

# 天然酯绝缘油对110 kV电力变压器主纵绝缘强度的影响分析

王建民<sup>1,2</sup>, 于东旭<sup>1</sup>, 王浩名<sup>1,3</sup>, 杜振斌<sup>2</sup>, 刘兰荣<sup>2</sup>, 刘东升<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学 a. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室; b. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130; 2. 保定天威保变电气股份有限公司 河北省输变电装备电磁与结构性能重点实验室, 河北 保定 071056; 3. 华北电力大学(保定) 电力工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:**为了分析天然酯绝缘油对电力变压器绝缘性能的影响,首先分别对相同绝缘结构的110 kV天然酯绝缘油与矿物绝缘油电力变压器进行绕组波过程计算,得到两种变压器的纵绝缘裕度。然后分别以工频下线性分布的绕组电位和波过程计算出的非线性绕组电位为激励,对两种绝缘油变压器主绝缘的复合电场进行仿真计算,并对其分布特性进行对比分析。最后运用全域电力线扫描法计算了两种绝缘油变压器的主绝缘裕度,并针对天然酯绝缘油变压器主绝缘强度薄弱的问题进行了结构改进与效果分析。结果表明:通过增设绝缘纸筒及调整油隙尺寸,改进后的天然酯绝缘油变压器最小绝缘裕度提高了15.8%,满足了主绝缘强度要求,为开发大型天然酯绝缘油变压器及结构优化提供了参考依据。

**关键词:**天然酯绝缘油;电力变压器;波过程;主纵绝缘强度;结构优化

**中图分类号:**TM214;TM411 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.01.010

## Influence of natural ester insulating oil on main and longitudinal insulation strength of 110 kV power transformer

WANG Jianmin<sup>1,2</sup>, YU Dongxu<sup>1</sup>, WANG Haoming<sup>1,3</sup>, DU Zhenbin<sup>2</sup>, LIU Lanrong<sup>2</sup>, LIU Dongsheng<sup>2</sup>

(1. a. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment; b. Key Laboratory of Electro-magnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Hebei Province Key Laboratory of Electromagnetic and Structural Performance of Power Transmission and Transformation Equipment, Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd., Baoding 071056, China; 3. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of natural ester insulating oil on the insulating properties of power transformers, at first, the winding wave processes of a 110 kV natural ester insulating oil and a mineral insulating oil power transformers with the same insulation structure were calculated, and the longitudinal insulation margins of the two transformers were obtained. And then, the winding potential with linear distribution under power frequency and the nonlinear winding potential calculated by wave process were used as excitation sources respectively, the composite electric field of the two insulating oil transformers main insulation were simulated, and their distribution characteristics were compared and analyzed. At last, the main insulation margins of the two insulating oil transformers were calculated by using the whole-region electric flux line scanning method, and in view of the weak main insulation strength of natural ester insulating oil transformer, the structure was improved and the improvement effect was analyzed. The results show that through adding insulation paper boards and adjusting the size of oil ducts, the minimum insulation margin of the improved natural ester insulating oil transformer increases by 15.8%, which meets the requirements of main insulation strength, which provides a reference for developing large natural ester insulating oil transformer and optimizing its structure.

**Key words:** natural ester insulating oil; power transformer; wave process; main and longitudinal insulation strength; structure optimization

## 0 引言

目前,我国广泛应用的高压大容量电力变压器

主要是以矿物绝缘油为绝缘冷却介质的油浸式变压器。尽管矿物绝缘油具有良好的冷却、绝缘性能和较低的成本,但其燃点较低,很难满足矿山、军事设施及高层建筑等对安全、消防有较高要求场所的

需求。此外,矿物绝缘油难降解,一旦发生泄漏将会对附近环境造成严重污染。

天然酯绝缘油作为一种环保液体绝缘介质,具有可生物降解、可再生、防火性能良好等优点,并且它与变压器中固体绝缘材料的相容性也较好,因此,应用前景十分广阔<sup>[1-5]</sup>。目前,天然酯绝缘油已在国内外变压器生产制造中得到了应用和发展。国外已经掌握了420 kV及以下天然酯绝缘油变压器的设计制造技术,我国对天然酯绝缘油变压器的研究起步较晚,现已设计制造了220 kV及以下的天然酯绝缘油变压器<sup>[6-7]</sup>。

尽管天然酯绝缘油较传统矿物绝缘油有许多优势,但有研究表明,在极不均匀电场和较大油隙的条件下,其耐受雷电冲击的能力要明显弱于矿物绝缘油。在对具有相同绝缘结构的天然酯绝缘油与矿物绝缘油电力变压器进行电气绝缘产品性能试验之后,发现矿物绝缘油变压器的所有试验结果满足国家标准性能要求,而天然酯绝缘油变压器按国家标准进行雷电冲击全波试验时在高压绕组端部出现了爬电击穿的现象<sup>[8-11]</sup>。

