

10 kV 浇注支柱式电流互感器电场有限元分析及结构优化设计^①

伍小冬¹, 顾雯雯¹, 彭姝迪², 吴高林²,
王 谦², 李小平², 黄会贤³, 周 渠¹

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400716; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;
3. 国网重庆市电力公司, 重庆 400015

摘要: 浇注支柱式电流互感器是电力系统中用于测量、控制和保护的重要设备。以 LZZBJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器为例, 通过 ANSOFT Maxwell 软件对互感器内部进行三维电场仿真分析。研究表明, 互感器内部电场集中分布区域在一次绕组的 4 个端角和二次绕组的左右两端, 对一、二次绕组电场进行局部二维分析, 得到绕组电场强度最大值和最小值的分布点的位置, 提出通过改变绝缘挡板的厚度避免主绝缘材料因电场分布不均匀而发生局部放电的有效措施, 并运用 ANSOFT Maxwell 软件进行电场分析得到验证。研究结果为 10 kV 浇注支柱式电流互感器的结构优化设计和安全运行提供了依据。

关键词: 电流互感器; 电场; 局部放电; 有限元分析

中图分类号: TM452

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)08-0134-07

LZZBJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器具有耐潮湿、耐污秽、质量轻等优点, 是电力系统中广泛采用的电流传感及变送设备。浇注支柱式电流互感器在工作过程中所发生的主要突发性故障为局部放电, 局部放电将改变互感器内部电场的分布, 破坏绝缘分子结构, 造成绝缘劣化甚至击穿^[1]。通过对互感器内部电场大小及位置分布的研究可以为互感器内部结构优化设计提供理论依据, 从而有效避免局部放电的发生^[2-3], 因此对互感器内部的电场分析显得尤其重要。

近年来, 针对 SF₆ 电流互感器的电场分析研究较多^[4], 而鲜有对浇注支柱式电流互感器电场分析的研究报道。传统的电磁系统数据分析, 一般采用数学公式计算, 需要工程师具有丰富的理论基础和工程经验, 在对多个工作点设计和分析时显得相当复杂^[5]。ANSOFT Maxwell 电磁分析软件具有强大的数据处理能力, 良好的交互界面及剖分功能, 便于对结构参数的优化设计^[6], 采用 ANSOFT Maxwell 软件进行电场有限元分析将大大提高分析的效率和水平。

本文通过 ANSOFT Maxwell 软件对 LZZBJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器进行电场分析, 得到互感器内部电场的主要分布区域, 对一、二次绕组电场集中区域进行局部二维分析, 得到电场随绕组位置变化的分布曲线、电场最大值与最小值的数值和对应的分布点位置。通过改善 LZZBJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器内部绝缘挡板的厚度, 减小因电场强度过高而对绝缘材料产生的损害, 进而有效避免局部放电而引起的突发性故障, 为浇注支柱式电流互感器的结构设计和安全运行提供了依据。

1 仿真模型构建

LZZBJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器内部结构示意图如图 1 所示, 互感器内部结构为低电位的二次

^① 收稿日期: 2018-08-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2018C037)。

作者简介: 伍小冬(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事电气设备在线智能监测及故障诊断的研究。

绕组置于互感器的下部，一次绕组下端在二次绕组的中心位置上，电容在二次绕组的左侧，中间放置绝缘挡板，主绝缘材料环氧树脂外包在一次绕组、二次绕组及其引线上，主绝缘最外层接高电压，最内层接地。图 2 为电流互感器内部电路原理图，图中 R_a 、 R_b 、 R_c 分别表示一次绕组 A 相、B 相和 C 相的等效电阻， R_1 、 R_2 和 R_3 代表二次绕组的等效电阻，图中一次绕组线路采用星形，二次绕组采用三角形联结。互感器在工作时，二次回路始终闭合，绕组的电流与它的匝数成反比，一次绕组和二次绕组磁动势满足：

$$I_1 N_1 = - I_2 N_2$$

(1)

