

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.04.014

雷电冲击下换流变压器的缩比模型设计与测试

普子恒¹, 刘 路¹, 方春华¹, 张亚东²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 换流变压器进行雷电冲击耐压试验研究周期长、代价高,而利用缩比模型进行试验研究具有良好的经济性,且利于试验数据的获取,并可与仿真结果进行对比分析。为设计与原模型电气特性一致的缩比模型,本文推导了雷电冲击下变压器的缩比公式,设计了缩比模型,对缩比模型和原模型在相似激励下的电场和磁场分布进行了仿真对比,并利用多导体传输线模型计算了缩比模型与原模型在雷电冲击下的绕组电压波形,原模型与缩比模型误差在5%以内。对缩比模型进行了绕组分布电压测量,结果表明,引出线结构会影响绕组电气特性,需进一步研究修正方法。

关键词: 换流变压器; 雷电冲击; 缩比模型; 绕组电压分布

Design and Test of the Reduced-scaled Model of Converter Transformer Under Lightning Impulse

PU Ziheng¹, LIU Lu¹, FANG Chunhua¹, ZHANG Yadong²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The experimental study on the large transformer under the lightning impulse voltage is of long period and high cost. The experimental study on the reduced-scaled model has good economic performance, and it is easy to obtain valid data. The results can be compared with the simulation results. In order to design a scaled model with the electrical characteristics of the original model, the similarity formulas of the transformer under lightning impulse voltage are derived according to the similarity theory. The reduced-scaled model is designed. The electric field and magnetic field distribution of the original model and similarity model under corresponding motivation are studied by simulation. The winding voltage waveforms of the original model and similarity model under corresponding impulse voltage are calculated by multi-conductor transmission line model. The error between the original model and the scaled model is less than 5%. The distribution voltage distribution of winding is measured. The results show that the structure of the outgoing lines affects the electrical characteristics of the winding. It is necessary to further study the correction method.

Key words: converter transformer; lightning impulse; reduced-scaled model; voltage distribution of windings

0 引言

研究雷电冲击下变压器绕组电压分布以及匝间故障特征对于变压器绝缘的设计制造和故障诊断有重要意义^[1-7]。对于大型变压器,若采用原模型进行雷电冲击试验、研究绕组电压分布以及故障特征,代价高且难以在绕组上添加抽头进行测量,而

如果仅采用仿真计算的方法,由于变压器结构复杂,缺乏试验对比与修正,可能存在较大误差^[8-12]。而根据相似理论设计合理的缩比模型,能反映原模型的电气特性,可方便的进行试验研究,并与仿真结果进行对比分析,具有重要的工程意义。

相似理论在电力系统中应用广泛,国内外学者进行了各种缩比模型的研究,缩比模型的试验方法

收稿日期:2018-09-04; 修回日期:2018-11-03

基金项目:国家电网公司重大科技项目(52153213020Z)。

Project Supported by Major Science and Technology Program of SGCC(52153213020Z).

在变电站电场分布、大型变压器的电气特性、冲击耐压试验、地网电阻等研究中都有应用^[13-19]。在变压器研究方面,日本的Toshihiro Tsuboi利用特高压等级油浸式变压器的缩比模型进行了冲击耐压试验研究,验证了采用 k 因素函数评价特高压等级的设备是可行的^[20];波兰的Kazimierz设计一个三相变压器的小型缩比模型,利用有限元仿真模型对变压器的相似系数进行了计算,并通过模型的测量验证了相似准则的有效性^[21];M.A. Brubaker基于500 MVA的变压器原模型建立了一个相似比为1/4的缩比模型,利用缩比模型进行了油流带电的试验研究^[22];中国电科院李光范为研究冲击电压与工频电压在变压器串联绕组与并联绕组之间的主绝缘间隙上产生的叠加过电压,通过1 000 kV自耦变压器的70%缩比模型进行了试验研究^[23]。上述研究验证了缩比试验法的等效性可以满足工程需要,但需要根据研究对象选择合适的缩比准则。

文中根据雷电冲击下变压器绕组的电气特性,推导适用的缩比公式;建立简化单相双绕组变压器的原模型和缩比模型,仿真分析缩比模型和原模型的电场和磁场分布特性;建立有限元模型仿真计算分布参数矩阵,利用MTL模型仿真模拟缩比模型和原模型在雷电冲击下的绕组电压波形,并进行对比分析,验证缩比模型的等效性;设计制作了换流变压器缩比模型,并进行了故障模拟的测试分析。