目前关于110 kV及以上天然酯绝缘油电力变压器方面的文献较少,为了探究天然酯绝缘油对雷电冲击下电力变压器主纵绝缘强度的影响,本研究以一台110 kV电力变压器为研究对象,分别以天然酯绝缘油与I-10矿物绝缘油为绝缘介质,对其进行雷电冲击下绕组波过程和主绝缘电场计算,并对分布特性进行对比分析,为天然酯绝缘油电力变压器的开发设计提供参考。

## 1 雷电冲击下的变压器绕组波过程计算与分析

### 1.1 产品结构及绕组等值电路模型

本研究分析的天然酯绝缘油变压器为有载调压双绕组变压器,额定容量为50 MVA,额定电压比为110/37 kV。高压绕组线圈型式为连续式,由86个线饼组成,采用端部出线。低压绕组线圈型式为双连续式,由46个线饼组成。调压绕组线圈型式为单层层式,共56匝,调压范围为 $(\pm 8 \times 1.25\%)$ kV。

在利用波过程专用仿真软件Wavesoft进行雷电冲击响应计算时,依据该变压器绕组的结构特点,将各绕组划分成每两饼一个单元,并建立只包含电感、电容参数的等值电路如图1所示(在较高频率下不考虑绕组电阻的影响)<sup>[12]</sup>。其中,高、低压绕组的单元电感分别用 $L_1$ 、 $L_2$ 表示,高压绕组与油箱间、低压绕组与铁心间的电容分别用 $C_{10}$ 、 $C_{20}$ 表示,

等值纵向电容分别用 $K_1$ 、 $K_2$ 表示,两绕组间的电容则用 $C_{12}$ 表示。

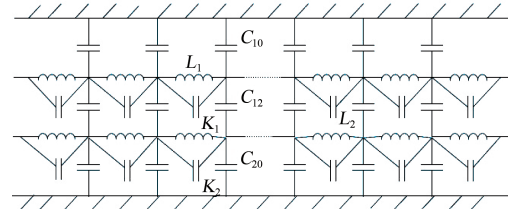


图1 变压器绕组等值电路

Fig.1 Transformer winding equivalent circuit

根据图1中等值电路的特点,选择节点电压作为独立变量来求解该电路,则相应的节点电压矩阵方程如式(1)所示。

$$Y_n U_n = I_s \quad (1)$$

式(1)中: $U_n$ 为节点电压列向量; $Y_n$ 为节点导纳矩阵; $I_s$ 是流入节点的电流源列向量。利用广义特征值方法可以求解这种具有 $n$ 个独立变量的节点电压方程并得到各绕组线饼单元的电位。

### 1.2 天然酯绝缘油变压器绕组电位分布和油道梯度分布

依据110 kV绝缘水平的技术要求在高压首端施加幅值为480 kV的雷电冲击电压,取天然酯绝缘油的相对介电常数为3.1,利用Wavesoft软件计算了天然酯绝缘油变压器在遭受雷电全波冲击时最大、额定和最小3个分接状态下的绕组电位和饼间油道梯度分布,结果分别如图2、图3所示,为了方便地表达计算电位或梯度电压与施加冲击电压之间的相对大小关系,因此在图2、图3中纵坐标为测得电位或梯度电压占施加冲击电压的百分比。由于低压绕组不是本研究分析的重点,相应的传递电压及梯度分布图不再列出。

从图2~3可以看出,在雷电全波冲击下高压绕组电位呈非线性分布,首端电位变化较快,梯度较

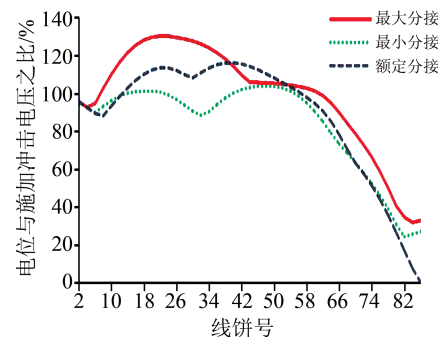


图2 全波冲击下的高压绕组电位分布

Fig.2 Potential distribution of high-voltage winding under full wave impact

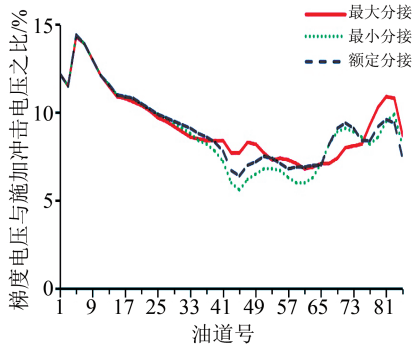


图3 全波冲击下的高压油道梯度电压分布

Fig.3 Gradient voltage distribution of high-voltage oil duct under full wave impulse

