

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

刘刚¹, 李琳¹, 纪锋¹, 李文平², 李博³, 孙优良², 李金忠³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206; 2. 保定天威保变电气股份有限公司, 河北省 保定市 071056; 3. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Analysis of Polarity Reversal Electric Field of Oil-paper Insulation Based on Charge-scalar Potential Finite Element Method

LIU Gang¹, LI Lin¹, JI Feng¹, LI Wenping², LI Bo³, SUN Youliang², LI Jinzhong³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. BaodingTianwei Baobian Electric Co., Ltd., Baoding 071056, Hebei Province, China; 3. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The polarity reversal (PR) electric field of oil-paper insulation structure was computed by the charge-electric potential finite element method, in which the node charges and electric potentials can be directly obtained. The node charges at every instant could be converted to node charge densities by a numerical method proposed. The normal electric field intensity can be accurately got from the electric charge density of the Dirichlet boundary, which may be helpful to the insulation design. The proposed method was verified by a simple model, which has analytical solutions, and used to analyze the PR process of a typical oil-paper insulation structure of converter transformer.

KEY WORDS: finite element; boundary charge density; normal electric field intensity; oil-paper insulation; converter transformer; polarity reversal

摘要: 基于电荷-电位有限元法分析换流变压器的油纸绝缘结构极性反转电场, 该方法可以直接得到节点电位和节点电荷。对各个时刻节点电荷进行处理, 提出得到电荷密度的方法。通过提取一类边界上的节点面电荷密度, 可以准确地计算出第一类边界上的法向电场强度, 从而可以更好地指导绝缘强度设计。通过一个有解析解的双层有损同轴绝缘结构模型, 验证了方法的有效性。最后, 分析了一个换流变压器阀侧绕组典型绝缘结构的极性反转电场变化过程。

关键词: 有限元; 边电荷密度; 法向电场强度; 油纸绝缘; 换流变压器; 极性反转

0 引言

换流变压器作为直流输电系统的重要设备, 其安全运行直接关系到系统的稳定^[1]。由于换流变压器的阀侧绕组在正常运行时会承受直流电压分量, 在绝缘油和纸板表面将积累空间电荷^[2]。当发生潮流反转时, 电压极性会在极短的时间(2 min)内由一种极性变为另一种极性。但由于空间电荷的消散时间比较长, 电荷在极性反转完成前后可视为不变, 此时由电荷产生的场强会与外施电压产生的场强相叠加, 在阀侧绕组端部出现局部高场强, 从而可能导致局部放电甚至击穿。试验及实际运行表明, 换流变压器绝缘故障大多数发生在极性反转过程中^[3], 因此, 必须对换流变压器极性反转过程中的电场及电荷变化规律进行分析。

近年来, 国内外期刊上出现了大量分析换流变压器绝缘结构极性反转电场的文献。如文献[4]用直流电场减去两倍容性电场得到极性反转时的电场, 文献[5-6]分别用梯形公式和状态空间法分析了线性各向同性媒质下的极性反转电场, 文献[7]用商业软件计算了非线性各向同性极性反转电场。但是这些研究都集中于电场强度计算, 并且大都只是以空间电荷的存在解释极性反转瞬间的电场突变, 在极

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977030); 国家电网公司科技项目(SGKJJSKF[2009])。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50977030); Science and Technology Program of SGCC (SGKJJSKF[2009]).

性反转结果分析中只给出电位及电场强度的分布情况^[5-6], 而对于电荷变化规律则很少分析。

文献[8]以节点电荷-电位为变量研究了电准静态场的瞬态过程, 并给出了电位、电荷在瞬态过程中的变化规律。在换流变压器极性反转的分析、测试中, 空间电荷对电场分布和介质绝缘的影响是人们关注的焦点问题之一。但具体分析中需要关心的是电荷密度^[9-10], 而不是节点电荷。

本文将文献[8]的方法应用于换流变压器的极性反转电场分析, 根据计算的节点电荷准确求得边界节点电荷密度。同时根据第一类边界上的节点电荷密度, 计算出节点法向电场强度, 计算结果精度较高。为简化分析, 本文计算时所分析的模型均假设为线性各向同性媒质。