式(1)中，等式右边的负号表示二次电流的相量与一次电流的相量相差 180 °；一次电流对二次电流的比值 I_1/I_2 为 120 : 1。

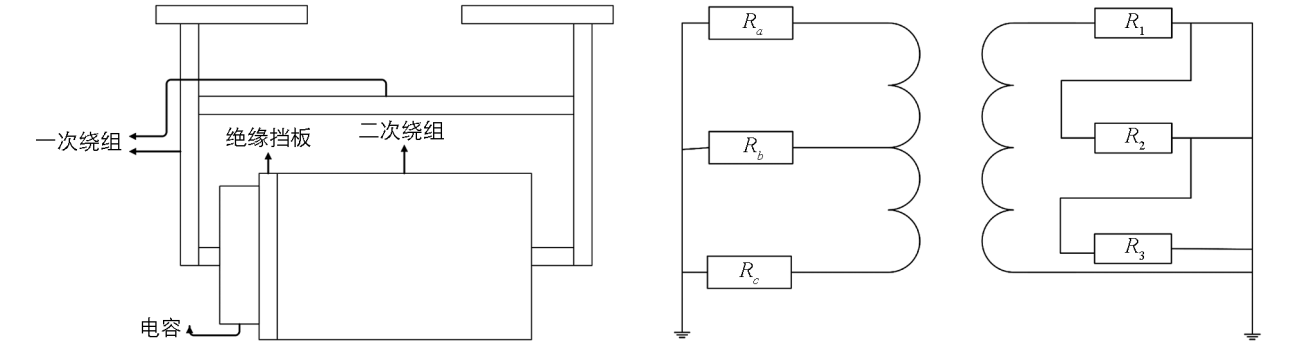


图 1 互感器内部结构示意图

图 2 电流互感器内部电路原理

运用 ANSOFT Maxwell 软件对 LZZBJ9-10B 浇注支柱式电流互感器内部模型建立时，为方便确定最终电场分布的位置，需将模型中的电容、绝缘挡板等做近似处理，处理后数值不变^[7-9]。建立互感器的主要结构参数如表 1 所示。

表 1 互感器结构参数表

材料	互感器	一次绕组	二次绕组
长/mm	300	250	200
宽(内径)/mm	220	40	50
高(外径)/mm	280	200	80

通过互感器的结构参数建立与之相对应的三维模型，建立的三维模型如图 3 所示。对模型进行网格剖分前，需要对求解区域设置对应的边界条件，边界条件的设置通常有以下 3 种：狄利克莱边界条件、诺伊曼边界条件和齐次边界条件^[10]。三维电磁场边界条件的设置目标是边界线和面，本文在计算区域边界设置时选用狄利克莱边界条件：

$$\varphi(x,y,z)|_{\Gamma_1} = \varphi(x,y,z)$$

(2)

式(2)中， Γ 为狄里克莱边界， $\varphi(x,y,z)$ 为已知分布的位置函数或常数。在 Maxwell/Boundaries/Assign/Vector Potential 命令窗口进行设置。边界条件设置好后，对模型各个部件设置相应的物理属性进行网格剖分，应用 Maxwell 2D/3D 自适应网格分析，对存在较大误差的区域进行网格细化得到较高的网格密度，求解采用迭代求解方式。网格剖分图如图 4 所示。

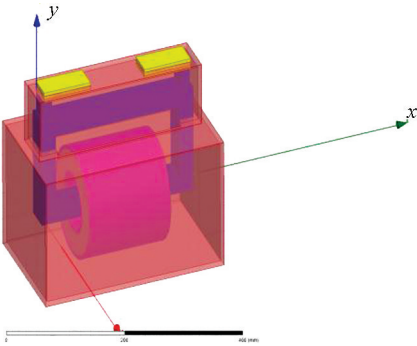


图 3 互感器三维模型

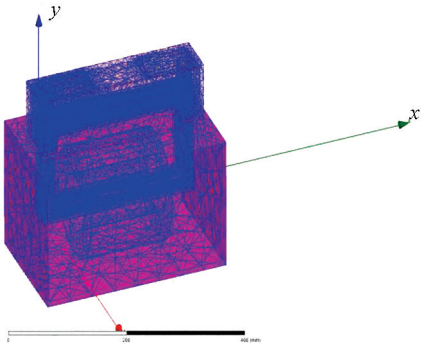


图 4 网格剖分

浇注支柱式电流互感器电场仿真设计最主要的是激励源和各组件材料属性的定义, 仿真涉及的主要技术参数如表 2 所示, 材料参数如表 3 所示。

表 2 互感器主要技术参数

参数名称	数 值	参数名称	数 值
额定电压/kV	10	额定一次电流/A	600
最高工作电压/kV	12	额定二次电流/A	5
一秒热稳定电流/kA	15	额定频率/Hz	50
动稳定电流/kA	37.5	雷电冲击电压/kV	75
绝缘水平/kV	12/42/75	负荷功率因素	0.8