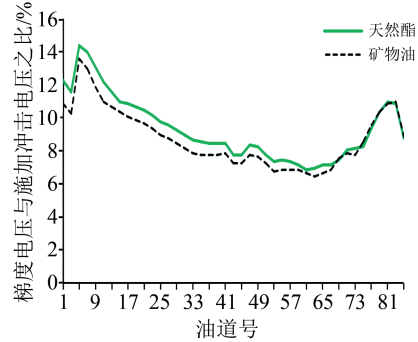


图5 两种绝缘油变压器高压油道梯度分布的对比

Fig.5 Comparison of gradient distribution of high-voltage oil duct for two kinds of insulating oil transformers

大;高压绕组在3种分接方式下的最高电位并非出现在绕组首端,而是在绕组上半部第18~40号线饼间,其中最高电位出现在最大分接状态下,其值约为施加冲击电压的130%。此外,3种分接方式下的最大油道梯度电压均出现在高压绕组上端第5号油道,并且相差不大,其值约为施加冲击电压的15%。

1.3 两种绝缘油变压器波过程结果的对比分析

为探究天然酯绝缘油和I-10矿物绝缘油的电气特性差异对绕组波过程计算结果的影响,在其他计算条件相同的情况下,取矿物绝缘油的相对介电常数为2.2,对同一绝缘结构的矿物绝缘油电力变压器进行绕组波过程计算,并与天然酯绝缘油变压器绕组波过程计算结果进行对比分析。

图4和图5分别为两种绝缘油变压器高压绕组在全波冲击下的电位分布和油道梯度电压分布比较结果。从图4~5可知,两种绝缘油变压器的高压绕组电位及梯度电压分布趋势相同,而对应的最大值略有差异。

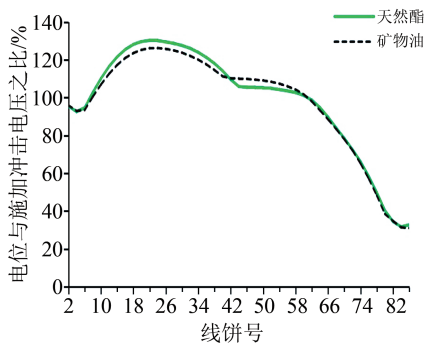


图4 两种绝缘油变压器高压绕组冲击电位分布的对比

Fig.4 Comparison of impulse potential distribution of high-voltage windings for two kinds of insulating oil transformers

为说明两种绝缘油变压器全波冲击响应的具体差异程度,表1列出了两种绝缘油变压器在全波下的高压绕组线饼最大电位和油道最大梯度电压

表1 高压绕组最大电位和油道最大梯度电压的比较

Tab.1 Comparison of maximum potential of high-voltage winding and maximum gradient voltage of oil duct

类型	天然酯绝缘油	矿物绝缘油
	变压器	变压器
最大电位与施加冲击电压之比/%	130.3	126.3
最大电梯度电压与施加冲击电压之比/%	14.3	13.5

占施加冲击电压的百分比。由表1可知,天然酯绝缘油变压器所对应的线饼最大电位和油道最大梯度电压均稍大于矿物绝缘油变压器的对应值。

为了分析和判断两种绝缘油变压器的纵绝缘强度,表2给出了两种绝缘油变压器高压绕组线饼间最大梯度电压对应的最小绝缘裕度。由于目前有关天然酯绝缘油电力变压器绝缘强度方面的实验和运维数据较少,表2中的击穿电压参考了文献[13]提供的研究结论,即在负极性雷电冲击下大油隙均匀电场和小油隙稍不均匀电场中,天然酯绝缘油与矿物绝缘油的击穿电压基本一致,并在此基础上,根据文献[14]中的矿物绝缘油最小击穿电压并通过数据拟合得到天然酯变压器高压绕组第5号油道的最小击穿电压。从表2可知,两种绝缘油变压器高压绕组线饼间最大梯度电压对应的最小绝缘裕度均大于1.5,其纵绝缘强度满足电气性能的要求。

表2 两种绝缘油变压器高压绕组最小绝缘裕度的比较

Tab.2 Comparison of minimum insulation margin of high-voltage windings for two kinds of insulating oil transformers

类型	最大梯度电压与施加冲击电压之比/%	作用电压/kV	击穿电压/kV	绝缘裕度
天然酯5号绝缘油道	14.3	68.6	103.6	1.51
矿物油5号绝缘油道	13.5	64.8	103.6	1.60