1 基于电荷-电位的有限元状态方程

在电准静态场条件下, 利用 $\mathbf{E}=-\nabla\phi$ 、电荷守恒定律和高斯定理^[11]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1)$$

$$\rho - \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (2)$$

及不同媒质分界面上的衔接条件

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + (\gamma_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} - \gamma_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n}) = 0 \quad (3)$$

$$\rho_s - (\varepsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} - \varepsilon_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n}) = 0 \quad (4)$$

并应用 Galerkin 加权余量法于式(1)、(2), 考虑到交界面场量的衔接条件^[12], 可得

$$\int_{\Omega} N_i \frac{\partial \rho_h}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma_{int}} N_i \frac{\partial \rho_{s,h}}{\partial t} d\Gamma + \int_{\Omega} \nabla N_i \gamma \nabla \phi_h d\Omega = 0 \quad (5)$$

$$\int_{\Omega} N_i \rho_h d\Omega + \int_{\Gamma_{int}} N_i \rho_{s,h} d\Gamma - \int_{\Omega} \nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla \phi_h d\Omega = 0 \quad (6)$$

上述积分中包含体积分与面积分。文献[8]对式(5)、(6)进行了简化, 将前 2 项用节点电荷来表示:

$$\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial t} \mathbf{Q} + \mathbf{K}_\gamma \Phi = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{I} \mathbf{Q} - \mathbf{K}_\varepsilon \Phi = 0 \quad (8)$$

式中: \mathbf{K}_γ 、 \mathbf{K}_ε 分别为对应于媒质介电常数 ε 与电导率 γ 的有限元刚度阵; \mathbf{I} 为与 \mathbf{K}_γ 同阶数的单位对角矩阵; \mathbf{Q} 、 Φ 分别为节点电荷向量和节点电位向量。

将上式组合成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{K}_\gamma \\ \mathbf{I} & -\mathbf{K}_\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \Phi \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (9)$$

或

$$\mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{B} \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{u}=[\mathbf{Q}, \Phi]^T$ 。一般情况下只知道电位的初值 Φ_0 , 而无电荷分布信息, 但在初始电位 Φ_0 条件下, 可以用式(8)计算出节点电荷初值 \mathbf{Q}_0 , 从而得出初值 \mathbf{u}_0 。

式(10)的求解方法很多, 如后向欧拉法^[13]、C-N 法^[14]、状态空间法^[15]、SDIRK 法^[8]等。为简化分析, 本文采用工程中常用的定步长 C-N 法, 其计算格式为

$$(2\mathbf{A} + \Delta t \cdot \mathbf{B}) \mathbf{u}_{n+1} = (2\mathbf{A} - \Delta t \cdot \mathbf{B}) \mathbf{u}_n \quad (11)$$

这种方法属于单步算法, 在时间上具有 2 阶精度。值得注意的是, 在每一时步施加边界条件时, 节点电位往往已知, 只需按照传统方法直接施加即可。而第一类边界上的节点电荷则需先按照式(8)计算, 然后将计算值作为各时步的边值条件施加到方程中去。

2 边界节点电荷密度计算

采用第 1 节的方法可以直接得到各时刻的节点电荷及节点电位, 但在换流变压器极性反转电场分析中, 往往由测量电压计算得到电荷密度, 而非节点电荷, 因此需要将计算得到的节点电荷转化为节点电荷密度, 便于与试验结果比较。文献[8]指出从节点电荷中计算出面电荷密度和体电荷密度, 需要进行类似于从节点力中区分表面力和体应力的计算, 但没有给出实施细节。本文根据电荷分布的规律, 提出一种可以准确计算表面电荷密度的方法, 同时可以近似计算体电荷密度。在换流变压器极性反转场分析中, 人们往往更关心油纸界面的电荷变化情况, 因而本文提出的方法对于定量分析节点电荷(密度)变化规律及其对极性反转电场的影响有意义。此方法利用有限元后处理的边界信息, 只需增加稍许的工作就能实现。为简化分析, 以二维平面场为例进行分析。

用式(11)求得各个时刻的节点电荷向量 \mathbf{Q} 后, 根据式(6)及(8)可得

$$\int_{\Omega} N_i \rho_h d\Omega + \int_{\Gamma_{int}} N_i \rho_{s,h} d\Gamma = Q \quad (12)$$

