

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.09.015

基于粒子群优化算法的特高压变压器绕组端部角环优化布置研究

张良县, 帅远明, 陈 荣, 张珊珊, 张 昭

(西安西电变压器有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 对于超、特高压变压器的设计而言,角环的优化布置是变压器端部主绝缘结构设计的重要组成部分。本文运用多目标优化算法、粒子群优化算法并结合有限元子模型计算技术,在保持原变压器内部的角环个数、各角环厚度及圆弧半径不变的基础上,分别对左、右两侧角环的位置进行优化布置。优化过程中,选取各个考核油隙中沿电力线上最小的绝缘裕度作为优化的目标函数,使角环分割的各油隙关键位置沿电力线方向的绝缘裕度尽量接近。对绕组端部角环位置优化后,不仅使得各考核区域的最小绝缘裕度浮动范围变小,而且使得整个端部绝缘的最小裕度得到了提高。

关键词: 粒子群优化算法;角环优化布置;有限元

Arrangement Optimization of Angle Rings of UHV Transformer Winding Based on PSO Algorithm

ZHANG Liangxian, SHUAI Yuanming, CHEN Rong, ZHANG Shanshan, ZHANG Zhao

(Xi'an XD Transformer Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Optimal arrangement of the angle rings is an important part in EHV or UHV transformer's main insulation structure design. In this paper, multi-objective optimization algorithm, particle swarm optimization(PSO)algorithm and finite element sub-model calculation technology are used to optimize the arrangement of the left/right angle rings with maintaining the original number and thickness of the angle rings and the arc radius unchanged. During the optimization process, the minimum insulation margin along the electric fluxlines in each evaluated oil clearance is selected as the objective function of optimization. The purpose is to make the insulation margins along the direction of the electric fluxlines as close as possible. After optimization, the minimum insulation margin floating range of each evaluated oil clearance becomes smaller, and the minimum insulation margin of the entire end insulation improves.

Key words: particle swarm optimization algorithm; arrangement optimization of angle ring; finite element method

0 引言

对于超、特高压变压器的设计而言,内部主绝缘结构设计是最为关键的部分之一,而主绝缘结构设计中的难点又在于绕组端部绝缘结构的设计。变压器绕组端部结构复杂、电场分布极不均匀,工程上为了改善绕组端部的电场分布,提高变压器的绝缘可靠性,通常的做法是在绕组端部与铁轭之间放置与该处等位线形状基本一致的角环。在绕组

端部布置角环有两个作用:①角环把绕组端部与铁轭间的大油隙分割成若干个小油隙,这样可以提高油隙的耐电强度;②角环的形状与该处等位线形状基本一致,可以使得沿角环表面切向的电场强度大大降低,从而减少了沿面放电的可能性。因此角环的优化布置是变压器端部主绝缘结构设计的重要组成部分。现有文献资料在对变压器端部绝缘结构分析时,大多只是针对固定角环布置进行分析,并没有对角环位置进行优化^[1-5]。只有极少数文献在

收稿日期:2018-03-24; 修回日期:2018-05-26

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2017YFB0902700)。

Project Supported by the National Basic Research Program(2017YFB0902700).

分析时对角环的位置进行了优化调整,但这种优化调整方式有两个不足点:一是这些文献都采用手动方式对角环位置进行调整,这种方式调整次数有限,无法进行全局寻优;另一个不足点是这些文献对角环位置进行调整时都以降低油隙的最大场强为目标,而不是以整体绝缘裕度为目标,即这种优化调整只考虑了局部位置绝缘的要求,并没有对全局范围的绝缘裕度进行考核^[6-8]。

笔者在保持原设计方案中角环个数、各角环厚度及圆弧半径不变的基础上,运用APDL语言编写有限元(FEM)与粒子群优化算法(PSO)联合优化程序,对角环的位置进行优化布置,使得绕组端部的油隙得到合理的分割。最终目的是使角环分割的各油隙关键位置沿电力线方向的绝缘裕度尽量接近,提高端部绝缘的整体裕度。