## 2 变压器主绝缘复合电场计算模型的建立

由变压器绕组波过程的分析结果可知,在雷电冲击下绕组电位沿绕组高度呈非线性分布并存在梯度电压,因此,变压器绕组端部的主绝缘电场分布受绕组与铁轭之间以及绕组之间的电压和沿绕组轴向高度的电位分布共同作用,并产生极不均匀的复合电场。为了分析两种绝缘油对110 kV变压器主绝缘强度的影响,利用有限元分析软件ElecNet进行变压器主绝缘复合电场的计算,对应的简化计算模型如图6所示,并做如下假定:

(1)按线性、稳态轴对称电场来计算;

(2)天然酯绝缘油、绝缘纸和绝缘纸筒的相对介电常数分别取3.1、3.2和4.4,I-10矿物绝缘油、绝缘纸和绝缘纸筒的相对介电常数分别取2.2、3.2和4.4;

(3)工频下绕组电位沿绕组高度按线性分布考虑,雷电冲击下绕组电位沿高度按实际非线性分布并折算到工频下1 min进行计算;

(4)模型主要由低压绕组、高压绕组、调压绕组、绝缘油、绝缘纸筒和角环等组成;忽略引线及其他结构件对端部电场的影响。

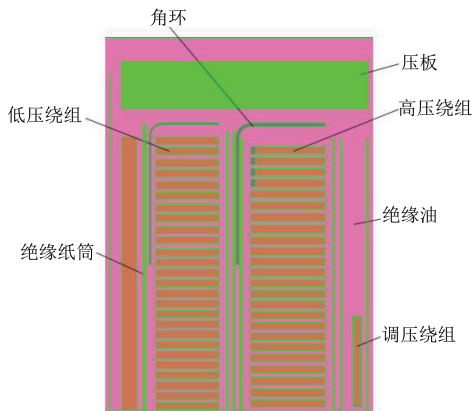


图6 变压器上端部主绝缘复合电场计算模型

Fig.6 Calculation model of composite electric field of main insulation in transformer upper end

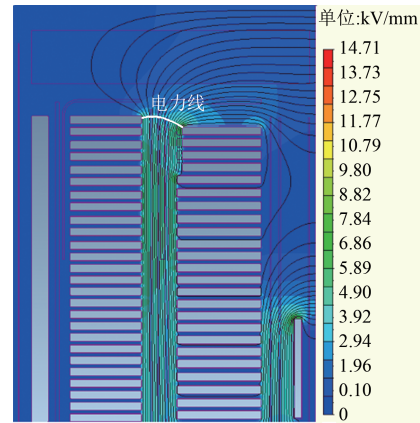
计算模型中的上边界和左边界分别代表铁轭内表面和铁心外表面,均为地电位或一类齐次边界条件,而下边界和右边界按二类齐次边界条件处理。根据匝绝缘、纸板及绝缘油各材料的尺寸,在进行有限元网格自动剖分时,分别将对应的最大剖分单元尺寸设置为1、2、5 mm。

## 3 变压器主绝缘电场计算结果与分析

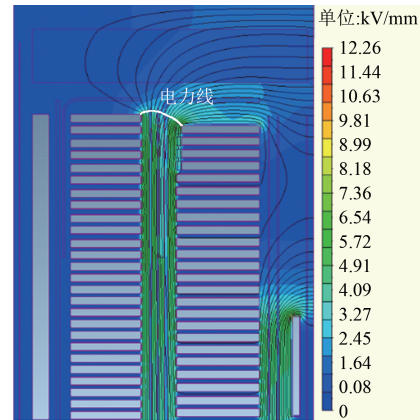
### 3.1 工频1 min下的主绝缘复合电场分析

在对变压器主绝缘电场计算模型中的高压绕

组施加200 kV线性分布的工频电压,而低压及调压绕组按偏严格的情况施加零电位后,通过改变绝缘油的介电常数得到天然酯绝缘油及I-10矿物绝缘油变压器主绝缘的复合电场分布如图7所示。



(a)天然酯绝缘油



(b)矿物绝缘油

图7 工频下两种绝缘油变压器主绝缘的等电位线及电场分布云图

Fig.7 Equipotential lines and electric field distribution of two kinds of transformers under power frequency

由图7可知,两种绝缘油变压器各绕组之间的中部电场分布接近均匀,而高低压绕组与高压、调压绕组之间的端部电场分布很不均匀,相应的电场强度最大值均出现在高压端部第一饼左侧固体绝缘内(图中分别给出了通过此位置的电力线)。计算结果显示,天然酯绝缘油变压器高压第一饼匝绝缘中的场强最大值为14.71 kV/mm,对应表面油隙中的场强最大值为8.87 kV/mm;矿物绝缘油变压器高压第一饼匝绝缘中的场强最大值为12.26 kV/mm,对应表面油隙中的最大场强为9.83 kV/mm。从计算结果可知天然酯绝缘油隙中的最大电场强度较矿物绝缘油隙中的最大电场强度低约10%,而天然酯绝缘油浸纸中的最大电场强度较矿物绝缘油浸纸中的最大电场强度高约20%。

