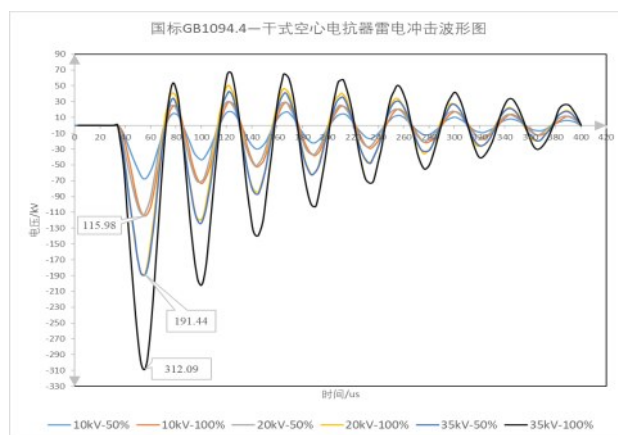
图5 雷电冲击等效电路

Figure. 5 Lightning impulse equivalent circuit

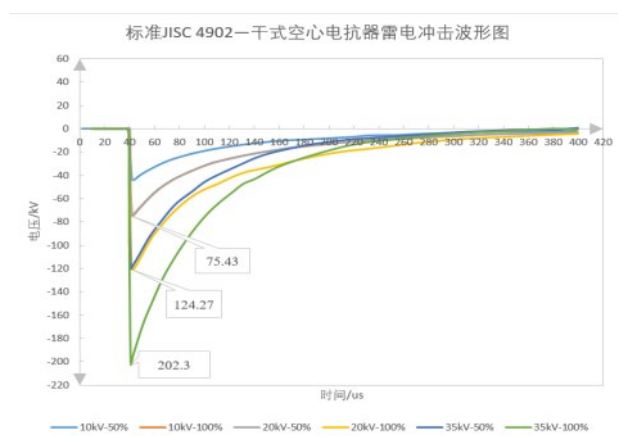
1.3 试验结果分析

根据试验结果,分别选取干式空心电抗器和铁心电抗器 50% 和 100% 雷电冲击波形进行汇总,如图 6 和图 7 所示。依据标准 JB/T 5346-2014 的试验结果显示,10kV、20kV 和 35kV 的干式空心电抗器雷电冲击试验峰值电压分别是 115.98 kV、191.44 kV 和 312.09 kV,超出额定值(见表 2)54%、53% 和 56%;依据 DL/T 462-2025 得到的峰值电压与额定值基本相等。依据标准 JB/T 5346-2014 中的干式铁心电抗器冲击峰值电压分别是 92.95kV、167.94kV 和 270.35kV,超出额定值 24%、34% 和 35%,依据 DL/T 462-2025 得到的峰值电压与额定值基本相等。

将每一个电压等级波形曲线图中的峰值电压数据进一步提取可得表 3 和表 4。对比分析可知,依据标准 JB/T 5346-2014 试验的空心电抗器和铁心电抗器,随电压等级的提高电压峰值超出标准额定电压耐受值的



a)JB/T 5346-2014 空心电抗器冲击波形图汇总



b)DL/T 462-2025 空心电抗器冲击波形图汇总

图6 空心电抗器冲击波形图

Figure. 6 Lightning shock waveform of core reactor

增量越高,且相同电压等级的空心电抗器比铁心电抗器的电压峰值分别高出24%、14%和16%,这是由于铁心电抗器结构与空心电抗器有所差异,铁心电抗器存在铁芯,绕组对地电容大,这就造成雷电冲击波在进线端进波以后进线端电压集中,感应端电压会有所降低^[26]。空心电抗器绕组经绝缘子支撑,绕组对地电容非常小,雷电冲击波分布较均匀,故感应端电压较铁心电抗器电压略高。因此相同试验条件下空心电抗器比铁心电抗器发生绝缘损坏的几率就越大。

1.4 电场仿真研究

本节以前文标准 JB/T 5346-2014 和 DL/T 462-2025 的雷电冲击试验感应电压峰值为基础,对干式空心电抗器和铁心电抗器的二维静电场进行仿真分析,仿真流程如图8所示,得出电场强度的最大位置并判别是否会对电抗器的绝缘造成损害。