1 雷电冲击下变压器缩比关系推导

文中主要研究雷电冲击电压作用下的绕组电压分布特性,同时考虑变压器绕组的MTL模型,主要选择麦克斯韦方程组、电容计算公式、高频下的电感电阻计算公式以及有损传输线电报方程,根据相似原理推导出变压器缩比公式。假设原模型的相似因子为 k ,则缩比模型参数可表示为 $(\cdot)=k_0(\cdot)'$,其中 $(\cdot)'$ 表示缩比模型的相关物理量。基本方程的相似关系已在文[24]中进行了推导,文中不再重复。下文主要讨论高频下电感、电阻计算公式以及有损传输线电报方程。考虑雷电冲击作用下等效频率很高,高频下由于电磁波透入导体的分量忽略不计,可不考虑铁心饱和及铁心涡流等效电阻,整个系统近似为线性系统。

电感参数与磁导率、匝数的平方、物理尺寸成正比,设缩比比例为 k_x ,可得电感的缩比公式见式(1)。当原模型与缩比模型匝数相同时, $k_n=1$,可简化为式(2)。

$$k_L = k_\mu k_n^2 k_x \quad (1)$$

$$k_L = k_\mu k_x \quad (2)$$

高频下导体电阻参数 $R \propto \sqrt{f\mu/\sigma}/x$,其中 f 为频率, μ 为磁导率, σ 为电导率,可得电阻的缩比公式,见式(3)。

$$k_R = \sqrt{k_\mu k_\sigma}/k_x \quad (3)$$

有损均匀传输线的基本方程组见式(4)。根据相似关系可得电报方程的缩比公式见式(5)。考虑实际模型制作时,缩比模型的介电常数 ϵ 和磁导率 μ 与原模型完全相同,则有 $k_\epsilon=1, k_\mu=1$,再综合考虑其它基本方程的相似关系,则可以得到雷电冲击条件下对应各物理量的缩比关系见式(6)。

$$\begin{cases} \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} = -[R_0 i_0(z,t) + L_0 \frac{\partial i(z,t)}{\partial z}] \\ \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -[G_0 u(z,t) + C_0 \frac{\partial u(z,t)}{\partial z}] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{k_U}{k_x} = k_R k_L = \frac{k_L k_L}{k_L} \\ \frac{k_I}{k_x} = k_C k_U = \frac{k_C k_U}{k_L} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} k_\epsilon = k_\mu = 1 \\ k_L = k_C = k_L = k_x \\ k_\sigma = k_R = 1/k_x \\ k_L = k_U \\ k_E = k_D = k_B = k_H = k_U/k_x \\ k_\rho = k_J = k_U/k_x^2 \end{cases} \quad (6)$$

式(4)-(6)中: C 为电容; B 为磁感强度; H 为磁场强度; E 为电场强度; D 为电位移矢量; J 为电流密度; ρ 为电荷密度, L 为长度尺寸。

根据式(6),建立缩比模型主要需注意以下几点:①对应导体的电导率需要按缩比因子进行改变,否则缩比公式不成立,但实际制作中导体的电导率也难以按缩比因子改变,下文中将对缩比模型中电导率改变与不改变两种情况进行仿真研究,分析对电气特性的影响;②时间变量需要根据缩比因子改变,即激励源的频率要根据缩比因子作相应改变,例如原模型的输入电压为50 Hz,缩比模型的频率为 $50/k_x$ Hz;③绕组对应结构不变,绕组匝数不变,尺寸按比例缩小。

2 缩比模型与原模型的电场与磁场仿真对比

利用一个简化的单相双绕组变压器模型,对缩比模型与原模型的电场和磁场特性进行对比分析。简化变压器模型见图1。原边绕组共有线圈

18 饼,每饼 10 匝,共 180 匝;副边绕组共有线圈 16 饼,每饼 5 匝,共 80 匝;建立了导线绝缘层;外壳接地作为边界。按照相同结构建立尺寸为 1/5 的缩比模型。