或

$$\mathbf{P} \cdot \boldsymbol{\rho} = \mathbf{Q} \quad (13)$$

式中矩阵 \mathbf{P} 对应面电荷密度、线电荷密度的元素，计算公式^[16]为

$$P_{ij\rho}^e = \int_{\Omega^e} N_i^e N_j^e d\Omega = \frac{(1 + \delta_{ij})}{12} \Delta^e \quad (14)$$

$$P_{ijs}^e = \int_{\Gamma^e} N_i^e N_j^e \Gamma = \frac{(1 + \delta_{ij})}{6} l^e \quad (15)$$

式中 Δ^e 、 l^e 分别为单元的面积及线段的长度。 \mathbf{P} 的元素与材料属性无关，因此在分析边界节点在各个时刻的电荷密度时， \mathbf{P} 一旦生成就可以反复调用。

由于边界上只有表面电荷，相应的节点电荷密度仅为面电荷密度，体电荷密度为零。 \mathbf{P} 计算的步骤如下：1) 假设所有节点均为内部节点，按式(14)计算体电荷密度系数 P_{ij} ；2) 对面节点所在行、列元素直接置零；3) 按式(15)计算第一类边界及非齐次第 2 类边界节点对应的系数 P_{ijs} ，添入矩阵 \mathbf{P} 中。

按上述步骤生成 \mathbf{P} 后，求解方程组(13)就可以得到包含体电荷密度及面电荷密度的电荷密度向量 $\boldsymbol{\rho}$ 。

由于在线性分析中电荷往往只集中于介质表面，无体电荷，因此采用上述方法得到的体电荷密度为零。如果只是关心表面电荷密度，则可以将算法进行改进，只计算面上节点对应的刚度元素 P_{ijs} 求解面电荷密度，此时可以减少计算量和降低内存需求。但是在分析非线性问题时，由于介质(如电阻率或介电常数)的非线性，会在介质内部产生电荷，因此有必要考察介质内部的电荷密度变化情况。用本文方法可以同时求出面电荷密度和体电荷密度。将面节点的体电荷密度直接置零，对面节点电荷附近的体节点电荷密度精度可能有所影响，但不与面节点相关的内部体电荷密度的计算精度是不受影响的，并且可以通过加密边界附近区域剖分的方式来减小影响，因此本文方法可以用来分析介质区域的电荷变化情况。

上述分析过程虽然是在二维平面场下进行的，但可以推广到轴对称场及三维场的体电荷密度和面电荷密度计算。

3 利用第一类边界节点电荷密度计算节点法向电场强度

由于导体边界上的场强分布直接影响换流变压器绝缘结构的耐压特性，因此在绝缘设计中需要关心导体表面的场强分布情况。对于静电场的边界法向电场强度计算，文献[17-18]分别给出了利用通量函数法及边界电场约束方程计算边界法向电场强度及第一类边界上法向电场强度的方法，计算精度较高。

针对电准静态场，本文利用面电荷密直接计算导体边界上的法向电场强度。该方法首先由式(11)计算出各时刻的节点电荷向量 \mathbf{Q} ，然后由式(13)计算出节点电荷密度向量 $\boldsymbol{\rho}$ ，最后从各个时刻的电荷密度向量 $\boldsymbol{\rho}$ 中提取导体边界上的节点电荷密度值，按式(16)就能很容易地计算出导体表面节点的法向电场强度值。

$$E_{in} = \rho_{is} / \varepsilon \quad (16)$$

式中： ρ_{is} 为节点电荷面密度； ε 为导体边界节点法向侧的媒质介电常数。

4 算法验证

图 1 为具有 2 层媒质的同轴绝缘结构模型，内导体半径 $R_1=1\text{m}$ ，外导体半径 $R_3=7\text{m}$ ，媒质分界面半径 $R_2=3\text{m}$ 。媒质 1 的相对介电常数 $\varepsilon_1=2$ ，电导率 $\gamma_1=10^{-15}\text{ s/m}$ ；媒质 2 的相对介电常数 $\varepsilon_2=1$ ，电导率 $\gamma_2=10^{-13}\text{ s/m}$ 。

