## 非线性有限元法在出线装置复合绝缘 结构电场计算中的应用

#### 张施令

(国网重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 401123)

摘要:极性反转是换流变压器出线结构复合绝缘的一种特殊工作状态,极性反转时由于空间电荷作用可导致 绝缘介质内部及界面处电场畸变。另一方面,绝缘介质电性能参数是温度的函数,因此温度梯度导致的电性 能参数改变同样会影响绝缘结构在极性反转过程中的瞬态电场分布。基于此,为了较准确地模拟复合绝缘 结构在考虑温度分布条件下的极性反转瞬态电场,提出应用非线性有限元法对以上2种瞬态电场影响因素 进行耦合分析。首先研究了油浸纸复合绝缘体系电性能参数与温度的关系;然后详细介绍了基于非线性有 限元法的瞬态电场计算流程,并通过双层同轴复合绝缘结构模型验证了其有效性;最后对实际换流变压器出 线装置的油纸-环氧浸渍典型复合绝缘结构建立了二维轴对称仿真计算模型,在考虑材料非线性时的结果存 在较大差异,且极性反转过程中复合绝缘结构易出现畸变严重的局部高场强区。

关键词:换流变压器;极性反转;换流变压器出线结构;复合绝缘;非线性有限元法;瞬态电场
 中图分类号:TM 41
 文献标志码:A
 DOI:10.16081/j.epae.202004014

#### 0 引言

换流变压器作为超 / 特高压直流输电工程中的 重要设备,其运行状况直接关系到电力输送的可靠 性。换流变压器运行工况复杂,其阀侧绕组不仅要 承受交 / 直流电压的作用,而且在电能潮流反送或 极性反转试验中还需承受极性反转电压作用,这对 换流变压器绝缘系统的设计标准和制造质量都提出 了更高的要求,而出线装置作为连接换流变压器高 压绕组与套管尾部的必要设备,是变压器油中载流 端子与高压引出线的连接结构,对保证变压器的载 流性能和套管尾部的绝缘性能具有重要作用,其运 行状况更是决定换流变压器整体性能的关键因 素11。出线装置一般由绝缘纸板形成的屏障系统构 成,该系统可将大油道分割为若干小油隙,且各油隙 宽度与局部场强相匹配,这样可有效提高油隙的绝 缘强度,另外绝缘屏障可防止悬浮杂质和气泡等在 电应力作用下形成小桥击穿[2]。实际工程中的出线 装置一般安装在换流变压器升高座内部,空间较小, 结构紧凑,且同时存在变压器油、绝缘纸板、环氧浸 纸等多种复合绝缘介质,在交/直流稳态、极性反 转、交直流叠加等运行和试验电压下,电场分布极为 复杂,因此有必要在各工况下对换流变压器出线装

收稿日期:2019-02-23;修回日期:2020-01-26

基金项目:重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2018jcyjAX0486)

Project supported by Chongqing Research Program of Fundamental Science and Advanced Technology (cstc2018jcyjAX-0486) 置复合绝缘结构电场分布开展较为准确的数值模拟 研究<sup>[2-3]</sup>。高压套管尾部的电场比较集中,特别是均 压球表面及附近的油中场强较高,极易引发电晕放 电、闪络甚至绝缘介质击穿,因此需设计合理的变压 器出线装置结构。

鉴于此,本文进一步完善了换流变压器出线装置的电场计算模型,并开发了可计及材料非线性的 有限元计算方法,主要思路是在大型有限元分析软件ANSYS计算平台上进行二次开发,通过数值迭代 的方式将材料非线性特性与瞬态计算过程相互耦 合<sup>[46]</sup>。同时本文对油浸纸、环氧浸纸复合绝缘体系 材料参数与温度的非线性关系进行了试验测量,可 为实际出线装置的有限元非线性电场计算提供基础 材料参数<sup>[7-15]</sup>(暂不考虑绝缘纸板电导率各向异性对 瞬态电场分析带来的影响)。本文内容主要分为以 下三方面:

(1)对油纸-环氧浸纸复合绝缘体系介电性能进 行试验测量,得到材料温度和电阻率的非线性关系, 仿真得到换流变压器出线装置实际运行电压、电流 波形;

(2)详细介绍了非线性有限元法瞬态电场计算 流程并运用同轴绝缘结构模型进行数值验证;