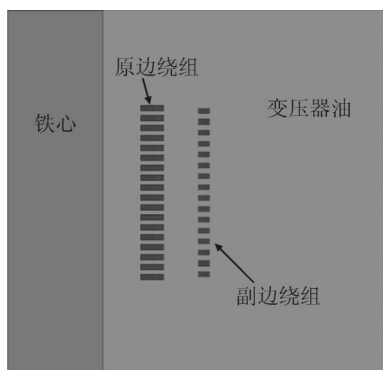
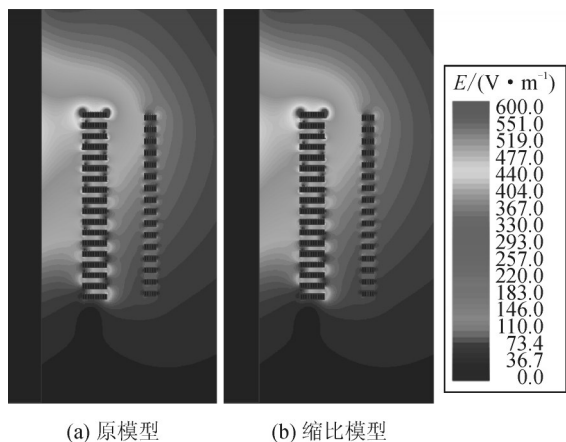


图1 简化变压器模型

Fig. 1 Simplified transformer model

为进行缩比模型与原模型的电场仿真对比,首先要确定缩比模型与原模型各绕组的电位,由于冲击电压下绕组的电位是不断变化的,不可能加载所有时刻的电位,以变压器绕组均匀压降的情况来代替。对原边绕组按顺序加载从 180 V 到 1 V 的电压,外壳和铁心接地,电压设为 0 V。根据缩比公式设置缩比模型的电位分布,按顺序加载 36 V 到 0.2 V,这种设置的假设前提是原模型和缩比模型在冲击电压下的电场分布是一致的,这个假设将在后文中进行验证。利用有限元法建模仿真得到原模型与缩比模型的电场对比见图 2。同时取对应路径上的电场值,对比两者的差距在 0.1% 以内,结果表明缩比模型和原模型的电场分布基本相同。



(a) 原模型 (b) 缩比模型

图2 原模型与缩比模型的电场分布对比

Fig. 2 Comparison of the electric field distribution between original model and reduced-scaled model

进行原模型与缩比模型的磁场分布对比研究,在原模型的原边绕组导体加载 10 A 的正弦电流,副边绕组导体加载 -22.5 A 的正弦电流,扫频频率设置为 10、100、200 kHz。根据缩比公式,缩比模型的原边绕组导体加载 2 A 的正弦电流,副边绕组导体加

载 -4.5 A 的正弦电流,设置对应的扫频频率,分别为 50、500、1 000 kHz。为研究电导率的影响,采用两种设置方式,一种采用与原模型相同的电导率,另一种按缩比公式改为原模型的 5 倍。为更准确的进行定量对比,在原模型上选取任意一条长为 1.8 m 的路径,在缩比模型上选取对应路径,长度 0.36 m,取两条路径上的磁感应强度数值进行对比分析,见图 3。对比图 3(a)、(b),当原模型与缩比模型导线电导率相同时,缩比变压器模型和原模型的磁场分布差别较为明显;对比图 3(a)、(c),根据缩比公式采用 5 倍电导率的导线制作时,两个模型相同路径下的磁感应强度分布基本相同,幅值大小也基本相同。结果表明,按照缩比公式进行设计原模型和缩比模型的磁场分布基本相同。若实际模型采用相同电导率材料,电气特性会有一定差异。