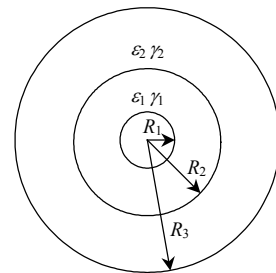


图 1 双层有损同轴绝缘结构模型

Fig. 1 Dual layer dielectrics of coaxial insulation model

假设内导体上的电压为 U_{s1} ，外导体上的电压为 U_{s2} ，电压可以表示为

$$\varphi = \begin{cases} a + c \ln r, & R_1 \leq r \leq R_2 \\ b + d \ln r, & R_2 \leq r \leq R_3 \end{cases} \quad (17)$$

式中：

$$a = S \left[\frac{1}{\gamma_1} (U_{s1} \ln R_2 - U_{s2} \ln R_1) + \frac{1}{\gamma_2} U_{s1} \ln \frac{R_3}{R_2} \right]$$

$$b = S \left[\frac{1}{\gamma_1} U_{s2} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\gamma_2} (U_{s1} \ln R_3 - U_{s2} \ln R_2) \right]$$

$$c = \frac{S}{\gamma_1} (U_{s2} - U_{s1})$$

$$d = \frac{S}{\gamma_2} (U_{s2} - U_{s1})$$

式中 $S = 1 / \left(\frac{1}{\gamma_1} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\gamma_2} \ln \frac{R_3}{R_2} \right)$ 。

对电位解析式求导，可以计算出区域内任意点的电场强度：

$$E = \begin{cases} \frac{c}{r} e_r, & R_1 \leq r \leq R_2 \\ \frac{d}{r} e_r, & R_2 \leq r \leq R_3 \end{cases} \quad (18)$$

利用下式计算媒质分界面上的电荷密度：

$$\sigma_s = \frac{1}{R_2} (\epsilon_2 d - \epsilon_1 c) \quad (19)$$

假设 $U_{s1}=1\ 000\ \text{V}$ ， $U_{s2}=0$ 。由于图 1 模型具有对称性，用有限元分析 1/4 模型区域。为了研究剖分对计算结果的影响，分别进行粗剖和细剖，剖分结果如下：粗剖为 340 个三角形单元，196 个节点；细剖为 8554 个三角形单元，4401 个节点。

在直流场有限元计算中，三角形单元采用线性插值法。计算出节点电位后，可以根据式(8)算出节点电荷，然后根据式(16)和式(13)分别算出内、外导体表面上的法向电场强度及媒质分界面上的电荷密度。计算出上述数值解的相对误差，并将相对误差的最大值 r_{\max} 、最小值 r_{\min} 列于表 1 方法 I 所在列。表 1 同时给出节点电场强度用单元电场强度数值平均方法计算得到的 r_{\max} 及 r_{\min} ，即方法 II 所在列。

从表 1 可以看出，即使粗剖模型，本文方法得到的法向电场强度最大相对误差仍小于 5%，而方

表 1 解析法与数值法计算结果

Tab. 1 Comparison between analytical solution and numerical solution

相对误差		内导体上		外导体上		分界面上	
		法向电场强度		法向电场强度		面电荷密度	
		方法 I	方法 II	方法 I	方法 II	方法 I	方法 II
粗剖	r_{\max}	4.10	-16.91	0.747	4.50	-1.149	10.169
	r_{\min}	-0.355	-17.98	-0.145	3.9	0.707	8.67
细剖	r_{\max}	0.804	-4.0	1.435	0.729	0.240	1.717
	r_{\min}	-0.858	-4.87	-0.0863	0.605	-0.305	1.431

法 II 得到的最大相对误差高达 17.98%。在剖分加密后，方法 II 的计算结果有所改善，但是计算精度只和本文方法在粗剖时的计算精度相当。同时可以看出，传统方法在细剖时得到的电荷密度精度甚至比本文方法粗剖时的计算精度还低。可见，在直流场条件下，本文方法在粗剖时就能获得比方法 II 更精确的解，这对于定量研究反转过程中电极表面电场强度及油纸界面电荷的变化规律具有重要意义。

5 换流变压器典型模型极性反转过程分析

图 2 为换流变压器油纸绝缘系统典型结构，为了清晰的显示模型及计算结果，图形在纵向尺寸上有拉伸。假定油、纸的相对介电常数分别为 2.2、4.4，油的电阻率为 $10^{13}\ \Omega\cdot\text{m}$ ，纸的电阻率为 $10^{15}\ \Omega\cdot\text{m}$ ，令下边界接地，上边界电位为 U_d ，在极性反转试验中 U_d 的波形如图 3 所示，整个反转试验过程包括两次反转，各反转时刻及每次反转持续时间见图 3。