(3)建立了实际换流变压器出线装置的二维轴 对称全模型,并计算了各种电压型式下的电场分布 规律,对线性和非线性材料极性反转瞬态电场分布 特征进行了对比分析。

本文的研究结果可为换流变压器出线装置的设 计、制造和运行提供一定的数据和理论依据,同时所 提出的非线性有限元计算方法还适用于其他复杂绝缘结构<sup>[16-17]</sup>。

## 1 出线装置实际运行工况模拟及油纸绝缘 体系介电性能测试

换流变压器出线装置是一种典型的复合绝缘结构,其内部包含绝缘纸板成型件、套管尾部的环氧浸纸芯体和变压器油等。若要对油纸-环氧浸纸复合绝缘体系在各工况下的电场分布规律进行较为准确的计算,则需对各绝缘材料的介电性能进行试验测量。试样制备中使用的油纸绝缘复合绝缘体系与实际换流变压器出线装置材料一致。将油浸纸剪成90 mm×90 mm的正方形试样后装入模具,在110℃的条件下真空干燥72 h,除去油浸纸中所含的水分和结晶水。

绝缘纸板试样分为0.5、1.0、1.5 mm这3种厚度, 在70℃的条件下测量了其相对介电常数ε,、损耗角 正切值 tanδ和直流体积电阻率ρ。考虑到绝缘纸板 成型件安装在出线装置内部后充分浸渍变压器油形 成油纸复合绝缘介质,需分析上述介电参数在绝缘 纸板浸油前后的变化情况,现将具体试验结果列于 表1中。

表1 70℃下绝缘纸板试样介电参数

Table 1 Dielectric parameters of insulation paper samples under 70 °C

		_		
绝缘纸板 状态	绝缘纸板 厚度 / mm	$\mathcal{E}_{r}$	$ an\delta$	$\rho  /  (\Omega \! \cdot \! \mathbf{m})$
	0.5	3.45	tan δ 5.50×10 <sup>-3</sup> 8.20×10 <sup>-3</sup> 6.61×10 <sup>-3</sup> 3.85×10 <sup>-3</sup> 7.06×10 <sup>-3</sup> 5.68×10 <sup>-3</sup>	1.89×10 <sup>14</sup>
干燥	1.0	4.41	8.20×10 <sup>-3</sup>	$1.00 \times 10^{14}$
	1.5	家纸板 $\varepsilon_{\rm f}$ mm $\varepsilon_{\rm r}$ tan $\delta$ 0.5 3.45 5.50×10 1.0 4.41 8.20×10 1.5 3.70 6.61×10 0.5 4.77 3.85×10 1.0 5.31 7.06×10 1.5 5.78 5.68×10	6.61×10 <sup>-3</sup>	$1.47 \times 10^{14}$
	绝缘纸板 厚度 / mm         ε <sub>r</sub> tar           0.5         3.45         5.50           1.0         4.41         8.20           1.5         3.70         6.61           0.5         4.77         3.85           1.0         5.31         7.06           1.5         5.78         5.68	3.85×10 <sup>-3</sup>	1.96×1014	
浸油	1.0	5.31	7.06×10 <sup>-3</sup>	9.60×1013
	1.5	$\begin{array}{c c} \varepsilon_{\rm r} & \tan \delta \\ \hline 3.45 & 5.50 \times 10^{-3} \\ 4.41 & 8.20 \times 10^{-3} \\ 3.70 & 6.61 \times 10^{-3} \\ 4.77 & 3.85 \times 10^{-3} \\ 5.31 & 7.06 \times 10^{-3} \\ 5.78 & 5.68 \times 10^{-3} \end{array}$	$1.47 \times 10^{14}$	

从表1可看出,绝缘纸板在干燥和浸油条件下的介电参数数值不同。3种厚度的干燥纸板在浸油 后,相对介电常数都呈增大趋势,而损耗角正切值却 呈现减小趋势,直流电阻率的变化与试样厚度存在 不确定关系。

对于实际运行中的换流变压器出线装置,套管 与变压器绕组相连的金属导杆在运行中由于焦耳发 热将形成温度梯度分布,此时纸板试样材料参数随 温度发生变化,内部绝缘纸板不可能处于70℃的恒 定温度环境中,因此需对所备纸板试样进一步开展 温度谱分析,本文采用Concept80宽带介电谱测试系 统开展温度谱分析。采用低频模块介电分析系统进 行固体绝缘样品的测量,该系统的频率测试范围为 10<sup>-6</sup>~3 GHz,选择直径为20 mm、厚度为2 mm的镀金 电极。将样品置于该测试系统金属腔体内部,集成 液氮控制和加热装置分别实现腔体降温和升温过程,温度可控范围为-150~500℃,精度为0.01℃。 考虑到出线装置的实际运行环境,将温度谱范围设 定为20~120℃,绝缘纸板试样的参数测量结果如 图1所示,图中T为温度。