1 有限元子模型的构建

为了保证电场仿真分析的精度,通常需要对物理模型按实际尺寸进行详细建模。但是,由于在优化过程中通常要进行几百或上千次的迭代计算,因此,为了降低计算时间、提高优化分析效率,需对模型进行等效处理。文中在对角环布置位置进行优化时,为了减小计算量,先从完整模型中取出所关注部分构建子模型。子模型的构建是基于静电场的唯一性定理,即在场域中电位微分方程和边界条件给定时,静电场的解是唯一的^[9-11]。根据该原理,只需保证从完整模型中取出的合适区域子模型的边界电位值和完整模型对应位置相等。经前期的研究计算,取以整体模型右上角725 mm×725 mm的正方形区域作为计算的子域,见图1。在构建子模型的同时,取出子模型边界节点的坐标和电位值用于子模型边界条件的赋值。在Ansys环境下运用APDL编程实现子模型计算,可以大大地缩短计算时间,且可以通过模块化编程,方便重复自动调用,这为后面PSO优化算法实现提供条件。

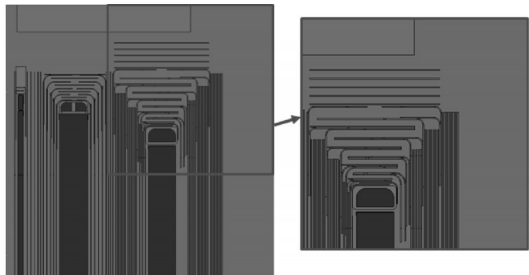


图1 角环位置优化时子模型的位置及范围示意图

Fig. 1 The position and range of sub-model with the arrangement optimization of angle ring

2 角环优化布置的数学模型

采用多个角环对特高压变压器绕组端部的油隙进行分割,把大油隙分割成若干个小油隙可以大大提高油隙许用场强^[12]。各个小油隙中的最小绝缘裕度与角环个数、各个角环的厚度、圆弧半径以及各个角环在绕组辐向、轴向的位置相关。特别地,为了方便制造及统一订货,各大型电力变压器制造企业都对角环的圆弧半径(圆角)进行了标准化,要求圆弧半径为10的整数倍。通常,对于电力变压器线圈端部绝缘水平小于110 kV时,端部角环的圆弧半径为10 mm;线圈端部绝缘水平大于110 kV时,端部角环的圆弧半径为20 mm。如果在靠近端部静电板区域,如果用圆弧半径为20 mm的角环分割出的油隙过大,则可将角环的圆弧半径适当放大,但最大不能大于40 mm,且必须为10的整数倍。也正是由于对角环的圆弧半径(圆角)进行了标准化,所以文中未对角环的圆弧半径进行优化。

在优化时,保持原变压器内部的角环个数、各角环厚度及圆弧半径不变,在此基础上对角环的位置进行合理地布置,提高端部绝缘的整体裕度^[13-14]。为进一步分析计算,需要将各个角环的位置变量进行参数化处理。角环优化设计时对各个角环的位置变量进行参数化的示意图见图2。其参数主要有:右侧角环在绕组辐向的位置参数 $d_1 \sim d_5$,右侧角环在绕组轴向的位置参数 $h_1 \sim h_5$,左侧角环在绕组辐向的位置参数 $z_1 \sim z_4$,左侧角环在绕组轴向的位置参数 $w_1 \sim w_3$ 。

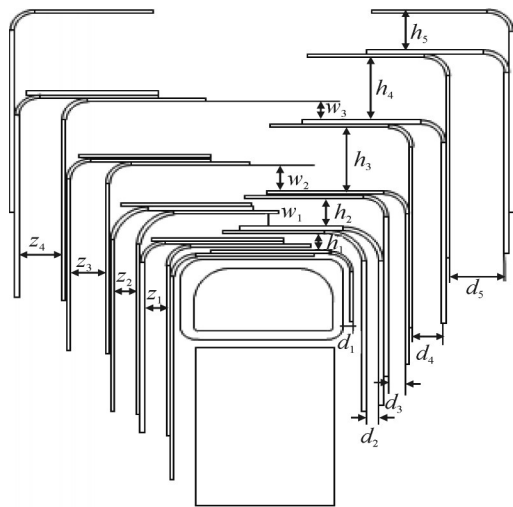


图2 各个角环的位置变量参数化示意图

Fig. 2 The angle ring position variable parameter diagram

需在特别说明的是:变压器在试验及运行时要承受雷电冲击、操作冲击、1 min工频耐压、长时感应耐压、工频长期运行电压等多种电压型式,但在对主绝缘设计分析时,要先将各种类型的电压通过除