表 3 模型材料参数

材 料	环氧树脂	铜	空气
介电常数	3.9	1	1.000 6
电导率/(S°·m ⁻¹)	1×10 ⁻¹³	5.8×10 ⁷	0

2 运算求解

通过电势求解得到电势分布如图 5 所示。互感器电势较强的位置分布在二次绕组右侧和一次绕组左侧之间, 电势主要集中在一次绕组和二次绕组的上、下两端部, 在端角的中心其电势最高, 随着电势面的扩散, 电势逐渐降低。

通过电场强度求解器运算, 其外部电场强度分布如图 6 所示, 内部一、二次绕组电场分布如图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知, 在交流电压作用下, 二次绕组电场强度集中在绕组端部, 一次绕组周围的电场集中分布区域在 4 个端角, 最大值分布在顶角处, 一次绕组下部两个端角的电场强度强于上部两个端角, 场强依次向周围扩散和减弱。二次绕组周围的电场主要集中在两端且靠近端口部分的场强越强。在互感器外部, 电场主要集中分布在互感器外侧的上半部分。

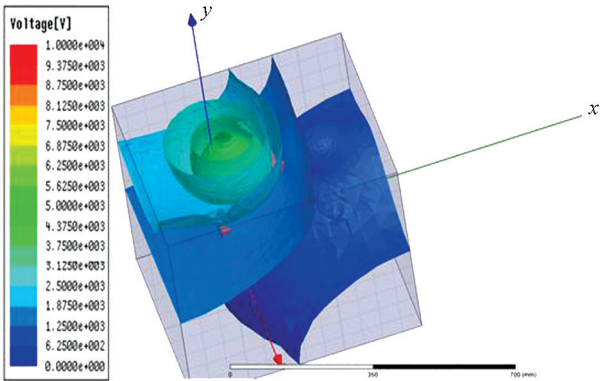


图 5 电势分布

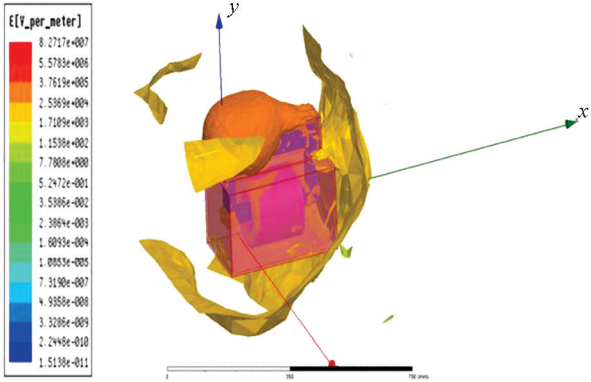


图 6 外部电场强度分布

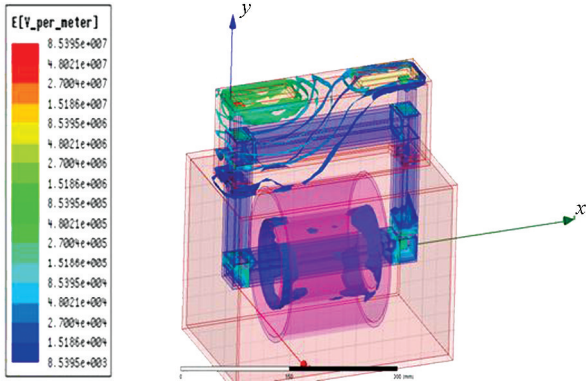


图 7 内部一、二次绕组电场强度分布

3 仿真结果分析

为了得到互感器内部一次和二次绕组周围电场强度分布情况, 基于一、二次绕组是对称结构, 分别截取 z 轴一次绕组和二次绕组的中间平面, 分别作一条自左向右与 x 轴轴向平行的直线, 得到二次绕组的轴