#### 图 1 相对介电常数、损耗角正切值与温度的关系 Fig.1 Relationship of $\varepsilon_r$ and tan $\delta$ vs. T

从图1可看出,在浸油和未浸油2种情况下,绝 缘纸板各介电参数随温度的变化规律基本相同,其 中相对介电常数在20~120℃的温度范围内略有升 高,最大变化率仅为4.4%,因此在交流电场计算中 可将介电常数视为常数;但损耗角正切值出现先减 小后指数增加的变化趋势。实际上在直流稳态电压 的作用下,换流变压器出线装置的电场分布取决于 绝缘材料电阻率,而电阻率与温度间表现出了明显 的非线性关系<sup>[18]</sup>。

## 2 非线性有限元法瞬态电场计算流程及数 值分析

#### 2.1 非线性有限元法瞬态电场计算流程

在ANSYS电场计算平台上通过ANSYS参数化 设计语言APDL(ANSYS Parametric Design Language)二次开发非线性有限元瞬态电场迭代计算方 法,其中对于交流场、直流场运用静电场和直流稳态 场计算模块,对于极性反转过程运用瞬态场计算模 块。在二次开发过程中主要需解决两方面的问题: ①需同时完成电场和温度场的计算,将温度场计算 结果耦合到电场计算结果中;②将试验测得的材料 属性数据输入程序中,根据得到的模型各单元处的 温度值,由温度谱曲线进行插值得到材料在该处的 属性。

为了解决上述2个问题,运用物理环境迭代计 算方法,定义电场和温度物理环境分别用于计算电 场分布和温度分布,2个物理环境实际使用同一个 网格划分模型。对于迭代计算方法,可使用\*VGET 命令将前一次求解得到的场强和温度保存为数组, 利用该数组计算出每个有限元单元的电阻率,然后 利用 EMODIF 命令修改每个有限元单元的电阻率, 进行下一次求解。依此循环,直到满足迭代精度或 达到规定的最大迭代次数。在 ANSYS 运行环境下 定义电场 / 温度场物理计算环境,将变压器出线装 置绝缘结构电场 / 温度场计算模型写入电场 / 温度 场物理环境, APDL 为:

PHYSICS, WRITE, electrical / thermal, , ,

PHYSICS, READ, electrical / thermal, ,,! 写入物理环境,并随时调用;第1次调用电场物理环境并进行场域解算,在解算结果的基础上分别对绝缘纸板 / 变压器油进行后处理

ELMAX\_Paper=ELMIQR(0,13)! 计算模型网格划分后绝缘纸 板中有限元单元数量

\*GET, BB\_Paper(1), elem, NUM, MIN

CC\_Paper(1)=ELMIQR(BB\_Paper(1),-1)

 $*{\rm DO}, J, 2, {\rm ELMAX\_Paper}$ 

BB\_Paper(J)=ELNEXT(BB\_Paper(J-1))! BB\_Paper用于装载 单元序列编号

CC\_Paper(J)=ELMIQR(BB\_Paper(J),-1)! CC\_Paper用于装载 单元材料编号

\*ENDDO

220

完成第1次电场计算后对电场计算结果进行后 处理,提取绝缘纸板 / 变压器油各个单元的电场强 度,具体为:

ETABLE, E, EF, SUM

\*VGET, EE\_Paper, ELEM, BB\_Paper, ETAB, E, ,2

\*VGET, JJ\_Paper, ELEM, BB\_Paper, ETAB, J, , 2! EE\_Paper用 于装载绝缘纸板各单元的电场强度, JJ\_Paper用于装载绝缘纸板各 单元的焦耳发热量

开始循环计算,设WXH为循环控制因数(本文 将WXH的最大值设定为30),然后进行变压器出线 装置电场模拟,得到纸板单元电场值EE\_Paper(1, 2\*(WXH+3))和焦耳发热值JJ\_Paper(1,WXH+4), 将焦耳发热值代入出线装置模型中进行温度场计 算,得到各单元温度值TT\_Paper(1,WXH+3),依据 得到的单元电场值和温度值循环修正其电阻率,迭 代格式为:

\*DO, J, 1, ELMAX\_Paper

$$\begin{split} & EE\_Paper\left(J, 2^*(WXH+3)+1\right) = EE\_Paper\left(J, 2^*(WXH+3)-1\right) + \\ & omega^*(EE\_Paper(J, 2^*(WXH+3)) - EE\_Paper(J, 2^*(WXH+3)-1)) \end{split}$$

AA\_Paper (J, WXH+4) =1/(3.20e-17\*exp (0.0969\*TT\_Paper (J, WXH+3)+0.04\*EE\_Paper(J, 2\*(WXH+3)+1)/1e6))

\*ENDDO

上述通过APDL编写的出线装置电场和温度场 模拟方法具有以下特点:

(1)适用于多介质、大场域复杂绝缘结构,同时可应用于二维和三维电场及温度场仿真计算模型;

(2)在直流稳态电场作用下,绝缘介质中存在泄漏电流,可将由此引起的焦耳发热引入温度场进行

计算;

(3)直流稳态电场计算同时考虑了温度和电场 对绝缘介质电阻率的非线性作用。

#### 2.2 同轴绝缘结构模型数值分析

图 2 为具有 2 层介质的同轴绝缘结构模型。其 中,内层为油纸介质,内层介质的内半径  $R_1$ =3 mm、 外半径  $R_2$ =13 mm;外层为环氧浸纸介质,外层介质 内半径等于  $R_2$ 、外半径  $R_3$ =20 mm。常温(20 °C)下, 油纸的相对介电常数  $\varepsilon_1$ =4.4,电阻率 $\rho_1$ =5×10<sup>13</sup>  $\Omega$ ·m, 导热系数  $k_1$ =0.165 W / (m·K);环氧浸纸的相对介 电常数  $\varepsilon_2$ =3.63,电阻率 $\rho_2$ =10<sup>14</sup>  $\Omega$ ·m,导热系数  $k_2$ = 0.12 W / (m·K);油纸和环氧浸纸之间为界面层。



图 2 同轴绝缘结构模型 Fig.2 Coaxial insulation structure model

同轴绝缘结构的中心为金属导杆,在通过电流 I 后由于导体焦耳发热将在同轴绝缘结构中径向产生 温度分布,由前述分析可知,材料属性在同轴绝缘结 构径向将出现分布不均匀的现象,这将改变径向电 场分布。在4种计算条件下进行定量分析:

(1)无梯度温度分布下的直流稳态场;

(2)存在梯度温度分布下的直流稳态场;

(3)无温度梯度分布下的极性反转瞬态场;

(4)存在温度梯度分布下的极性反转瞬态场。

其中极性反转电压 $U_{a}$ 由1000 V反转为-1000 V, 极性反转时间为 $t_{2}$ ,即电压从某极性开始完全转换 为相反极性所需的时间取为10 s,电压保持恒定时 间 $t_{3}$ =20000 s,在 $t_{3}$ 内绝缘介质内部瞬态电场可达到 稳定状态。极性反转电压施加过程如图3所示。



图 3 极性反转电压施加过程

Fig.3 Application procedure of polarity reversal voltage

绝缘介质电阻率同时具有各向异性的非线性特征,但本文重点考虑极性反转电压和温度梯度分布 对瞬态电场的影响规律,因此下文在计算过程中均 做以下设定:每次计算过程中绝缘材料电阻率不随 电场E发生变化;不考虑材料电阻率各向异性问题。 现分直流稳态电场和瞬态极性反转电场2种情况进 行讨论。在温度场计算中设定中心导杆温度为 80℃,同轴绝缘结构所处环境的温度为20℃。计算 条件(1)和(2)下的温度和电场分布如图4所示。





由图4(a)可见,同轴绝缘结构的最高温度点位 于中心导杆处,在径向上逐渐降低至环境温度;由图 4(d)可见,在无温度梯度和存在温度梯度时,复合介 质界面处均出现电场强度阶跃变化,这主要是由不 同介质的界面处的电荷积聚导致的场强畸变引起 的。由图4(d)还可看出,存在温度梯度时同轴绝缘 结构的径向最大场强由中心导杆转移至界面处。最 大场强的"反转效应"主要是由于中心导杆附近温度 较高,导致材料电阻率偏小,电压梯度值较无温度梯 度时偏小,因此温度梯度对同轴绝缘结构的直流稳 态电场分布存在较大影响。以上分析表明材料参数 与温度的非线性关系可显著影响复合绝缘结构在各 种电压型式下的电场分布,对于实际换流变压器出 线装置的复合绝缘结构需在传统等温电场计算的基 础上运用非线性有限元法进行进一步的分析。