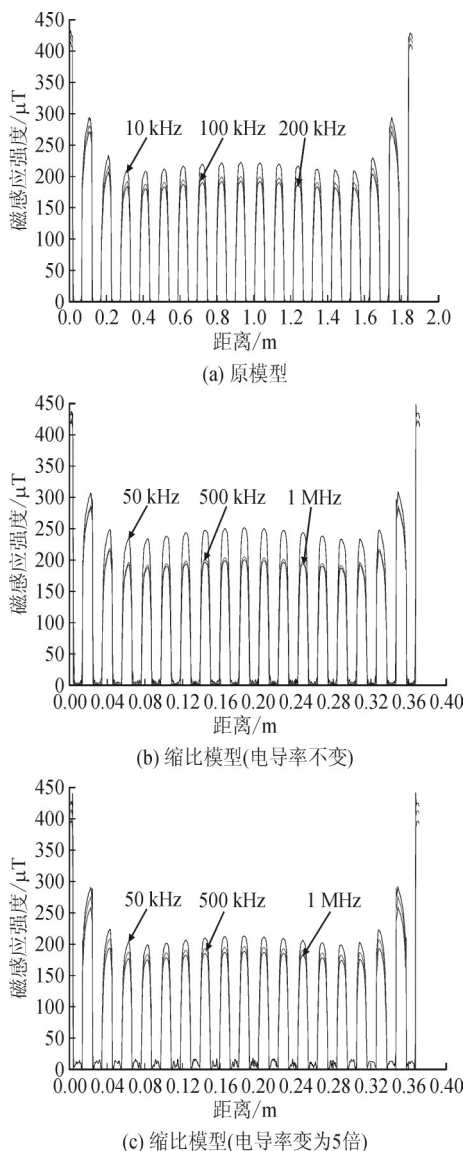


图3 原模型与缩比模型的磁感应强度对比

Fig. 3 Comparison of magnetic induction intensity between original model and reduced-scaled model

3 雷电冲击下绕组电压分布的对比分析

进一步研究雷电冲击下缩比模型与原模型的绕组电压分布是否一致。首先根据绕组结构建立模型,采用有限元法计算绕组的分布参数矩阵。对计算所得原模型和缩比模型的分布参数进行对比分析,根据缩比公式,其电感、电容参数也是按缩比因子进行缩比的,此处将缩比模型的参数乘以5倍与原模型的对应该参数进行对比。按照缩比公式进行设置,缩比模型与原模型的电容矩阵各元素的最大差异为2.08%,平均差异为0.2%,从平均差异可以看出两者基本相同。若缩比模型导线采用相同电导率时,与原模型的电感参数矩阵中各元素最大差异为11.64%,平均差异为7.06%。当按照缩比公式将缩比模型导线电导率变为5倍时,其电感参数矩阵中各元素最大差异为3.37%,平均差异为2.19%,说明改变电导率后与原模型更为接近。

将计算所得的分布参数矩阵代入MTL模型,进行雷电冲击下绕组波过程计算。原模型的激励波形选择标准的雷电冲击波,即1.2/50 μs 。根据相似公式,缩比模型缩小了5倍,其激励波形要做相应调整,选择为0.24/10 μs 。选取原模型和缩比模型对应位置的几个典型线匝首端电压波形见图4。对比图4(a)、(b),缩比模型的导线电导率不改变时,其对应线匝的电压波形与原模型有一定差异;对比图4(a)、(c),按缩比公式改变电导率的缩比模型,其对应匝的电压波形变化趋势与原模型基本相同,取峰值时刻的电压分布进行对比,相差不超过5%。结果表明原模型和缩比模型绕组在雷电冲击下的电压分布特性基本相同,进一步验证了根据相似理论推导出的缩比公式可以应用于变压器绕组雷电冲击耐压下电压分布特性的研究。

4 换流变压器缩比模型设计与实测

根据Y连接的 ± 800 kV换流变压器典型结构,结合推导的缩比公式设计比例约为1/5的缩比模型。整体采用两心四柱式,长、宽、高分别为1.55、0.80、1.46 m,两柱上绕组并联;设计网侧绕组与阀侧绕组匝数比为510/160,网侧绕组在内侧,采用插入屏蔽绕组,阀侧绕组在外侧,采用螺旋绕组;匝数不变,线匝截面积按比例减小。网侧绕组按屏蔽方式分为A、B、C、D、E共5类绕组,靠近端部的A、B、C类屏蔽方式分别为2P3、2P2和2P1,例如2P3方式是指屏蔽线跨两个线饼、插入深度是3匝线圈。