向电场强度分布曲线和一次绕组的轴向电场分布曲线^[11-13]。其中横坐标为起点的距离,单位为 mm;纵坐标为该点的电场强度,单位为 V/m。

二次绕组轴向电场分布如图 8 所示,从左至右电场强度的变化趋势是非线性的,有 3 个波谷 3 个波峰。除两头端部外,绕组其他位置的电场强度较弱,数值波动幅度不大,电场强度维持在 2×10^{-11} V/m 左右。绕组两端的电场分布较高,且趋近端角顶端的电场强度数值增长较快,数值较大,最大值在轴向 130 mm 处,数值为 1.3×10^{-10} V/m。

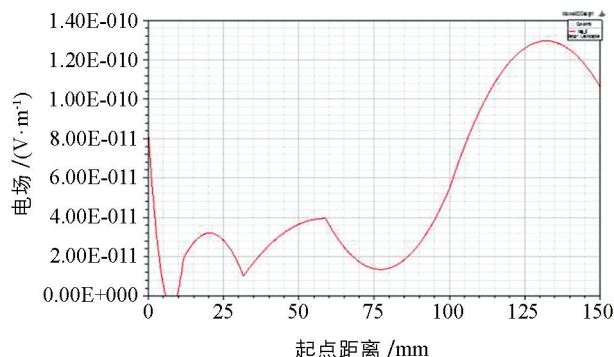


图 8 二次绕组轴向电场分布曲线

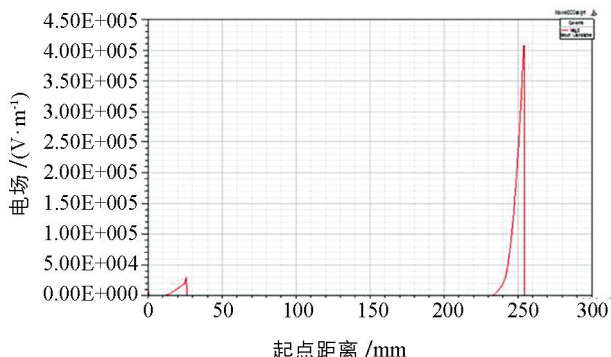


图 9 一次绕组轴向电场分布曲线

一次绕组轴向电场强度分布曲线图如图 9 所示,一次绕组下部周围的电场强度主要集中在左右两个端角,右下角的电场强度强于左下角,最大电场强度值为 4×10^5 V/m,位置在轴向 250 mm 处。中间部分为一次绕组和二次绕组贯穿部分,其电场强度为 0(在绕组内部由于静电平衡,电场强度为 0)。图 9 中电场强度为 0 的区域即为包含在二次绕组内的一次绕组的长度。

为了更好地了解一次绕组和二次绕组端角电场强度分布情况,对一次绕组左下端部角和二次绕组左端横向电场分布进行分析。选取二次绕组左端边界中线,方向与 y 轴负方向平行;选取一次绕组左下端边线,方向与 z 轴正方向平行;分别得到二次绕组左端部中线的电场强度分布曲线和一次绕组左下端部横向电场强度分布曲线。

由于一次绕组主要分布在二次绕组上部和二次绕组内部,使得二次绕组上下两部分的电场强度不对称分布。二次绕组左端部中线电场分布曲线如图 10 所示,随着位置的改变电场强度在不断变化,二次绕组的上端存在一次绕组的上半部分,促使二次绕组的电场强度的最大值分布在绕组的上半部分。二次绕组左端电场强度最大值在二次绕组和一次绕组距离最近的地方即二次绕组左端内侧边界处,最大电场强度值为 9.6×10^3 V/m。由于绕组线圈缠绕在导体外部,通电后因为静电平衡,导体内部场强为零。图中 30~35 mm,68~83 mm 这两段电场强度为 0 的区域,对应的是二次绕组侧面上半部圆环的宽度区域和一次绕组贯穿在二次绕组内的截面区域。