## 3 换流变出线装置典型复合绝缘结构电场 分析

#### 3.1 换流变出线装置典型复合绝缘计算模型

对1台±800 kV 换流变压器在交流、直流和极 性反转电压作用下的线性和非线性电场进行分析, 其中换流变压器出线装置复合绝缘结构如附录中的 图 A1(a)所示,换流变压器出线装置计算参数如表2 所示。换流变压器出线装置计算模型中包括绝缘屏 障、套管芯子尾部、均压球及表面油浸纸包覆。由于 套管尾部电容芯子内部极板的电压调制作用,电位 沿环氧芯体外表面电位从高到低基本呈线性分布, 因此套管芯子对出线装置内部电场有较大影响。绝 缘屏障的引入也增加了油隙中界面的存在,因此发 生油-固界面处滑闪放电的概率也将增大,因此需分 析出线装置的电场分布情况。

表2 换流变压器出线装置计算参数

Table2 Calculation parameters of converter transformer lead exit device

参数	参数值	参数	参数值
交流耐压测试 电压 $U_{\rm ac}$ / kV	1 100	直流极性反转 电压 <i>U</i> <sub>pr</sub> /kV	1 1 2 4
直流耐压试验 电压 $U_{ m dc}$ / kV	1 4 5 5	额定运行电流 / A	5515

图 A1(b)为换流变压器出线装置在 ANSYS 软件 界面下的网格划分情况,单元总数为 56117个,其中 变压器油区域单元总数为 50834个,绝缘纸板单元 总数为 5283个。在直型屏障、均压球包覆层、变压 器油中分别选取 1 个有限元单元作为分析对象,其 编号分别为 16435、12956、33 372。将提出的 APDL 迭代计算方法应用于出线装置直流稳态场域分析。

#### 3.2 换流变压器出线装置电场及温度场模拟

下面分2种情况对出线装置直流稳态场进行仿 真分析:

(1)传统计算方法,即将出线装置绝缘介质电阻 率视为不随温度、场强变化的常数;

(2)将出线装置视为温度由中心导体到法兰处 逐渐降低的梯度分布的整体,以对应出线装置在实 际运行中的情况。

传统计算方法下变压器出线装置三维温度场分 布如附录中的图 A2 所示,变压器油中电场和电位分 布分别如附录中的图 A3 和图 A4 所示。

温度分布计算中,同时考虑中心导杆在额定电 流下的发热和绝缘介质焦耳发热,且将中心导杆电 阻率视为与温度无关的常数。图A2表明,换流变压 器出线装置温度最高点位于导杆附近,最高温度约 为80℃,其次为均压球包覆和套管尾部表面,直型 屏障的温度较低且分布均匀。对比图A3和图A4可 见,利用传统计算方法和本文提出的有限元迭代计 算方法得到的变压器油中电场和电位分布具有一定 的差异:采用传统计算方法时,直型屏障和均压球包 覆均出现高场强区域,而在温度梯度分布条件下采 用本文提出的有限元迭代计算方法时,高场强区域 仅出现在均压球包覆端部。这种高场强区域的转移 主要是由温度梯度分布导致绝缘介质电阻率发生改 变引起的,而考虑温度梯度分布条件时得到的电场 分布结果更接近换流变压器出线装置的实际运行的 情况。

222

在直型屏障、均压球包覆层、变压器油中选取1个 有限元单元作为观察对象,分别编号为16435、12956、 33372。分别以每个单元的电场强度、电阻率、温度 值作为算法收敛性评价指标,有限元单元各指标迭 代收敛曲如图5所示。图中,电场强度、电阻率通过 30次迭代的实际值除以30次迭代中的最大值进行 了归一化处理,温度值为实际计算值。





Fig.5 Iterative convergence curve of each index of finite element

由图5可见:在前10次迭代过程中,电场强度出现了振荡现象,而后趋于稳定;电阻率在前5次迭代过程中随迭代次数呈现单调变化特性,而后趋于稳定,温度值在30次迭代中基本保持不变,这表明由绝缘材料电阻率变化引起的绝缘介质焦耳发热变化较小。以上计算结果表明所提基于ANSYS/APDL的迭代计算方法收敛性较好。