以对应的设计绝缘因子转化成等效 1 min 工频电压,并从中选取最大值作为考核电压,这个考核电压就是所谓的设计绝缘水平 DIL。所以,文中在后续分析时采用等效的 1 min 工频电压最大值作为模型的激励实际上是同时考虑了上述各种电压型式的。

通过对变压器端部绝缘的电场分析计算可知,当角环位置参数发生变化时,角环倒角区域的油隙场强集中,裕度较小^[15]。因此为了节约优化计算的时间成本,在优化时仅针对这几个区域沿电场线的绝缘裕度进行考核,考核区域见图 3。

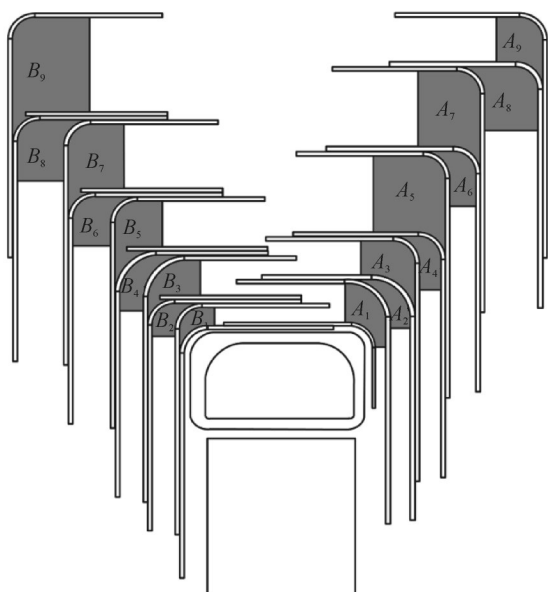


图3 考核区域示意图

Fig. 3 The assessment clearance diagram

考虑到优化过程中涉及的变量及考核区域过多,会导致粒子寻优困难。从图 3 中可以看出,左右两侧的考核区域是相互独立的。因此可以对左右两侧的角环位置分别进行优化。文中在优化时,保持左、右两侧角环最里层、左侧最外层角环位置固定不变,在此基础上先对右侧的角环位置进行优化,再对左侧角环的位置优化。

为了保证优化前后变压器绕组端部结构的一致性,在对右侧的角环位置进行优化时,需要对角环的整体范围进行限定

$$\begin{cases} 81 \leq d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 \leq 101 \\ 166 \leq h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 \leq 186 \end{cases} \quad (1)$$

对于左侧的角环位置进行优化时,角环的整体范围限定条件为:①保持左侧角环总体轴向高度与原变压器中的布置一致;②对于左侧角环辐向宽度的限制为

$$78 \leq z_1 + z_2 + z_3 + z_4 \leq 93 \quad (2)$$

由于参数 d_1 、 d_2 、 d_3 所对应的角环比较靠近静电板,油隙的场强较高,按照设计经验, d_1 、 d_2 、 d_3

的取值不能太大。参数 d_4 、 d_5 所对应的角环远离高场强区域,取值可以大一些。另外,考虑到油流散热条件的限制,工程上规定变压器中最小油隙为 2 mm。因此,根据经验可以设定优化范围为

$$\begin{cases} 2 \text{ mm} \leq d_1 \leq 20 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq d_2 \leq 20 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq d_3 \leq 20 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq d_4 \leq 50 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq d_5 \leq 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (3)$$

参考实际变压器结构,角环在绕组轴向的布置方式为两个角环相叠,上面再叠一个纸圈。这样做的好处在于可以隔断沿面闪络的路径。把这些纸板厚度相加再加上 2 mm 最小油隙,则角环在绕组轴向的高度必须大于 13 mm。参数 h_1 、 h_2 所对应的角环比较靠近静电板,参数 h_3 、 h_4 、 h_5 所对应的角环远离高场强区域。因此,结合工程实际要求,可以设定角环在绕组轴向的高度范围为

$$\begin{cases} 13 \text{ mm} \leq h_1 \leq 30 \text{ mm} \\ 13 \text{ mm} \leq h_2 \leq 30 \text{ mm} \\ 13 \text{ mm} \leq h_3 \leq 50 \text{ mm} \\ 13 \text{ mm} \leq h_4 \leq 50 \text{ mm} \\ 13 \text{ mm} \leq h_5 \leq 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (4)$$