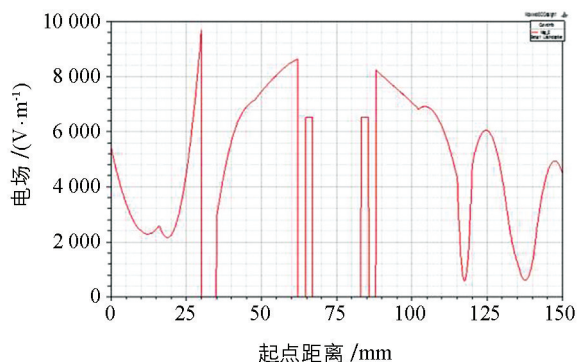


图 10 二次绕组左端部中线电场分布曲线图

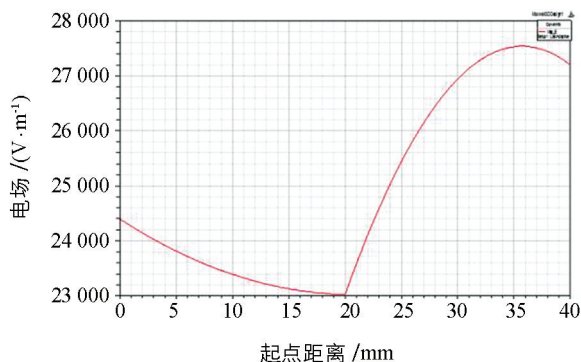


图 11 一次绕组左下端部横向电场分布曲线图

一次绕组左下端部横向电场强度分布如图 11 所示,电场强度在一次绕组左下端分布并不对称,在一次

绕组左下端由于电容等材料物质的存在, 使得从横向边界的左端到右端, 电场强度先减小后增大, 一次绕组左下端电场强度最大值在横向边界最右边, 电场强度最大值为 2.75×10^4 V/m, 在左下端边界线中点处电场强度最小, 最小值为 2.3×10^4 V/m.

通过 ANSOFT Maxwell 软件对 LZBZJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器电场仿真分析, 确定了互感器内部一次、二次绕组电场强度集中分布区域, 以及场强的最大值和最小值的位置点. 在场强最大值位置点附近, 当固体电介质中的气体或液体的局部场强达到其击穿场强时, 将发生局部放电甚至绝缘击穿, 这些位置点也就成为了绝缘材料的易损坏点.

4 结构优化

LZBZJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器内部绕组周围电场集中分布在绕组端部, 本文改善绕组端部电场强度的措施是增加二次绕组左边绝缘挡板厚度, 通过改变绝缘木板厚度达到改善绕组端部电场强度及降低绕组间电场强度的效果^[14-15]. 由图 1 可知, 绝缘挡板为圆环形纸质挡板, 位于电容和二次绕组之间, 大小与二次绕组侧面相等. 互感器本身绝缘挡板厚度为 10 mm, 此次选择增加 5 mm 厚度的绝缘挡板进行电场分析, 按照前面电场仿真步骤, 通过建立模型、设置边界条件、网格剖分和设置参数进行求解计算.

增加绝缘挡板厚度后, 从互感器电场仿真结果发现, 二次绕组轴向的电场分布波动较大, 电场强度分布曲线如图 12 所示, 图中波峰波谷的位置没变, 但对应的场强数值明显增大, 场强最小值位于轴向 85 mm 处, 数值为 1.25×10^{-11} V/m, 最大值仍在 125 mm 处, 数值为 2.1×10^{-10} V/m. 一次绕组轴向电场分布如图 13 所示, 一次绕组轴向电场强度的分布位置基本不变, 绝缘挡板厚度增加后, 减小了电容和一次绕组之间的距离, 使得一侧绕组轴向场强最大峰值减小, 数值为 8×10^3 V/m.