图8为高低压绕组端部之间的电场强度沿其电力线的分布(该电力线穿过了3个绝缘纸筒和1个角环)。从图8可以看出,天然酯油纸绝缘结构中的场强分布较矿物绝缘油绝缘结构的分布更为均匀。

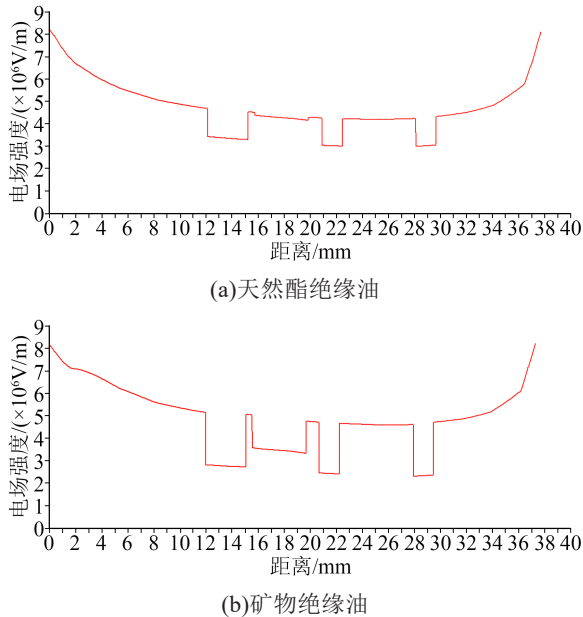


图8 两种绝缘油变压器高低压绕组端部之间的场强沿电力线的分布

Fig.8 Distribution of field strength along electric fluxline between high and low voltage windings end in two kinds of transformers

### 3.2 雷电全波冲击下的主绝缘复合电场分析

根据上节对变压器绕组在雷电全波冲击下的电位分布计算结果,分别对各绕组线饼施加折算到工频1 min下的非线性电位值,其他计算条件及模型与工频情况下的电场计算相同。通过计算得到天然酯绝缘油及矿物绝缘油变压器在雷电全波冲击下的主绝缘电场分布如图9所示。

由图9可知,两种绝缘油变压器在雷电全波冲击下的电场强度最大值出现部位与工频情况下不同。工频下场强最大值所在电力线是由高压绕组首段线饼指向低压绕组首段线饼,而雷电冲击下受高压绕组上半部较高电位的影响(见图4),最大场强所在电力线是由高压绕组第15号线饼右侧指向调压绕组上端部左侧。两种绝缘油变压器在雷电全波冲击下的电场强度最大值出现在调压绕组上端左侧位置(图9中分别给出了通过此位置的电力线),天然酯绝缘油变压器匝绝缘中的场强最大值为22.15 kV/mm,对应表面油隙中的场强最大值为10.54 kV/mm;而矿物绝缘油变压器匝绝缘中的场强最大值为17.41 kV/mm,对应表面油隙中的场强

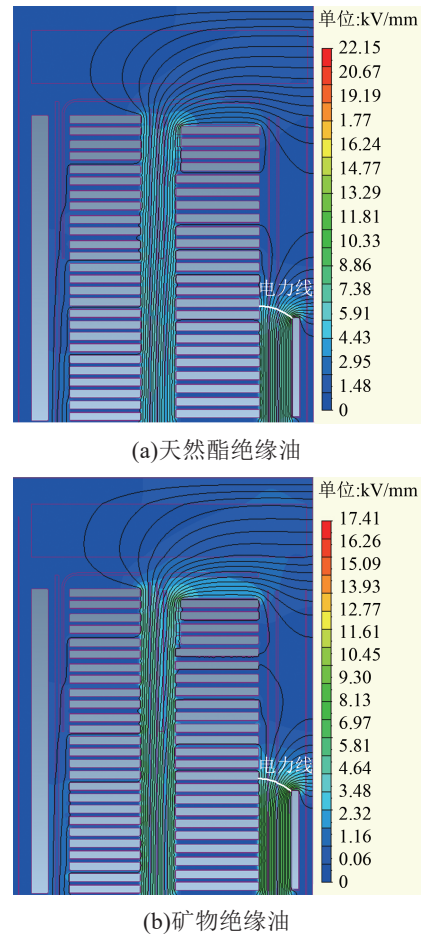


图9 雷电全波折算到工频1 min下的等电位线及电场分布云图

Fig.9 Equipotential lines and electric field distribution under full wave impulse converted to power frequency for 1 minute