综合上述参数,可得右侧角环优化时决策变量的取值空间 Ω_1 为

$$\Omega_1 = \left\{ \begin{array}{l} 2 \leq d_1 \leq 20, 2 \leq d_2 \leq 20, 2 \leq d_3 \leq 20, \\ 2 \leq d_4 \leq 50, 2 \leq d_5 \leq 50, 13 \leq h_1 \leq 30, \\ 13 \leq h_2 \leq 30, 13 \leq h_3 \leq 50, 13 \leq h_4 \leq 50, \\ 13 \leq h_5 \leq 50 \end{array} \right\} \quad (5)$$

同理可得左侧角环优化时决策变量的取值空间 Ω_2 为

$$\Omega_2 = \left\{ \begin{array}{l} 2 \leq z_1 \leq 20, 2 \leq z_2 \leq 20, 2 \leq z_3 \leq 50, \\ 2 \leq z_4 \leq 50, \\ 2 \leq w_1 \leq 12, 2 \leq w_2 \leq 39, 2 \leq w_3 \leq 39 \end{array} \right\} \quad (6)$$

在对各个考核油隙的绝缘裕度分析时,先采用有限元数值计算方法(通过 Ansys 软件来实现)计算出模型的电场分布,然后选取各个考核油隙沿电力线上最小的绝缘裕度作为静电板结构优化的目标函数,即: $K = \min(q)$ (q 为裕度)。为保证优化过程找到较优的结果,同时考虑迭代计算的时间成本,文中中规定最大进化代数 $T_{\max} = 50$ 。

算法中惯性权重因子采用线性递减形式,这种形式的优点是在寻优初期可以增强粒子的广域搜索能力,而在后期则着重于局部深度开发。惯性权重因子的具体表达式为

$$\omega(t) = 1 - \frac{0.6t}{T_{\max}} \quad (7)$$

加速常数 $c_1(t)$ 、 $c_2(t)$ 为线性递增形式,这两个加速常数分别对应粒子的社会部分和自我认知部分,

其具体表达式为

$$\begin{cases} c_1(t) = 2.5 - \frac{2t}{T_{\max}} \\ c_2(t) = 0.5 + \frac{2t}{T_{\max}} \end{cases} \quad (8)$$