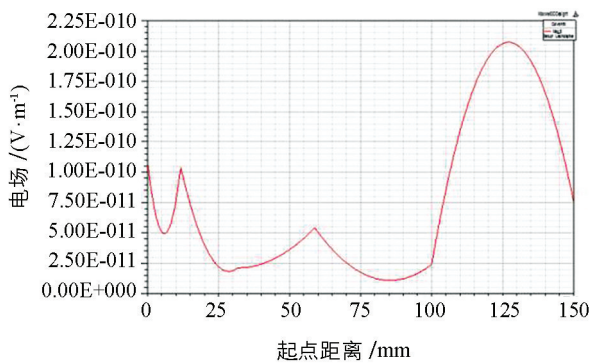


图 12 改善挡板后二次绕组轴向电场分布曲线

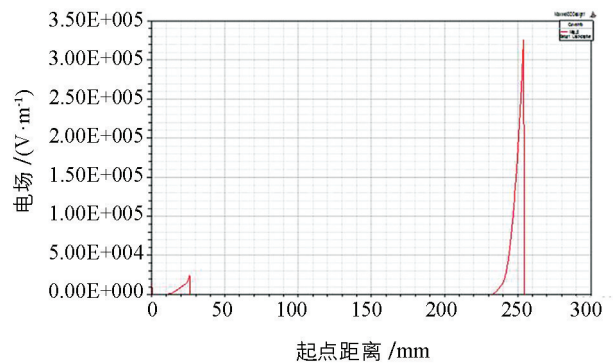


图 13 改善挡板后一次绕组轴向电场分布曲线

增加绝缘挡板厚度后, 二次绕组左端部中线电场强度仍然存在 3 个大的波峰, 电场分布曲线如图 14 所示, 最大波峰值为 7.8×10^3 V/m, 其位置在二次绕组左端部中线 30 mm 处. 一次绕组左下端部电场强度分布如图 15 所示, 左下端部横向电场强度数值大幅度降低, 波峰波谷位置不变, 最小值数值为 1.84×10^4 V/m, 最大值为 2.2×10^4 V/m.

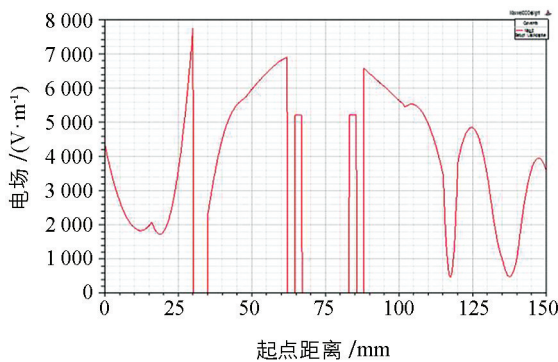


图 14 改善挡板后二次绕组左端部中线电场分布

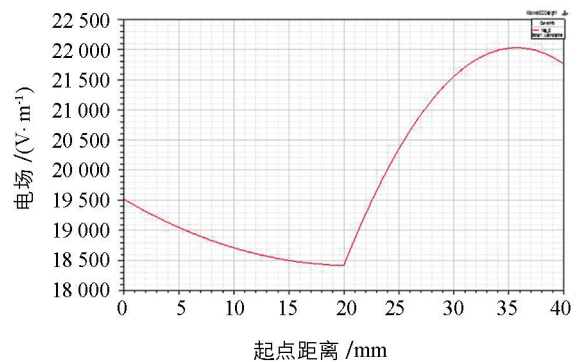


图 15 改善挡板后一次绕组左下端部横向电场分布

通过上述电场分析,与原互感器绝缘挡板厚度相比,绝缘挡板厚度改变后,增加了二次绕组与左端电容的距离,减小了电容与一次绕组左下端的距离,仿真结果发现一次绕组、二次绕组的电场强度最值点的位置变化不大,但数值明显减小.绝缘挡板改善后,使绕组周围的电场分布更加分散化、均匀化,有助于保护一次绕组和二次绕组外围主绝缘材料性质的稳定,使互感器内部结构更加优化,有效避免局部放电而引起的突发性故障.

5 结 论

通过 ANSOFT 有限元分析软件对 LZZBJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器进行了三维电场仿真计算,结论如下:

1) 分析得出 LZZBJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器电势分布特点,内部一次绕组电场集中分布在 4 个端角,二次绕组电场集中分布在左右两端,通过二维平面处理后,得到一次绕组和二次绕组的轴向、二次绕组左端部中线和一次绕组左下端部横向电场分布曲线,分析出一次绕组场强最大值在轴向 250 mm 处,数值为 4×10^5 V/m,二次绕组场强最大值在左端部中线 30 mm 处,数值为 9.6×10^3 V/m,这些点即为 LZZBJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器易发生突发性故障的位置点.

2) 针对 LZZBJ9-10B 型浇注支柱式电流互感器内部电场强度的分布特点,提出一种通过改变绝缘挡板厚度从而避免局部放电发生的有效措施,基于 ANSOFT 软件,仿真验证了该措施的正确性.改变绝缘挡板厚度后,减小了电容与一次绕组左端的距离,降低了一次绕组端角场强最大值并改变了场强最大值的位置点,使原本聚集的电场分散化、均匀化,有利于绕组周围固体电介质的保护,研究结果为浇注支柱式电流互感器的结构设计和安全运行提供了依据.