最大值为11.70 kV/mm。

另外,经计算在高压绕组与调压绕组上端部之间两种绝缘油的油纸交界面最大切向电场强度接近相等,工频下约为1.5 kV/mm,雷电全波冲击下约为1.6 kV/mm。

### 3.3 工频和雷电全波冲击下的主绝缘裕度计算与分析

变压器的主绝缘强度不仅与电场强度发生值(实际设计值或计算值)有关,还与主绝缘结构的电场强度许用值有关。因此,由上节得到的局部最大电场强度并不能充分说明主绝缘结构是否可靠,还需要进一步用绝缘裕度进行判断或分析。本文对变压器主绝缘裕度的计算采用全域电力线扫描法,该法选择油隙的局部放电起始场强作为许用值来计算绝缘裕度,旨在实现变压器的无局部放电设计<sup>[15-16]</sup>。矿物绝缘油的场强许用值可应用瑞士魏曼公司总结出的近似公式来计算,如式(2)所示。

$$E_{cp} = A \times d^{-0.37} \quad (2)$$

式(2)中: $E_{cp}$ 是油隙局部放电的起始场强许用值, kV/mm; $A$ 是与变压器油含气量、油隙位置等有关的系数; $d$ 是沿电力线方向的油隙长度, mm。在求出场强许用值后,绝缘裕度可依据式(3)求得。

$$q = E_{cp} / \overline{E_{AB}} \quad (3)$$

式(3)中: $q$ 为绝缘裕度; $\overline{E_{AB}}$ 为沿电力线的平均电场强度, kV/mm。

对于天然酯绝缘油而言,由于多数文献研究结论显示其工频耐压特性与矿物绝缘油的工频耐压特性基本一致,故本研究在进行工频下的天然酯绝缘油隙绝缘裕度计算时,将系数 $A$ 近似取为与矿物绝缘油一致,即按工频50 Hz、1 min条件下选取 $A=21.5$ 。根据文献[8-11]的研究结论:在较大间隙、不均匀电场的情况下,天然酯绝缘油耐受瞬时雷电冲击的能力要弱于矿物绝缘油,因此,计算裕度时将雷电冲击折算后的场强许用值取矿物绝缘油场强许用值的80%。

根据上述全域扫描法对变压器主绝缘电场逐条电力线的计算分析,分别得到天然酯绝缘油和矿物绝缘油变压器在工频与雷电全波冲击下的最小绝缘裕度及其所在电力线的位置如表3~4所示。其中,雷电全波冲击下天然酯绝缘油隙最小裕度所在的电力线即为图9中标出的电力线,其场强许用值、平均值的分布曲线及绝缘裕度如图10所示。

从表3~4可以看出,矿物绝缘油变压器在工频条件下,油隙的最小绝缘裕度为1.16,而在全波雷电

表3 天然酯绝缘油隙的最小绝缘裕度

Tab.3 Minimum insulation margin of natural ester insulating oil gap

试验类型	最小绝缘裕度所在电力线	油隙最小绝缘裕度
工频	高压绕组首端指向低压绕组首端	1.25
雷电全波冲击	高压第15饼指向调压绕组上端部	0.95

表4 矿物绝缘油隙的最小绝缘裕度

Tab.4 Minimum insulation margin of mineral insulating oil gap

电压类型	最小绝缘裕度所在电力线	油隙最小绝缘裕度
工频	高压绕组首端指向低压绕组首端	1.16
雷电全波冲击	高压第15饼指向调压绕组上端部	1.10

油隙的最小绝缘裕度为1.10,满足绝缘强度要求;对于天然酯绝缘油变压器,虽然其工频下的最小绝缘裕度为1.25,但由于在雷电全波冲击下的最小绝缘裕度较小(仅为0.95),在高压、调压绕组之间的主绝缘易发生放电或被击穿,并在油纸交界面切向场强(最大值为1.6 kV/mm)的共同作用下形成沿面放电,最终可能在高压、调压绕组端部之间的油纸绝缘中产生击穿爬电现象。该计算分析结果与实际矿物绝缘油变压器所有试验满足国家标准性能要求,而天然酯绝缘油变压器在进行雷电全波冲击试验时高压、调压绕组端部出现爬电击穿的现象基本一致。