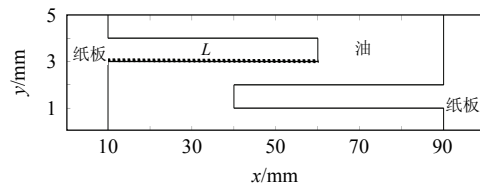


图 2 油纸绝缘系统典型模型

Fig. 2 Typical structure of oil-paper insulation

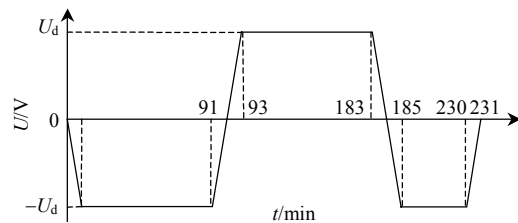


图 3 极性反转试验电压

Fig. 3 Polarity Reversal test voltage

采用本文计算方法计算上述极性反转过程，计算时 U_d 幅值为 1000 V，C-N 法的步长取为 10s。

图 4—7 是 2 次反转前后的等位线分布图，电压单位均为 V。由于各图坐标同图 2 一致，因此不再标出尺寸。

从图 5—7 可以看出，反转后的等位线分布明显不同于反转前，而图中的闭合等位线说明了在这些区域确实存在自由电荷。为了考察电荷的变化情况，选取一条线段 L(图 2 所示)，在图 8 给出了 91 min

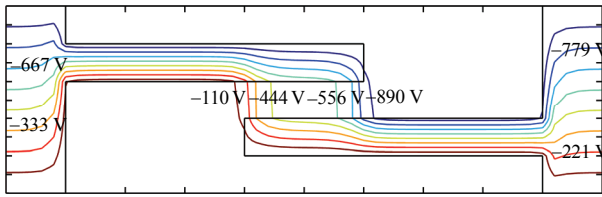


图4 91 min 时刻等位线分布图

Fig. 4 Equipotential lines distribution at 91 min

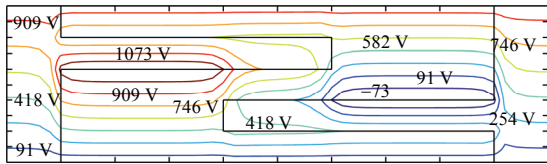


图5 93 min 时刻等位线分布图

Fig. 5 Equipotential lines distribution at 93 min

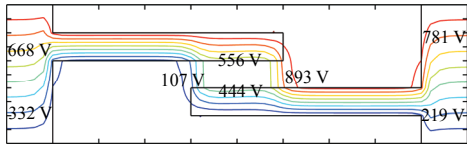


图6 183 min 时刻等位线分布图

Fig. 6 Equipotential lines distribution at 183 min

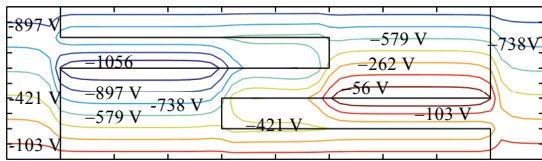


图7 185 min 时刻等位线分布图

Fig. 7 Equipotential lines distribution at 185 min

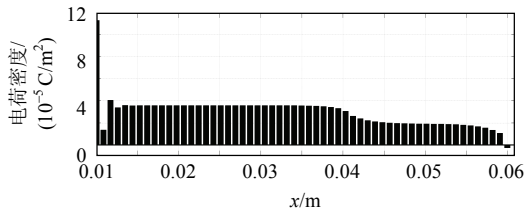


图8 91 min L 上的节点电荷密度分布

Fig. 8 Charge distributions on the specified lines

时刻线 L 上各节点电荷密度分布。将反转完成时刻 93 min 的电荷密度值减去反转前 91 min 时的数值绘于图 9 中。

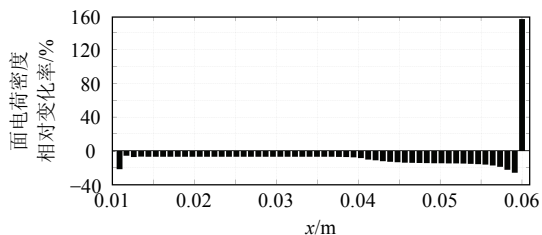


图9 第1次反转完成时 L 上的节点电荷密度变化情况

Fig. 9 Charge distributions variation at the end of the first PR on the specified lines