运用 APDL 语言编写粒子群优化算法的主程序,其优化流程见图4。

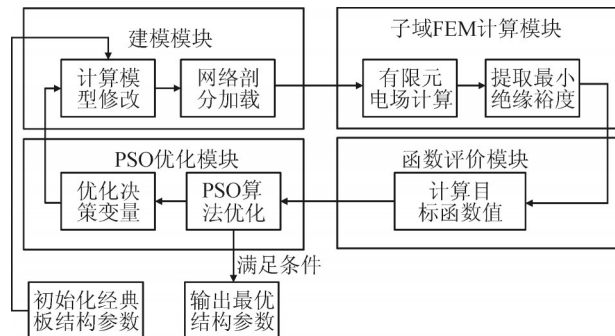


图4 联合优化算法流程图

Fig. 4 The optimization algorithm flow chart

3 粒子群优化算法的结果与分析

运行所开发的基于 FEM 与 PSO 联合优化算法的多目标优化程序,得到变压器绕组端部角环位置最终优化结果。优化前后各考核区域最小绝缘裕度对比见图5。

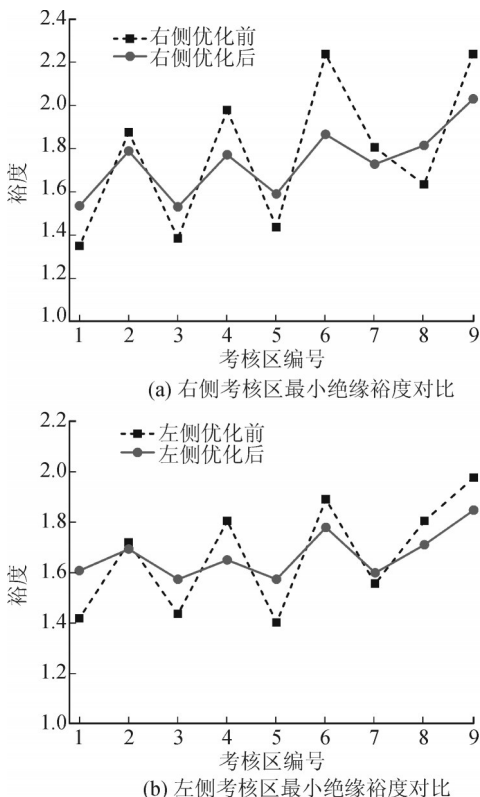


图5 优化前后各考核区域最小绝缘裕度对比

Fig. 5 The minimum margin contrast of the assessment area before and after optimization

图5(a)为右侧考核区最小绝缘裕度对比(即对应图3中的A₁-A₉);图5(b)为左侧考核区最小绝缘裕度对比(即对应图3中的B₁-B₉)。从图5中可以看出,对绕组端部角环位置优化后,不仅使得各考核区域的最小绝缘裕度浮动范围变小,而且使得整个端部绝缘的最小裕度得到了提高,优化后右侧的最小裕度由1.35上升到了1.54,左侧最小裕度由1.4上升到了1.57。

多目标优化程序输出取得最优化结果时的决策变量值即为满足结构最优化的设计参数。为便于实际制造,对结果进行取整。取整后右侧、左侧角环布置的最优化的设计参数见表1、2。

表1 右侧角环布置的最优结构设计参数

Table 1 The optimal structural design parameters for the right-hand angle ring arrangement

设计参数	尺寸/mm	设计参数	尺寸/mm
d_1	2	h_1	13
d_2	7	h_2	23
d_3	13	h_3	50
d_4	20	h_4	50
d_5	40	h_5	40

表2 左侧角环布置的最优结构设计参数

Table 2 The optimal structural design parameters for the left-hand angle ring arrangement

设计参数	尺寸/mm	设计参数	尺寸/mm
z_1	7	w_1	7
z_2	10	w_2	15
z_3	21	w_3	15
z_4	50	—	—

通过前面的分析可知,采用基于 FEM 与 PSO 联合优化算法的变压器绕组端部角环位置多目标优化程序进行优化后,绕组端部角环所分割的各个油隙中关键区域的绝缘裕度与优化前相比分布更加均匀,可见算法通过自动进化和搜索,可以有效地找到了更优的解。

对优化过程作进一步分析。对右侧、左侧角环位置优化时,粒子群体最优评价函数值与1号粒子各维度速度随进化代数变化分别见图6、7。图6(a)、图7(a)为对应的粒子群体最优评价函数值随进化代数的变化,它们体现的是群智能在寻优过程中的变化趋势^[16-18]。从图6(a)、图7(a)中可以看出,在进化前期,粒子群体最优评价函数值随进化代数下降较快;到后期,其值下降缓慢,并逐渐趋于固定值。右侧角环优化时粒子群体最优评价函数值在42代左右趋于定值,左侧角环优化时粒子群体最优评价函数值在20代左右趋于定值。

除评价函数值外, 粒子在各维度的飞行速度也是寻优过程中的重要参数^[19-21]。图 6(b)、图 7(b)为右侧、左侧角环位置优化时各自的第 1 号粒子各维度速度随进化代数变化曲线。从图 6(b)、图 7(b)中可以看出: 进化初期, 各维度上的速度都以较大幅值震荡, 飞行速度主要来自“认知”部分; 到了进化后期, 粒子各方向飞行速度逐渐降低, 各粒子逐步达到共识。