参考文献:

- [1] 苏永华,杨宏峰.环境温度对干式电流互感器电容屏局部放电的影响[J].高压电器,2013,49(1):130-133.
- [2] 阎秀格,孙 阳,于存湛,等.油浸倒立式电流互感器主绝缘电场分析与优化设计[J].电工技术学报,2014,29(1):37-43.
- [3] 何大猛,晏年平,王仲奕,等.500 kV SF6 电流互感器内部盆式绝缘子缺陷电场分析和实验研究[J].中国电力,2014,47(8):27-32.
- [4] 何计谋,蒲 路,祝嘉喜.126 kV 复合套管 SF6 电流互感器绝缘结构设计[J].高压电器,2006,42(1):42-43.
- [5] 熊 君,胡国辉,全小康,等.基于 Ansoft Maxwell 仿真分析的永磁应用磁路优化设计例析[J].磁性材料及器件,2018,49(6):28-33.
- [6] VRANCKEN M, SCHOLS Y, AERTS W, et al. Benchmark of Full Maxwell 3-Dimensional Electromagnetic Field Solvers on Prototype Cavity-Backed Aperture Antenna[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2007, 61(6): 363-369.
- [7] 杨 洪,方春恩,任 晓,等.35 kV 电子式电流互感器的研究[J].高压电器,2011,47(2):12-16.
- [8] LESNIEWSKA E. Application of 3D Field Analysis for Modelling the Electric Field Distribution in Ceramic Insulator of HV Combined Instrument Transformer[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 51-52: 610-617.
- [9] ALLAHBAKHSI M, AKBARI M. Heat Analysis of the Power Transformer Bushings Using the Finite Element Method[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 714-720.
- [10] 赵姗姗,李红江,杨 锋.基于 Ansoft 的变压器电磁参数计算与分析[J].变压器,2015,52(10):14-18.
- [11] 王佳颖,方春恩,戴玉松,等.35 kV 触头盒电场计算及优化设计[J].高电压技术,2007,33(12):63-65.
- [12] NAJAFI A, ISKENDER I. Electromagnetic Force Investigation on Distribution Transformer Under Unbalanced Faults Based on Time Stepping Finite Element Methods[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,

2016, 76: 147-155.

- [13] 王荣秀, 王 波. 经典电偶极子在交变电场下的运动 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2018, 32(2): 207-212.
- [14] 李随朝, 赵 昱, 李素洁, 等. 100 kA 大电流互感器现场校验方法的研究 [J]. 高压电器, 2016, 52(7): 161-167.
- [15] 王 辉. 基于 Ansys 的 252 kV GIS 用三相共箱式电流互感器研发 [J]. 高压电器, 2016, 52(7): 168-171.

Finite Element Analysis of Electric Field of 10 kV Cast Pillar Current Transformer and Optimized Design for Its Structure

WU Xiao-dong¹, GU Wen-wen¹, PENG Shu-di², WU Gao-lin²,
WANG Qian², LI Xiao-ping², HUANG Hui-xian³, ZHOU Qu¹

1. School of Engineering and Technology, Southwestern University, Chongqing 400716, China;

2. State Grid Chongqing Power Science Research Institute of Electric Power Company, Chongqing 401123, China;

3. State Grid Chongqing Power Company, Chongqing 400015, China

Abstract: Cast pillar current transformers are important devices for measurement, control and protection in power systems. In this paper, the LZZBJ9-10B type cast-type current transformer is taken as an example, and three-dimensional electric field simulation analysis of its interior is carried out by the ANSOFT Maxwell software. The results show that the electric field concentrated distribution areas of the transformer are at the four end angles of the primary winding and the left and right ends of the secondary winding. The electric fields of the primary and the left secondary windings are subjected to local two-dimensional analysis to obtain the position of the distribution point of the maximum and minimum electric field strength of the windings. The authors propose that the thickness of the insulating baffle be changed to avoid partial discharge of the main insulating material resulting from uneven electric field distribution in it, and this proposal is verified by electric field analysis using the ANSOFT Maxwell software. The research results provide a basis for the structural optimization design and safe operation of the 10 kV cast pillar current transformer.

Key words: current transformer; electric field; partial discharge; finite element analysis

责任编辑 汤振金