对比图 8、9 可以看出，原来电荷密度较小的节点电荷密度变化较快，而原来电荷密度分布较大的地方，电荷密度变化量较小。图 9 中的相对值有正有负，表明节点上的电荷极性在反转前后发生改变。为了表征电荷密度随时间的变化情况，在计算区域中提取上边界一节点及油纸交界面上一点的电荷密度值，绘于图 10 中。

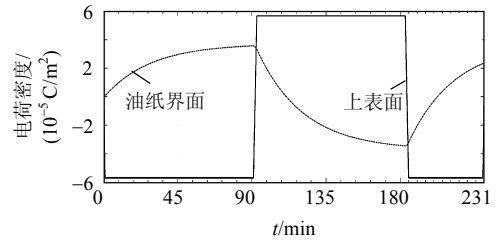


图10 电荷密度变化曲线

Fig. 10 Boundary node charge density curves

对照图 3 中极性反转电压及图 10，可以看出上边节点的电荷密度与外施电压变化一致。这是由于，当上表面施加电压时，外施电压会强制节点电荷变化，从而节点电荷密度也被强制变化，而内部节点由于不与外加电极接触，故电荷不能突变，保持连续性。通过图 10 还可以看出，油纸界面的电荷在 91 和 183 min 时刻尚未达到稳态，从而从侧面说明了 2 次极性反转前的电场分布并不完全等同于直流电场。因此，为了使电荷分布在反转前达到稳态，需要将文献[19]建议的每次反转前直流电压持续 90 min 适当延长，如 120 min 或更长，以使电荷真正到达平衡状态。

可以用上、下电极表面的电荷密度除以油或纸的介电常数得到电极表面的法向电场强度，但由于法向电场强度同电极表面的电荷密度只相差一个系数(油或纸的介电常数)，本文不再分析上、下电极表面节点法向电场强度的变化规律。

6 总结

- 1) 针对油-纸绝缘结构中瞬态电场特性，得到以节点电荷电位为变量的状态方程。
- 2) 获得了极性反转过程中的电荷密度，可以定量研究极性反转过程中的电荷变化规律。
- 3) 第一类边界法向电场强度的计算精度要优于通过节点电位微分得到的结果，可以更好地指导绝缘设计。