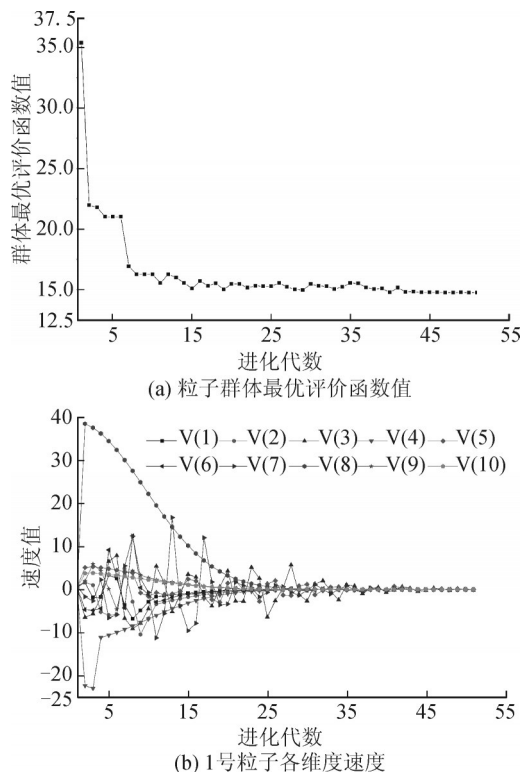


图 6 右侧角环优化时粒子群体随进化代数变化

Fig. 6 Particle population changes with evolutionary algebra in the right-hand angle ring optimized

4 结语

文中运用多目标优化算法、粒子群优化算法并结合有限元子模型计算技术, 在保持原变压器内部的角环个数、各角环厚度及圆弧半径不变的基础上, 分别对左、右角环的位置进行优化布置, 使角环分割的各油隙关键位置沿电力线方向的绝缘裕度尽量接近。对绕组端部角环位置优化后, 不仅使得各考核区域的最小绝缘裕度浮动范围变小, 而且使得整个端部绝缘的最小裕度得到了提高。优化后, 右侧油隙的最小裕度由 1.35 上升到了 1.54, 左侧油隙最小裕度由 1.4 上升到了 1.57。

参考文献:

- [1] 吕晓德, 陈世坤. 换流变压器阀侧绕组端部电场的特性分析[J]. 变压器, 1998, 35(6): 15-20.
LYU Xiaode, CHEN Shikun. Electric field characteristics

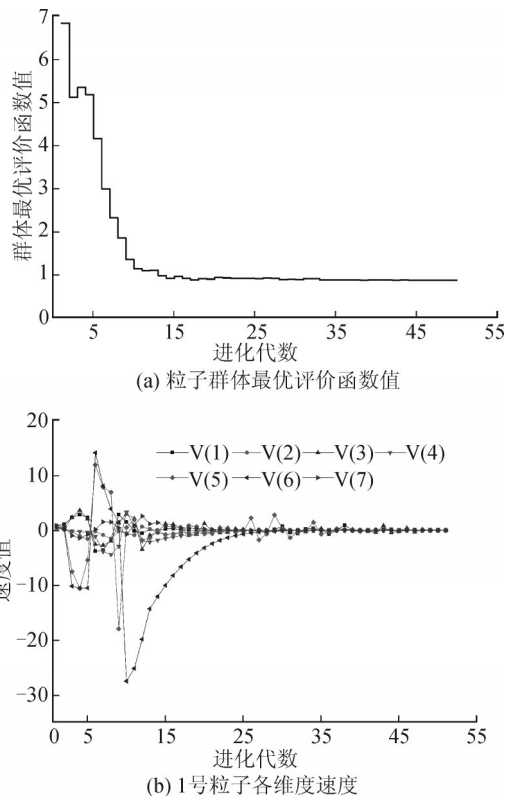


图 7 左侧角环优化时粒子群体随进化代数变化

Fig. 7 Particle population changes with evolutionary algebra in the left-hand angle ring optimized

of converter transformer valve winding end[J]. Transformer, 1998, 35(6): 15-20.