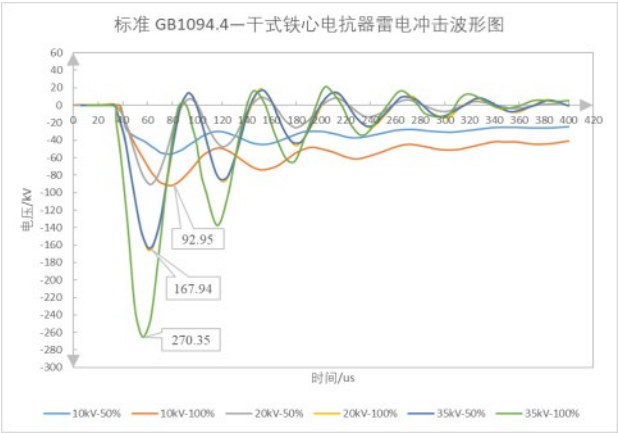
1.4.1 仿真原理与边界条件

本文以麦克斯韦方程组作为仿真的理论基础,二维静电场中的边界条件有自然边界条件、对称边界条件、气球边界条件和主从边界条件四种类型。本文的计算模型具有对称性同时为了能更好的处理计算模型中的无穷远处的磁场文中选用了对称边界条件和气球边界条件。

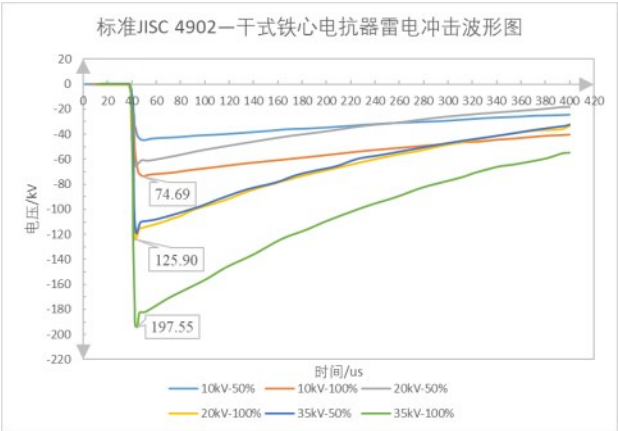
1.4.2 模型建立

干式空心电抗器和铁心电抗器的绕组都是轴对称结构。为了降低计算机的使用内存,提高计算效率,对其二维静电场有限元计算模型进行如下简化:

(1)空心电抗器和铁心电抗器都是以Y轴为对称轴,空心电抗器取线圈B的二分之一为计算对象;铁心电抗器以Y轴为中心选取B相的二分之一和C相作为计算对象。



a)JB/T 5346-2014 铁心电抗器冲击波形图汇总



b)DL/T 462-2025 铁心电抗器冲击波形图汇总

图 7 铁心电抗器冲击波形图

Figure. 7 Lightning shock waveform of hollow reactor

表 2 标准电压等级耐受峰值电压^[8]

Table 2 Standard voltage level withstand peak voltage^[8]

系统标称电压(方均根值)/kV	额定雷电冲击耐受电压(峰值)/kV
10	75
20	125
35	200

表 3 空心电抗器雷电冲击峰值电压对比

Table 3 Comparison of lightning impulse peak voltage of air-core reactor

电压等级	JB/T 5346-冲击电压峰值		DL/T462-冲击电压峰值	
	50% 电压	100% 电压	50% 电压	100% 电压
10kV	68.54	115.98	44.18	75.43
20 kV	115.41	191.44	74.45	124.27
35 kV	192.20	312.09	122.75	202.30

(2)忽略铁心电抗器的引线对端部电场的作用,并将上、下铁轭视为无限大的平板。

(3)各线圈内匝数分布均匀,忽略导线之间的层间绝缘,

(4)空心电抗器各个包封电压相等,忽略星行架对电场产生的影响。

空心电抗器和铁心电抗器的二维静电场计算模型如图 9 所示,其材料的属性如表 5 所示,铁心电抗器将 B 相绕组设置为激励源,添加电压,铁心部分和 C 相设置为 0 电位,Y 轴设置为对称边界条件,其余部分设置

表 4 铁心电抗器雷电冲击峰值电压对比

Table 4 Comparison of lightning impulse peak voltage of iron core reactor

电压等级	JB/T 5346-冲击电压峰值		DL/T462-冲击电压峰值	
	50% 电压	100% 电压	50% 电压	100% 电压
10kV	55.92	92.95	45.03	74.69
20 kV	90.96	167.94	66.93	125.90
35 kV	165.34	270.35	121.28	197.55