#### 3.3 局部电场分布对比

以换流变压器出线装置均压球包覆局部油隙电 场分布为例进行说明,该处包括4层绝缘纸板和3个 油隙,传统计算方法和本文计算方法得到的油隙、绝 缘纸板中电场分布分别如附录中的图A5和图A6所 示。图A5和图A6表明,直流稳态电压作用下,绝缘 纸板中的电场强度高于变压器油中电场强度。在油 隙的观察点处,传统计算方法和迭代计算方法得到的 电场强度分别为1.57 kV/mm和1.20 kV/mm,而2 种方法得到的绝缘纸板电场强度分别为11.5 kV/mm 和14.8 kV/mm,这表明传统计算方法由于未考虑 绝缘介质材料的非线性特性导致局部场强计算结果 与迭代计算方法相比有一定的区别。

沿图A6所示的电场强度截取路径获得电场强 度分布曲线,结果如图6所示。图中,波峰为绝缘纸 板所处位置,波谷为油隙所处位置,波峰和波谷间电 场强度发生剧烈变化,该处位于油隙和纸板交界面 附近,且迭代计算结果略高于传统计算结果。



#### 图6 传统计算方法和迭代计算方法得到的 局部电场分布对比

Fig.6 Comparison of local electric field distribution between traditional and iterative calculation methods

换流器出线装置在实际运行条件下的稳态电场 分布如附录中的图A7所示。由图可见,在实际运行 条件下换流器出线装置的高场强区域位于油中屏障 部位,低场强区域位于均压管附近,出现了温度梯度 引起的场强逆转现象。

#### 4 结论

本文研究了油纸-环氧浸纸复合绝缘体系介电 性能,给出了计及材料温度的非线性瞬态电场计算 流程,并将该算法用于实际换流变压器出线装置油 纸-环氧浸纸典型复合绝缘结构。本文所得结论 如下。

(1)介电谱测试结果表明油纸复合绝缘体系的 介电性能与试样状态(浸油或干燥)和厚度有直接联 系;通过介电谱测量可得到材料介电常数、损耗角正 切值、体积电阻率与温度的非线性变化规律,该试验 结果可为非线性有限元法提供材料参数。

(2)本文提出的非线性有限元计算方法在瞬态 场计算过程中考虑了材料参数与温度的非线性关 系,并给出了非线性有限元法计算流程,通过同轴绝 缘结构模型验证了有限元计算流程的有效性;该方 法适用于大场域、多介质绝缘结构,可计及由泄漏电 流引起的焦耳发热,同时考虑了温度、电场对绝缘介 质电导率的非线性作用。