参考文献

[1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力

- 出版社, 2004: 318-325.
- Zhao Wanjun . HVDC Engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 318-325(in Chinese).
- [2] 吕晓德, 陈敦利. 极性反转时换流变压器绝缘电场特性研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 67-72.
- Lü Xiaode, Chun Dunli. The study on electric field characteristic of converter transformer under polarity reversal[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 67-72(in Chinese).
- [3] 宓传龙. 超高压换流变压器和平波电抗器绝缘结构简述[J]. 高压电器, 2003, 39(1): 7-15.
- Mi Chuanlong. Summarization on the insulation structure of EHV converter transformer and smoothing reactor [J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(1): 7-15(in Chinese)
- [4] 吕晓德, 陈世坤, 方志强, 等. 换流变压器端部极性反转电场的数值算法及其绝缘设计[J]. 西安交通大学学报, 1997, 31(11): 8-12.
- Lü Xiaode, Chen Shikun, Fang Zhiqiang, et al. Numerical computation of polarity reversal electric field in the converter transformer ending and its insulation design [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 31(11): 8-12(in Chinese).
- [5] Wen K C, Zhou Y B, Fu J, et al. A calculation method and some features of transient field under polarity reversal voltage in HVDC insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(1): 223-230.
- [6] 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 calculation of transient electrical field in oil-paper insulation construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(36): 111-116(in Chinese).
- [7] 李季, 罗隆福, 许加柱, 等. 高压直流换流变压器阀侧非线性电场的求解[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 130-132, 148.
- Li Ji, Luo Longfu, Xu Jiazhu, et al. Solution to nonlinear electric field of HVDC at ends of valve-side winding in converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 130-132, 148(in Chinese).
- [8] Badics Z. Charge density-scalar potential formulation for adaptive time-integration of nonlinear electroquasistatic problems[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2011, 47(5): 1138-1141.
- [9] Mizutani T. Space charge measurement techniques and space charge in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 5(1): 923-933.
- [10] 王云杉, 周远翔, 李光范, 等. 油纸绝缘介质的空间电荷积聚与消散特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 873-877.
- Wang Yunshan, Zhou Yuanxiang, Li Guangfan, et al. Space charge phenomena in oil-paper insulation materials under high voltage direct current[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 873-877(in Chinese).
- [11] 豪斯 H A, 梅尔彻 J R. 电磁场与电磁能[M]. 江家麟, 周佩白, 钱秀英, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 1992: 9-26.
- Haus H A, Melcher J R. Electromagnetic fields and energy[M]. Translated by Jiang Jialin, Zhou Peibai, Qian Xiuying, et al. Beijing: High Education Press, 1992: 9-26(in Chinese).
- [12] 程志光, 高桥则雄, 博扎德, 等. 电气工程电磁热场模拟与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 32-35.
- Cheng Zhiguang, Takahashi N, Forghani B, et al. Electromagnetic and thermal field modeling and application in electrical engineering[M]. Beijing: Scientific Press, 2009: 32-35(in Chinese).
- [13] 张艳丽, 刘洋, 谢德馨, 等. 耦合改进矢量磁滞模型的变压器磁场分析及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 108-113.
- Zhang Yanli, Liu Yang, Xie Dexin, et al. Finite element analysis of magnetic field in transformer core coupled with improved vector hysteresis model and its experimental verification[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(21): 108-113(in Chinese).
- [14] 李泓志, 崔翔, 卢铁兵, 等. 变压器直流偏磁的电路-磁路模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 119-125.
- Li Hongzhi, Cui Xiang, Lu Tiebing, et al. Electric circuit and magnetic circuit combined model of DC biased power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 119-125(in Chinese).
- [15] 谢德馨, 杨仕友. 工程电磁场数值分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 104-108.
- Xie Dexin, Yang Shiyu. Numerical analysis and synthesis of engineering electromagnetic field [M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 104-108(in Chinese).
- [16] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 王建国, 译. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998: 57-60.

Jin Jianmin. The finite element method in electro magnetism[M]. Translated by Wang Jiangguo. Xi'an: Xidian University Press, 1998: 57-60(in Chinese).

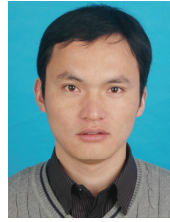
- [17] 雷良钦. 求平面电场边界的法向场强的一种新算法[J]. 中国电机工程学报, 1987, 7(5): 65-72.

Lei Liangqin. The calculation of normal intensities on the boundaries in the plane electrostatic fields with flux function[J]. Proceedings of the CSEE, 1987, 7(5): 65-72(in Chinese).

- [18] 崔翔. 应用边界电场约束方程计算第一类边界上的场强分布[J]. 中国电机工程学报, 1987, 7(1): 53-60.

Cui Xiang. Computation of electric field intensity on the Dirichlet's boundary surface by the finite element method with constrained electric field equation on the boundary [J]. Proceedings of the CSEE, 1987, 7(1): 53-60(in Chinese).

- [19] Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE standard for general requirements and test code for oil-immersed HVDC converter transformers [S]. New York: Institute of the Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 2008.



刘刚

收稿日期: 2011-01-17。

作者简介:

刘刚(1985), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电磁场理论及其应用, liugang_em@163.com;

李琳(1962), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场理论及其应用和电力系统电磁兼容, lilin@ncepu.edu.cn;

纪锋(1982), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁场理论及其应用, jameskeating@163.com;

李文平(1962), 男, 高级工程师, 从事变压器及换流变压器的设计制造研究工作;

李博(1971), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事超特高压输变电设备运行安全及诊断技术研究, libo@epri.sgcc.com.cn;

孙优良(1974), 男, 高级工程师, 从事变压器及换流变压器设计制造研究工作, youliang.s@163.com;

李金忠(1974), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事输变电设备的运行管理及试验研究工作, lijz@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 张玉荣)