图 8 仿真流程图

Figure. 8 Simulation flow chart

为气球边界条件;空心电抗器 B 相绕组为激励源,添加电压,Y 轴设置为对称边界条件,其余部分设置为气球边界条件。空心 and 铁心电抗器的匝间绝缘电场强度较为关键,所以该处的网格剖分精度相对较高,空气域电场分布较为均匀,该处的剖分精度较低,图 10 为铁心电抗器网格剖分图,经过网格独立性验证,网格划分满足要求。

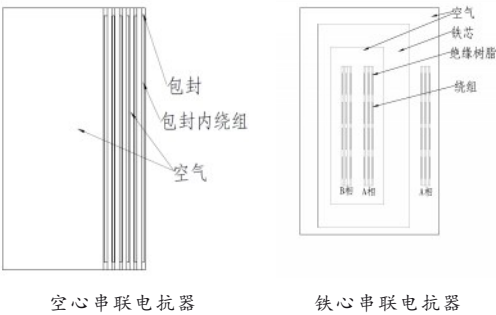


图 9 电抗器模型

Figure. 9 Reactor Model

表 5 材料属性

Table 5 Material properties

部件	硅钢片	绝缘树脂	空气
相对介电常数	1	3.6	1.0006

1.4.3 仿真结果分析

根据上述模型进行了电场仿真计算,得出了电场分布云图和矢量图,如图 11 和 12 所示,由图中可知:空心电抗器在标准 JB/T 5346-2014 中的场强最大值为 1.75kV/mm,在 DL/T 462-2025 中的最大场强值为 1.19 kV/mm 主要分布在每一段绕组的上下端部,线圈中间空气域电场分布相对均匀,标准 JB/T 5346-2014 和 DL/

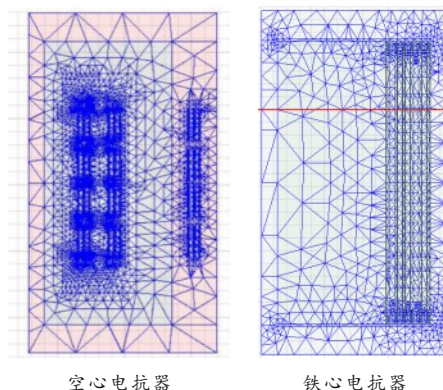


图10 网格剖分图

Figure. 10 Mesh division diagram

T 462-2025 中的场强平均值分别为 1.16kV/mm 和 0.87kV/mm ; 铁心电抗器在标准 JB/T 5346-2014 中场强最大值为 1.64kV/mm , 在 DL/T 462-2025 中最大场强值为 1.19kV/mm 主要分布在每一段绕组的上下端部, 绕组和绕组间以及绕组和铁心之前的空气域电场分布相对均匀, 标准 JB/T 5346-2014 和 DL/T 462-2025 中的场强平均值分别为 0.98kV/mm 和 0.71kV/mm ;

实际应用中的环氧树脂击穿场强一般只按 $3.5\text{kV/mm} \sim 4\text{kV/mm}$ 选取, 空气域的击穿场强为 3 kV/mm 。对比上述结果得出如下结论:

(1) 由于空心 and 铁心电抗器采用标准 JB/T 5346-2014 进行试验所得的 B 相尾端悬空的雷电感应峰值电压过高, 导致整个绕组周围的场强分布高于 DL/T 462-2025 试验的场强分布。

(2) 标准 JB/T 5346-2014 和 DL/T 462-2025 试验标准中的铁心电抗器绕组与铁心之间空气域与内部绕组存在一定的距离, 且形状规整, 电场在此处会有一定程度的削弱, 这就导致场强分布相对均匀, 击穿风险较小, 可以适当减小此间隙缩小电抗器横向距离, 节约成本。

(3) 空心电抗器和铁心电抗器 B 相尾端悬空端绕组端部与空气域的交界面以及分段的绕组与绕组之间在雷电冲击试验的峰值电压作用下电场强度最高, 主要原因在于感应峰值电压远超标准值, 同时绕组端部拐角接近 90° 并与铁心铁轭等接地部分距离最近, 铁轭边缘尖锐处与绕组之间易产生尖端放电, 因此需要对绕组结构进行改善提升绝缘水平以防尖端放电。

(4) 空心 and 铁心的电场强度最大值未超出绝缘材料的耐受值。

2 试验与仿真结果分析

对比前文中干式空心、铁心电抗器相间雷电冲击试验和仿真的结果作出如下分析:

(1) 依据标准 JB/T 5346-2014 的电抗器相间雷电冲击试验结果显示: 在 10kV 、 20kV 、 35kV 电压等级的标准雷电冲击波下, 空心电抗器 B 相感应电压峰值分别超出标准值 54% 、 53% 和 56% ; 铁心电抗器 B 相感应电压峰值分别超出标准值 24% 、 34% 和 35% ; 相同电压等级下空心电抗器 B 相感应电压峰值分别超出铁心电抗器 25% 、 14% 和 15% 。依据 DL/T462-2025 的电抗器雷电冲击试验结果显示: 由于 B 相首尾短接, 空心 and 铁心电抗器在各个电压等级下 B 相电压峰值与标准值一致。

(2) 依据标准 JB/T 5346-2014 的试验结果, 在空心 and 铁心电抗器 B 相分别施加 312.09kV 和 270.35kV 的电压进行静电场仿真, 结果显示电场强度最大值分别为 1.75 kV/mm 和 1.64kV/mm ; 依据 DL/T462-2025 标准的试验结果, 在空心 and 铁心电抗器 B 相均施加 200kV 的电压, 仿真结果显示电场最大值均为 1.19 kV/mm ; 相同电压等级下, 标准 JB/T 5346-2014 空心电抗器 B 相电场强度超出 DL/T462-2025 标准 47% , 铁心电抗器 B 相电场强度超出 DL/T462-2025 标准 38% 。

(3) 本文是在电抗器静电场下进行了仿真, 主要用于分析峰值电压作用下电抗器的绝缘薄弱区域, 而雷电冲击过程中电抗器暂态传播特性仍需结合行波理论进一步研究。

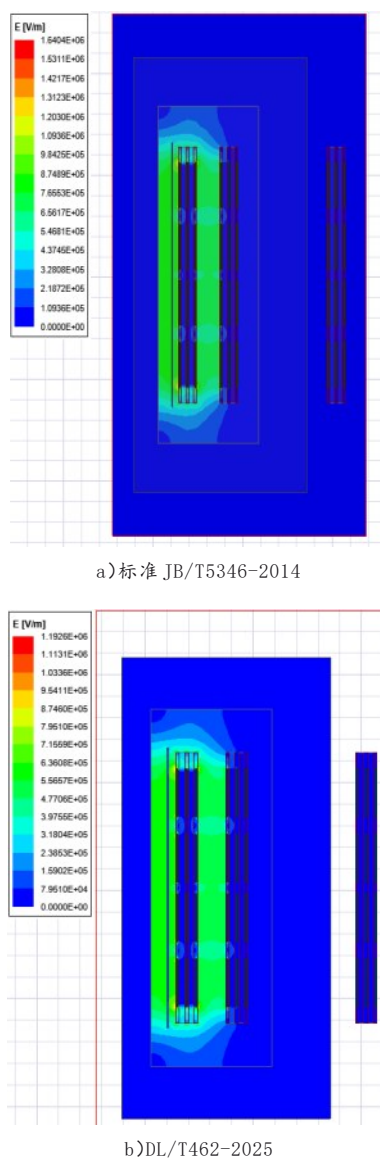


图 11 空心电抗器电场分布云图

Figure. 11 Cloud map of electric field distribution

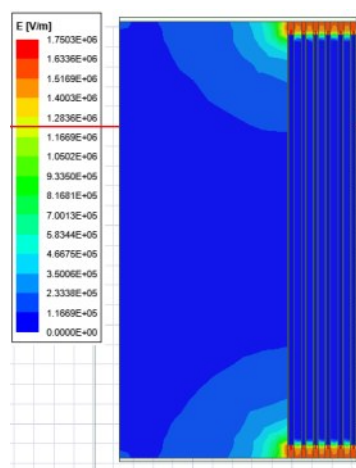
综上所述可知:在相同的雷电冲击电压下,采用标准 JB/T 5346-2014 进行雷电冲击试验,空心 and 铁心电抗器 B 相的感应电压峰值和电场强度均远超 DL/T 462-2025 标准要求,此研究为电抗器产品绝缘设计提供借鉴。

3 结语

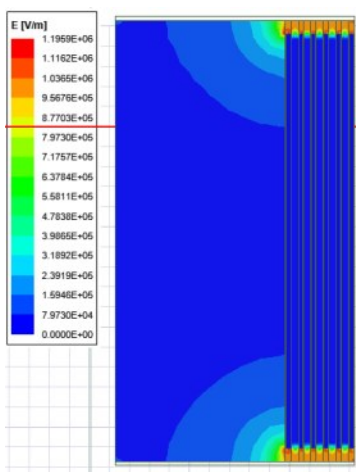
本文针对标准 JB/T 5346-2014 和 DL/T 462-2025 两种不同的电抗器相间雷电冲击试验方法展开研究,通过试验得出电抗器感应端的最高电压,然后利用该结果建立电抗器在雷电冲击作用下的静电场仿真模型,得出其在雷电冲击峰值作用下最大场强的位置。