(3)变压器出线装置温度最高点位于中心导杆 附近,且在直流电压作用下,高场强区域位于绝缘纸 板中,变压器油中场强较低。迭代算法的收敛指标 可选为有限元电场强度、电阻率和温度值,其中电场 强度在前10次迭代过程中出现振荡,电阻率在前5 次迭代过程中出现单调变化,而温度值在整个迭代 过程中基本保持不变,3个指标最终均趋于收敛,验 证了本文提出的迭代算法具有较好的收敛性。在本 文所设置的应用环境下,传统计算方法与迭代计算 方法得到的结果有一定的区别,这主要是由于迭代 计算考虑了温度、电场对绝缘介质电阻率的非线性 作用,更加符合换流变压器出线装置的实际运行环 境,因此本文所提的稳态电热场迭代模拟可作为变 压器出线装置绝缘结构设计和性能校核中的辅助计 算方法。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] LIU Gang, LI Lin, JI Feng, et al. Analysis of transient electric field and charge density of converter transformer under polarity reversal voltage[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012,48(2):275-278.
- [2] 钟俊涛.成型绝缘件在高压变压器中的应用[J].高电压技术,2010,36(4):939-945.
   ZHONG Juntao. Application of molding insulation components to HV transformers[J]. High Voltage Engineering,2010,36(4):
- 939-945.
  [3] 宓传龙,谢庆峰,孟丽坤,等.超、特高压交流变压器出线绝缘 结构的设计和应用[J].高电压技术,2010,36(1):122-128.
  MI Chuanlong,XIE Qingfeng,MENG Likun, et al. Design and application of exits insulation structure for EHV and UHV AC transformers[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 122-128.
- [4] 刘刚,李琳,李文平,等. 换流变压器极性反转非线性电场分析
   [J]. 高电压技术,2012,38(2):451-456.
   LIU Gang, LI Lin, LI Wenping, et al. Analysis of nonlinear electric field of converter transformer under polarity reversal voltage[J]. High Voltage Engineering,2012,38(2):451-456.
- [5] REN Shuangzan, LIU Qiang, ZHONG Lisheng, et al. Electrostatic charging tendency and correlation analysis of mineral insulation oils under thermal aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(2):499-505.
- [6] 吴书煜,马宏忠,魏旭,等. 高压电抗器匝间短路三维模型计算 与分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):148-154.
  WU Shuyu, MA Hongzhong, WEI Xu, et al. Calculation and analysis of three-dimensional model for turn-to-turn short circuit of high voltage reactor[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(4):148-154.
- [7]郑劲,文闿成.换流变压器阀侧套管出线装置绝缘分析[J]. 高电压技术,2010,36(5):1184-1190.
   ZHENG Jin, WEN Kaicheng. Development of insulating technology of valve-side outlet device in converter transformers
   [J]. High Voltage Engineering,2010,36(5):1184-1190.
- [8] 李琳,纪锋,李文平,等. 换流变压器极性反转试验的数值模拟
  [J]. 中国电机工程学报,2011,31(18):107-112.
  LI Lin,JI Feng,LI Wenping, et al. Numerical simulation of converter transformer's polarity reversal test[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(18):107-112.
- [9] 王永红,魏新劳,陈庆国. 换流变压器油纸绝缘复合电场击穿 特性及其试验方法[J]. 高电压技术,2011,37(9);2205-2210.
   WANG Yonghong,WEI Xinlao,CHEN Qingguo. Breakdown characteristics of oil-pressboard insulation in converter transformer under composite electric field and its test method[J].
   High Voltage Engineering,2011,37(9);2205-2210.
- [10] 刘刚,李琳,纪锋,等. 基于节点电荷电位有限元法的油纸绝缘 结构极性反转电场分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25): 132-138.

LIU Gang, LI Lin, JI Feng, et al. Analysis of polarity reversal

electric field of oil-paper insulation based on charge-scalar potential finite element method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(25):132-138.

- [11] 刘东升,张海蛟,赵丽杰,等. 交流750 kV变压器出线装置国产化核心技术[J]. 电工技术学报,2011,26(2):88-93.
  LIU Dongsheng, ZHANG Haijiao, ZHAO Lijie, et al. Home-made core technology of 750 kV transformer outlet device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 88-93.
- [12] 王德文,雷倩.基于贝叶斯正则化深度信念网络的电力变压器 故障诊断方法[J].电力自动化设备,2018,38(5):129-135.
   WANG Dewen, LEI Qian. Fault diagnosis of power transformer based on BR-DBN[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):129-135.
- [13] 张燕秉,郑劲,汪德华,等. 特高压直流换流变压器的研制[J]. 高电压技术,2010,36(1):255-264.
   ZHANG Yanbing,ZHENG Jin, WANG Dehua, et al. Development of UHVDC converter transformer[J]. High Voltage Engineering,2010,36(1):255-264.
- [14] 魏本刚,吴楠楠,任晓明,等. 基于有限体积法的分体式冷却变 压器热学三维仿真技术[J]. 电力自动化设备,2018,38(2): 177-181.

WEI Bengang, WU Nannan, REN Xiaoming, et al. Three dimensional simulation technology of separated cooling type transformer based on finite volume method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):177-181.

- [15] 李琳,纪锋,刘刚. 油-纸绝缘结构瞬态电场计算的状态空间有限元法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(36):111-116.
  LI Lin, JI Feng, LIU Gang. A state-space finite element method for the calculation of transient electrical field in oilpaper insulation construction [J]. Proceedings of the CSEE, 2010,30(36):111-116.
- [16] 周利军,张讥培,王朋成,等.环境因素影响下GIL温升特性的 仿真计算分析[J].电力自动化设备,2019,39(1):211-218. ZHOU Lijun,ZHANG Jipei,WANG Pengcheng, et al. Simulation and analysis of GIL temperature rise characteristics under effects of environmental factors[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):211-218.
- [17] 李晓辉,李岩,李冬雪,等. 换流变压器阀侧绕组非线性各向异性直流电场分析[J]. 高压电器,2012,48(4):18-22.
  LI Xiaohui,LI Yan,LI Dongxue, et al. Analysis on nonlinear and anisotropic electric field about valve-side winding of converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 18-22.
- [18] 潘艳,李金元,李尧圣,等.柔直换流阀用压接式IGBT器件物 理场建模及内部压强分析[J].电力自动化设备,2019,39(1): 40-45.