- [2] 韩磊. 电力变压器绕组端部绝缘结构电场的数值分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
HAN Lei. Numerical analysis of electric field at the end of power transformer winding insulation[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [3] 王建民, 张喜乐, 张国强, 等. 大型变压器主绝缘电场的全域分析工程仿真软件开发[J]. 变压器, 2010, 47(9): 15-18.
WANG Jianmin, ZHANG Xile, ZHANG Guoqiang, et al. Development of global simulation software for main insulation electric field of large transformer[J]. Transformer, 2010, 47(9): 15-18.
- [4] 赵勇进, 谢庆峰, 张良县. 500 kV 辐向分裂变压器关键绝缘结构优化分析[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 137-141.
ZHAO Yongjin, XIE Qingfeng, ZHANG Liangxian. Optimization and analysis on the key insulation structure of 500 kV radial split transformer[J]. High Voltage Apparature, 2016, 52(3): 137-141.
- [5] 邓颖. 换流变压器绝缘结构分析[J]. 高压电器, 2011, 47(10): 53-58.
DENG Ying. Analysis on insulation structure of converter transformer[J]. High Voltage Apparature, 2011, 47(10): 53-58.
- [6] 马爱清. 基于 Ansys 的 500 kV 电力变压器端部绝缘电场分析及结构优化[J]. 上海电力学院学报, 2012, 28(4): 305-308.

- MA Aiqing. Electric field analysis and structure optimization of 500 kV power transformer based on Ansys[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2012, 28(4): 305-308.
- [7] 张沛红,单涛,时亚娟,等. 变压器端部绝缘结构参数化设计及电场分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(2): 76-79.
- ZHANG Peihong, SHAN Tao, SHI Yajuan, et al. Parametric design of insulation structure and analysis of the electric field at winding end of transformer[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2012, 17(2): 76-79.
- [8] 吴哲. 大型换流变压器的电场分析与绝缘结构改进的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- WU Zhe. Electric field analysis and the research of insulation structure improvement of the large converter transformers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [9] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 111-131.
- FENG Cizhang, MA Xikui. Introduction of engineering electromagnetic field[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 111-131.
- [10] 倪光正,杨仕友. 工程电磁场数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 5-29.
- NI Guangzheng, YANG Shiyu. Engineering electromagnetic field numerical calculation[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004: 5-29.
- [11] 丁春红. 基于电场优化的电力变压器小型化研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- DING Chunhong. Study on miniaturization of power transformer based on electric field optimization[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010.
- [12] BALMA P, DEGENEFF R, MOORE H, et al. The effects of long term operation and system conditions on the dielectric capability and insulation coordination of large power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 960-971.
- [13] 郑殿春,路长柏,王秋光. 组合法分析电力变压器端部电场及其绝缘结构[J]. 电工技术学报, 1994(4): 10-12.
- ZHENG Dianchun, LU Changbai, WANG Qiuguang, et al. The combined method for analyzing the winding Ends field and insulation structure[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 1994(4): 10-12.
- [14] 刘凤英,韩磊,张喜乐,等. 电力变压器主绝缘电场的数值分析[J]. 天津工业大学学报, 2014, 33(3): 75-79.
- LIU Fengying, HAN Lei, ZHANG Xile, et al. Numerical analysis of main insulation electric field in power transformer[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2014, 33(3): 75-79.
- [15] DEL VECCHIO R M. Geometric effects in the electrical breakdown of transformer oil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 652-656.
- [16] 李宁,邹彤,孙德宝,等. 基于粒子群的多目标优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(23): 43-46.
- LI Ning, ZOU Tong, SUN Debao, et al. Multi-objective optimization algorithm based on particle swarm[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(23): 43-46.
- [17] 张利彪,周春光,刘小华,等. 粒子群算法在求解优化问题中的应用[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2006, 23(4): 385-389.
- ZHANG Libiao, ZHOU Chunguang, LIU Xiaohua, et al. Particle swarm optimization algorithm in the application of optimization[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2006, 23(4): 385-389.
- [18] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.
- [19] 谢涛,陈火旺. 多目标优化与决策问题的演化算法[J]. 中国工程科学, 2002, 4(2): 59-68.
- XIE Tao, CHEN Huowang. Multi-objective optimization and decision-making evolution algorithm[J]. Chinese Engineering Science, 2002, 4(2): 59-68.
- [20] 熊盛武,刘麟,王琼,等. 改进的多目标粒子群算法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2005, 51(3): 308-312.
- XIONG Shengwu, LIU Lin, WANG Qiong, et al. Improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Journal of Wuhan University (Science Edition), 2005, 51(3): 308-312.
- [21] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.

张良县(1985—),男,博士,工程师,主要从事超特高压电力变压器设计优化工作。