(1) 依据标准 JB/T 5346-2014 电抗器雷电冲击试验结果表明:在 10kV、20kV、35kV 电压等级下,空心 and 铁心电抗器 B 相感应电压峰值最高分别超出标准值 56% 和 35%;而依据 DL/T 462-2025, B 相感应电压峰值与标准值一致。因此按照标准 JB/T 5346-2014 的要求,设计人员在对电抗器进行绝缘设计时不能仅以标准值作为参照,要考虑到雷电冲击感应值超出标准值的情况,进一步提高绝缘设计水平。

(2) 依据标准 JB/T 5346-2014, 35kV 电压等级的空心 and 铁心电抗器电场强度最大值分别为 1.75 kV/mm



a) 标准 JB/T 5346-2014



b) DL/T 462-2025

图 12 铁心电抗器电场分布云图

Figure. 12 Vector diagram of electric field distribution

和 1.64kV/mm , 位置出现在绕组包封端部, 是干式电抗器最容易发生绝缘损坏的部位, 可以将此处的绝缘设计加以改善。

电抗器相间雷电冲击试验是检验其绝缘水平的重要手段, 保证其合理的绝缘设计, 对电抗器的绝缘质量以及其在电力系统中安全运行都具用重要的意义。

参考文献:

- [1] 高自伟, 秦军, 勾忠, 等. 雷电全波冲击试验的波形调节[J]. 黑龙江电力, 2006(04):259-260.
GAO Ziwei, QIN Jun, GOU Zhong, et al. Adjustment of wave shape in lightning full-wave impulse test[J], Heilongjiang Electric Power, 2006(04):259-260.
- [2] 肖林, 张乐. 变压器雷电冲击试验全波波形调节[J]. 电力机车与轨道车辆, 2016, 39(01):42-46.
XIAO Lin, ZHANG Le, Regulation of full waveform of transformer lightening impulse test[J], Electric Locomotives & Mass Transit vehicles 2016, 39(01):42-46.
- [3] 赵军, 陈维江, 高飞, 等变压器雷电冲击试验空间磁场对智能组件影响的计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14):3981-3990.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, GAO Fei et al. Calculation and analysis of space magnetic field effect on intelligent components in transformer lightning impulse test[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14):3981-3990.
- [4] 龚晓明, 林先永浅谈导线绝缘厚度对雷电冲击试验异常影响[J]. 新型工业化, 2021, 11(01):124-126.