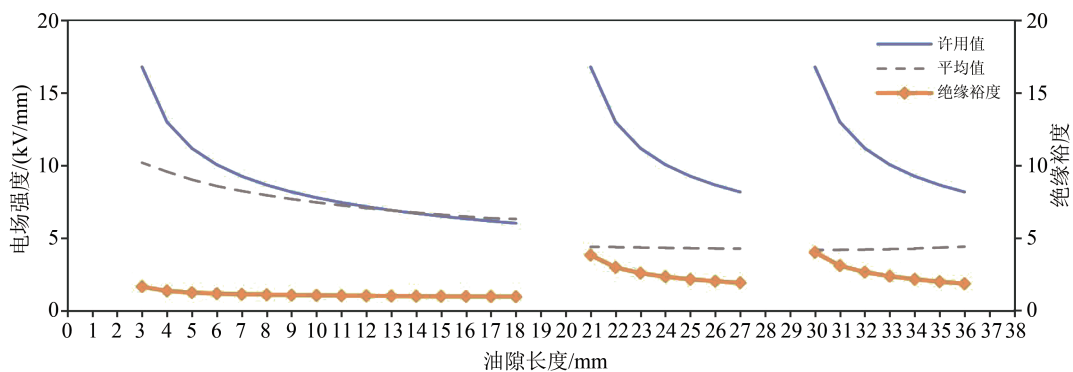


图10 天然酯绝缘油隙的场强许用值、计算平均值和绝缘裕度

Fig.10 Field strength allowable value, average value, and insulation margin of natural ester insulating oil gap

### 3.4 天然酯绝缘油变压器主绝缘结构改进与分析

为了提高天然酯绝缘油变压器的主绝缘强度,避免出现绝缘击穿和沿面爬电现象,根据上文计算分析结果和公式(2)油隙场强许用值与油隙尺寸之间的关系,对变压器原绝缘结构进行改进。具体措施是在保持调压绕组与高压绕组之间的主绝缘距离不变的前提下,通过对靠近调压绕组的较宽油隙

增设绝缘纸筒(如图11所示),实现分割油隙和提高油隙场强许用值的目的,从而提高绝缘裕度。通过采用相同的计算条件对改进后的绝缘结构进行计算,得到天然酯绝缘油变压器在雷电全波冲击下主绝缘的最小绝缘裕度所在电力线如图11所示。该电力线从高压绕组电位最高的第21饼指向调压绕组中部,其所跨4个油隙的场强许用值、平均值及绝

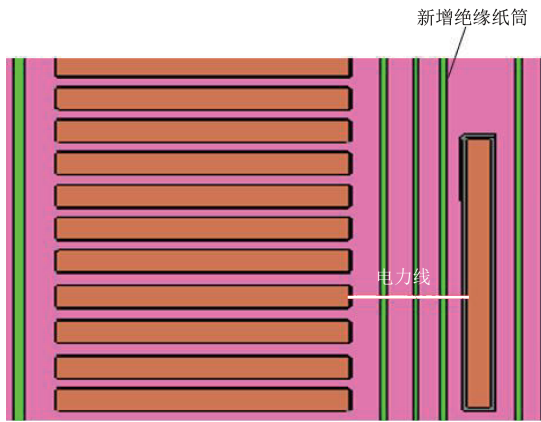


图11 主绝缘改进后最小绝缘裕度所在电力线示意图

Fig.11 Electric flux line with minimum insulation margin after improving main insulation structure

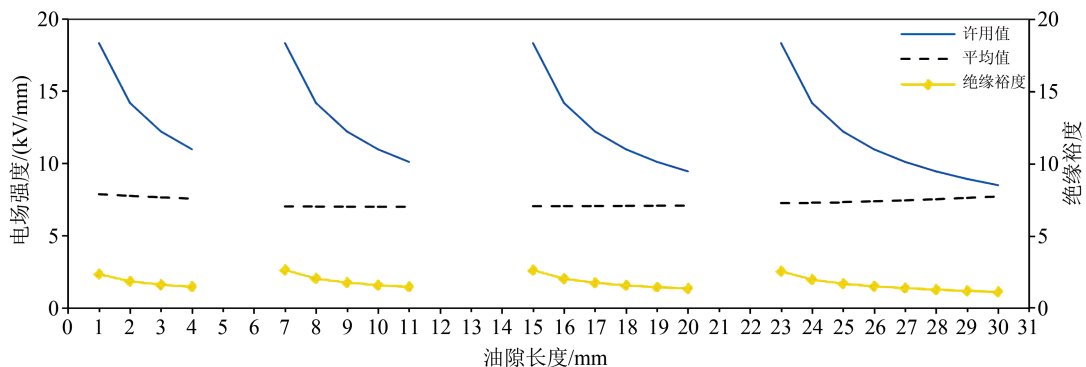


图12 主绝缘改进后天然酯绝缘油隙场强许用值、计算平均值和绝缘裕度

Fig.12 Field strength allowable value, average value, and insulation margin of natural ester insulating oil gap after improving main insulation structure

(2)在工频情况下,两种绝缘油变压器的电场强度最大值出现在高压首端线饼左侧部位,最小绝缘裕度出现在高、低压绕组之间的油隙中,二者的最小绝缘裕度满足主绝缘强度要求;受两种绝缘油介电常数差异的影响,天然酯绝缘油隙中的最大电场强度较矿物绝缘油隙中的最大电场强度减小约10%,而天然酯绝缘油浸纸中的最大电场强度较矿物绝缘纸中的最大电场强度增大约20%。