PAN Yan, LI Jinyuan, LI Yaosheng, et al. Physical field modeling and internal pressure analysis of press-pack IGBT device based VSC-HVDC converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):40-45.

#### 作者简介:



张施令(1986—),男,重庆人,高级工 程师,博士,通信作者,研究方向为超/特 高压绝缘结构的优化设计、SF<sub>6</sub>气体绝缘 设备运行状态检测和寿命评估(E-mail: 526793305@qq.com)。

# Application of nonlinear finite element method in electric field calculation of composite insulation structure of transformer outlet

#### ZHANG Shiling

(Chongqing Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China) Abstract: The polarity reversal is a special state of composite insulation in converter transformer's outlet system, which can lead to electric field distortion within insulating dielectric and at the interface of insulating dielectric due to space charge effect. On the other hand, the electrical property parameters of insulating dielectric are function of temperature, thus, the changes of electrical parameters caused by temperature gradient will affect transient electric field distribution of insulation structure in process of polarity reversal. On this basis, to accurately simulate the polarity reversal transient electric field of composite insulation structure with temperature gradient, it is proposed to apply the nonlinear finite element method in the coupled analysis of the above two affecting factors of transient electric field. Firstly, the relationship between electrical parameters of composite insulation dielectric of oil-immersed paper and temperature is investigated. Then, the flowchart of transient electric field calculation based on the nonlinear finite element method is introduced in detail and verified by the double coaxial composite insulation structure model. Finally, a 2D simulation model of oil impregnated paper insulating dielectric of actual converter transformer's outlet system is established to simulate and analyze the transient electric field during polarity reversal considering the nonlinear characteristics of materials, which shows that the results of traditional simulation are quite different from those considering material non-linearity, and a local high electric field strength area easily appears during polarity reversal process.

Key words: converter transformer; polarity reversal; converter transformer's outlet system; composite insulation; nonlinear finite element method; transient electric field

(上接第209页 continued from page 209)

### Protection method based on fractal theory and cluster analysis for grounding fault with high resistance of low resistance grounding system

CAO Wensi<sup>1</sup>, WU Qing<sup>1</sup>, XU Mingming<sup>2</sup>, NIU Rongze<sup>2</sup>

School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;
 State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Because the setting value of the protection in low resistance grounding system is too large, the protection in low resistance grounding system easily refuses to operate when a high-impedance grounding fault occurs. Aiming at this problem, a novel protection method based on fractal theory and cluster analysis for grounding fault with high resistance of low resistance grounding system is proposed. The similarity characteristics of zero-sequence current between fault line and normal lines are extracted. The characteristic matrix of grounding fault is constructed by the similarity of zero-sequence currents that quantified by ratio of zero-sequence currents and fractal dimension, and analyzed by *K*-means clustering algorithm. The proposed method avoids the difficulty of protection setting. The true-mode experimental recording data verify that the high resistance capacity of protection is improved to 2 000  $\Omega$  by the proposed method, which has certain application value.

Key words: low resistance grounding system; high resistance grounding; fractal theory; similarity; cluster analysis; relay protection





图 A2 变压器出线装置温度分布 Fig.A2 Temperature distribution of transformer outlet device



(a)电位分布
 (b)电场分布
 图 A3 传统计算方法下变压器油中电位、电场分布
 Fig.A3 Voltage and electric field distribution of transformer oil with traditional method



(a)电位分布
 (b)电场分布
 图 A4 温度梯度分布条件下变压器油中电位、电场分布
 Fig.A4 Voltage and electric field distribution of transformer oil under iso-thermal condition

附录



图 A5 传统计算和本文计算方法得到的油隙中电场对比 Fig.A5 Comparison of electric field distribution of transformer oil between traditional and proposed calculation methods



图 A6 传统计算和本文计算方法得到的绝缘纸板中电场对比 Fig. A6 Voltage and E-field distribution of transformer oil under iso-thermal condition



图 A7 出线装置在实际运行条件下稳态电场分布 Fig.A7 Steady electric field distribution of outlet device under actual operation condition