- GONG Xiaoming, LIN Xianyong. Talking about the influence of wire insulation thickness on abnormal lightning impact test [J]. The journal of new industrialization, 2021, 11(01): 124-126.
- [5] JB/T 5346-2014, 高压并联电容器用串联电抗器[S].
JB/T 5346-2014, Series reactors for voltage shunt capacitors[S]
- [6] DL/T 462-2025, 高压并联电容器组用串联电抗器使用技术条件[S].
DL/T 462-2025, use requirements for series reactors in high-voltage shunt capacitors banks[S]
- [7] 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].
GB/T 1094.3-2017, Power transformers-part 3: Insulation level, dielectric tests and external clearances in air[S]
- [8] GB/T 1094.4-2005, 电力变压器 第4部分:电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则[S].
GB/T 1094.4-2005, Power transformers-Part 4; Guide to the lightning impulse and switching impulse testing-Power transformers and reactors[S]
- [9] 贺以燕. 变压器冲击试验的发展、原理、标准与实践[J]. 电气应用, 2009, 28(16): 20-27.
HE Yiyang. Development, principle, standard and practice of transformer impulse test [J]. Electrotechnical Application 2009, 28(16): 20-07.
- [10] 孙锋. 浅谈雷电冲击试验[J]. 电气制造, 2009(06): 68-69.
SUN Feng. Talking about lightning impulse test [J]. Electrical manufacturing 2009(06): 68-69.
- [11] 蔡建昌. 电力变压器雷电冲击试验故障分析[J]. 通讯世界, 2018(02): 208-211.
CAI Jianchang. Fault analysis of lightning impulse test of power transformer [J]. Telecom World, 2018(02): 208-211.
- [12] 郭二平. 变压器雷电冲击试验故障分析[J]. 变压器, 2008, 11: 69-70.
GUO Erping. Fault analysis of transformer lightning impulse test[J]. Transformer 2008, 11: 69-70.
- [13] 万长鸿. 电力变压器雷电冲击试验故障分析探讨[J]. 水利天地, 2013(07): 43.
WAN Changhong. Discussion on failure analysis of lightning impulse test of power transformer[J]. Water Conservancy World, 2013(07): 43.
- [14] 宋作森, 刘东, 钱国超, 等. 规范大容量换流变雷电冲击试验波形参数重要性[J]. 云南电力技术, 2016, 44(02): 32-35.
SONG Zuosen LIU Dong QIAN Guochao et al. Discussion on necessary of waveform parameters of lightning impulse test for the large capacity changing flow[J]. YUNNAN ELECTRIC POWER, 2016, 44(02): 32-35.
- [15] 宣耀伟, 乐彦杰, 张娜飞, 等. 雷电冲击试验冲击电压发生器调波电阻的确定[J]. 机电工程, 2014, 31(03): 388-392.
XUAN Yaowei LE Yanjie ZHANG NaFei et al. Method to determine wave resistance of impulse voltage generator for lightning impulse test[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(03): 388-392.
- [16] 王国枝, 田俊梅. 冲击电压发生器波形和参数的计算模型与仿真[J]. 山西电力, 2009(01): 58-60.
WANG Guozhi, TIAN Junmei. The Calculation Model of Waveforms and Parameters of Impulse Voltage Generator and Simulation[J]. Shanxi Electric Power, 2009(01): 58-60.
- [17] 刘学民. 变压器冲击试验波形影响因素的研究[D]. 华北电力大学, 2013.
LIU Xuemin, Research on Wave-Effecting Factor of Transformer Impulse Tests[D]. North China Electric Power University, 2013.
- [18] 刘学刚. 干式变压器雷电波冲击响应分析[D]. 湖南大学, 2014.
LIU Xuegang. Analysis of lightning impulse response of dry-type transformer[D]. Hunan University, 2014.
- [19] 解洋. 干式变压器的电场分析及波过程研究[D]. 沈阳工业大学, 2018.
XIE Yang. Study on Electric Field Analysis and Wave Process of Dry-type Transformer[D]. Shenyang University of Technology, 2018.
- [20] 刘超, 阮江军, 逯怀东, 等. 110kV 环氧浇注干式变压器绝缘结构的仿真验证[J]. 电测与仪表, 2016, 53(14): 6-9.
LIU CHAO, RUAN Jiangjun, LU Huaidong. et al. Simulation verification on insulation structure of 110kV cast resin dry-type transformer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(14): 6-9.
- [21] 张晓同, 刘旭光, 徐友刚, 等. 基于有限元软件的10kV干式变压器主空道电场研究[J]. 电工技术, 2017(03): 7-9.
ZHANG Xiaotong, LIU Xuguang, XU Yougang, et al. Research on the electric field of main air channel of 10kV dry-type transformer based on finite element software[J]. Electric Engineering, 2017(03): 7-9.
- [22] 周常凭. 浅析雷电冲击缺陷故障的判断与处理[J]. 中国高新技术企业, 2013(31): 118-119.
ZHOU Changping. Analysis on the judgment and treatment of lightning impulse defect fault[J]. China HighTech Enterprise

- prises, 2013(31):118-119.
- [23] 胡宪牛. 电力变压器雷电冲击试验故障分析探讨[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2003(05):5-6+9.
HU Xianniu. Discussion on failure analysis of lightning impulse test of power transformer[J]. Journal of Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology, 2003(05):5-6+9.
- [24] 张文亮, 张国兵. 特高压变压器长波前时间雷电冲击试验及其等价性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 112-118.
ZHANG Wenliang, ZHANG Guobing. Equivalent analysis on UHV transformer lightning impulse test with longer duration of front time[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22):112-118.
- [25] 蒋将. 变压器雷电冲击试验技术的估算及运用[J]. 变压器, 2014, 51(01):60-61.
JIANG Jiang. Estimation and application of transformer lightning impulse test technology[J]. Transformer, 2014, 51(01): 60-61.
- [26] 马昊, 王伟, 张鑫, 等. 一起 500kV 电力变压器雷电冲击试验击穿故障分析[J]. 变压器, 2019, 56(09):74-
- [77] MA Hao, WANG Wei, ZHANG Xin, et al. Fault analysis of 500kV power transformer lightning impact test[J]. Transformer, 2019, 56(09):74-77.