(3)在雷电冲击下,受绕组电位呈非线性分布及高压绕组上半部较高电位的影响,天然酯绝缘油与矿物绝缘油变压器的电场强度最大值出现在调压绕组上端左侧部位,最小绝缘裕度出现在高压、调压绕组之间的油隙中。计算结果显示矿物绝缘油变压器的最小绝缘裕度为1.10,满足绝缘性能要求,而天然酯绝缘油变压器的最小绝缘裕度为0.95,其电气绝缘强度较弱。

(4)针对天然酯绝缘油变压器雷电冲击下高压与调压绕组之间主绝缘强度较弱的问题,通过增设绝缘纸筒及调整油隙尺寸,使改进后的天然酯绝缘

缘裕度如图12所示。由图12可知,该电力线穿过的4个油隙平均场强较为接近,表明电场分布较均匀,油隙的最小绝缘裕度为1.10,较改进前的最小绝缘裕度提升了15.8%。

## 4 结论

(1)天然酯绝缘油与I-10矿物绝缘油变压器绕组波过程的电位分布及油道梯度分布趋势相同,天然酯绝缘油变压器线饼最大电位与油道最大梯度电压均大于矿物绝缘油变压器的相应值(在6%内),但根据对两种绝缘油变压器的纵绝缘强度分析可知,采用天然酯绝缘油对电力变压器纵绝缘结构或强度的影响基本可以忽略。

油变压器最小绝缘裕度提高了15.8%,满足了主绝缘强度要求,为开发大型天然酯绝缘油变压器及结构优化提供了参考依据。

## 参考文献:

- [1] 蔡胜伟,李华强,黄芝强,等.天然酯绝缘油变压器技术发展及应用概况[J].绝缘材料,2019,52(11):9-16.
- [2] 李剑,姚舒瀚,杜斌,等.植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望[J].高电压技术,2015,41(2):353-363.
- [3] 刘光祺,钟力生,于钦学,等.植物绝缘油研究现状[J].绝缘材料,2012,45(3):34-39.
- [4] 陈朋,余辉,陈江波,等.植物绝缘油主要组分的理化与电气性能研究[J].绝缘材料,2014,47(3):45-49.
- [5] 凡勇,周竹君,吴义华,等.植物绝缘油与变压器材料相容性的研究[J].绝缘材料,2013,46(5):29-32.
- [6] 李松江,胡婷,曾四秀,等.植物绝缘油变压器的研究进展[J].绝缘材料,2021,54(8):18-23.
- [7] 张涛,肖霞,杨文雁,等.变压器用天然酯绝缘油研究现状[J].中国油脂,2019,44(4):66-71.
- [8] LIU Q, WANG Z. Breakdown and withstand strengths of ester transformer liquids in a quasi-uniform field under impulse voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,

- 2013,20(2):571-579.
- [9] VON THIEN Y, AZIS N, JASNI J, et al. Evaluation on the lightning breakdown voltages of palm oil and coconut oil under non-uniform field at small gap distances[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology,2016,11(1):184-191.
- [10] 蒋松林,于钦学,夏林枫,等.植物绝缘油大间隙下的雷电冲击和直流击穿特性研究[J].绝缘材料,2020,53(5):58-63.
- [11] 黄芝强,李锦彪,刘刚,等.多种变压器液体绝缘介质的雷电冲击特性对比研究[J].变压器,2020,57(5):65-68.
- [12] 张宇萌,张喜乐,张萍,等.电力变压器冲击电压分布与传递过电压的仿真研究[J].变压器,2015,52(6):33-37.
- [13] RAPP K J, CORKRAN J, MCSHANE C P, et al. Lightning impulse testing of natural ester fluid gaps and insulation interfaces [J]. IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, 2009,16(6):1595-1603.
- [14] 谢毓城.电力变压器手册[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [15] 张国强,崔翔,王赞基,等.变压器主绝缘设计和可靠性评价的全域扫描法[J].华北电力大学学报,2002,29:192-195.
- [16] 王建民,常军,吕殿利,等.电力变压器主绝缘电场仿真软件的二次开发及应用[J].变压器,2017,54(3):38-43.
- [17] 王建民,张喜乐,孙优良,等.特高压换流变压器瞬态电场分布特性仿真研究[J].变压器,2011,48(9):1-5.
- 
- 收稿日期:2021-12-20 修回日期:2022-01-27
- 作者简介:王建民(1961-),男(汉族),河北保定人,教授级高级工程师,主要从事各类变压器及电抗器等产品的电磁热力关键技术研究。