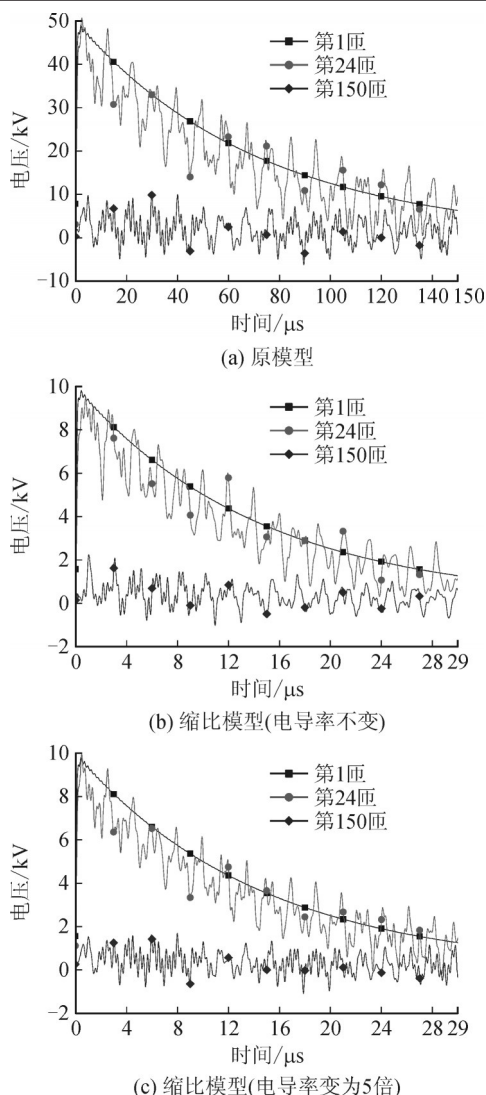


图4 原模型与缩比模型典型线匝的电压波形对比

Fig. 4 Voltage waveforms of typical coils in original model and reduced-scaled model

为进行故障模拟,在网侧绕组上设置9个引出线,可模拟匝间短路故障,见图5。各引出线位置见表1。各类绕组上均设置了引出线。可利用引出线直接短接模拟金属短路,连接球隙模拟不均匀电场的击穿,连接针板间隙模拟不均匀电场的击穿,获取不同故障情况下的试验数据进行分析。



图5 内部引出线结构

Fig. 5 Internal structure of the outgoing lines

表1 各引出线设置位置

Table 1 The set position of nine outgoing lines

引出线 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
对应线圈	4	5	12	37	44	69	76	103	114
线圈类型	A类	A类	A类	B类	B类	C类	C类	D类	D类

利用缩比模型进行雷电冲击电压下绕组电压分布的测量,根据缩比公式,冲击波形选择为 $0.24/10\ \mu\text{s}$,分别测得各引出线上的电压波形见图6。从3号引出线,即第12匝线圈上的波形就与首端波形有较明显的差异,其波前时间更长,幅值明显降低;4号引出线的电压波形更为明显,其到峰值时间约为 $2.7\ \mu\text{s}$,约为首端电压的10倍,而且波形幅值也不再是单调下降,而是马鞍形;到了5-9号引出线这种变化更加明显,这是由于在雷电冲击电压作用下,绕组的初始电压分布与最终电压分布的差异较大而产生的振荡。8、9号引出线在100多匝处,波形的初始阶段就有振荡产生,而靠前的1-3号引出线并没有这种振荡,4-7号引出线的对应处电压波形也有波动,分析是由于引出线结构所致,由图5的绕组结构可知,引出线是穿过纸筒然后引到变压器的上面板,必然会穿过上层的线圈,当雷电冲击波作用到上层线圈的时候,就通过耦合感应到了引出线上,所以会在引出线上感应出电压,图6中发生振荡和扰动的时间与1号引出线电压峰值振荡的时间基本吻合,因此引出线也会对绕组的网络电气特性有一定影响,需进一步分析。

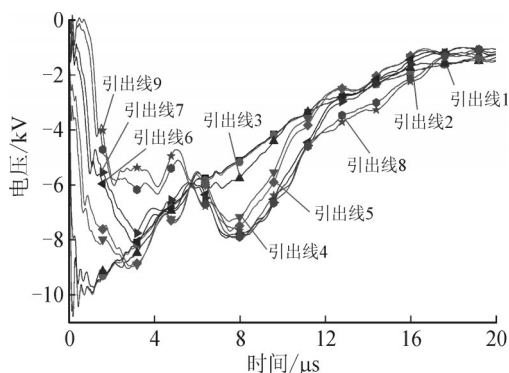


图6 引出线上的电压波形

Fig. 6 Voltage waveforms of outgoing lines

5 结论

推导了雷电冲击下换流变压器缩比公式,对原模型和缩比模型的电气特性进行了仿真对比,设计制作了缩比模型进行了雷电冲击下绕组电压分布的测量,得到主要结论如下:

1)按照缩比公式设计缩比模型,变压器绕组的

电场与磁场分布与原模型基本相同,雷电冲击下绕组波过程与原模型的误差在5%以内,验证了缩比公式的有效性。

2)若原模型和缩比模型导体采用相同电导率,其电磁场分布和绕组在雷电冲击下的分布电压波形与原模型有一定差异,实际制造过程中可能使用相同的材料参数,对此造成的偏差需要进一步研究,提出修正方法。

3)设计制作的缩比模型可利用引出线模拟多种绕组故障情况,可用于故障特征分析,并可与仿真模型进行对比分析,有利于故障诊断方法的研究,但测量结果表明由于引出线的设置,绕组电气特性与原模型会有一定差异,需要进一步研究修正方法。

参考文献:

- [1] SMAJIC J, STEINMETZ T, RUEGG M, et al. Simulation and measurement of lightning-impulse voltage distributions over transformer windings[J]. IEEE Transactions on Magnet-ics, 2014, 50(2):604.
- [2] PENG Y, RUAN J. Investigation of very fast transient over-voltage distribution in taper winding of tesla transformer[J], IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(3): 434-441.
- [3] 孙翔, 何文林, 邱伟, 等. 基于扫频阻抗法的变压器匝间短路故障检测[J]. 高压电器, 2016, 52(3):29-33.
SUN Xiang, HE Wenlin, QIU Wei, et al. Detection of short circuit fault between transformer windings based on sweep frequency impedance method[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3):28-33.
- [4] 杨钰, 王赞基, 邵冲. 电力变压器的宽频带建模及阻抗分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 42(12):3955-3963.
YANG Yu, WANG Zanj, SHAO Chong. Modeling of power transformer in wide frequency range and analysis of the impedance characteristic[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 42(12): 3955-3963.
- [5] 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. Optimazation and analysis on the key insulation structure of 500 kV radial split transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 137-141.
- [6] 邹国平, 何文林, 董雪松, 等. 一起变压器近区短路冲击的诊断与分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12):95-98.
ZOU Guoping, HE Wenlin, DONG Xuesong, et al. Detec-tion of short circuit fault between transformer windings based on sweep frequency impedance method[J]. High Volt-age Apparatus, 2013, 49(12): 95-98.
- [7] 唐岩, 马山刚. 层式变压器绕组中特快速暂态过电压的仿真分析[J]. 变压器, 2017, 54(1):12-16.
TANG Yan, MA Shangang. Simulation analysis of VFTO in layer-type winding of transformer[J]. Transformer, 2017, 54(1):12-16.

- [8] 杨庆, 陈勇, 司马文霞, 等. 基于变压器缩比模型的绕组冲击电压分布[J]. 高电压技术, 2016, 42(12):3955-3963.
YANG Qing, CHEN Yong, SIMA Wenxia, et al. Winding impulse voltage distribution based on transformer reduced-scale model[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3955-3963.
- [9] SMAJIC J, STEINMETZ T, RUEGG M, et al. Simulation and measurement of lightning-impulse voltage distributions over transformer windings[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 553-556.
- [10] 郑一鸣, 王赞基. 特高压变压器典型分区绝缘结构线圈内匝间电压振荡特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3933-3941.
ZHENG Yiming, WANG Zhanji. Characteristics of inter-turn voltage oscillation in typical graded insulation windings of ultra-high voltage transformers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12):3933-3941.
- [11] 李健, 李岩, 孙昕, 等. 变压器绕组短路试验模型的计算与分析[J]. 高压电器, 2012, 48(3):31-35.
LI Jian, LI Yan, SUN Xin, et al. Calculation and analysis of short-circuit test model of internal winding in transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 28-33.
- [12] 倪鹤立, 王同磊, 袁炜雄, 等. 应用耦合电容传感器的变压器类绕组暂态电压非接触式测量方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3930-3937.
NI Heli, WANG Tonglei, YUAN Weixiong, et al. Non-contact measurement of transient voltage in transformer type windings with coupling capacitive sensors[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3930-3937.
- [13] 谢齐家, 李金亮, 汪涛, 等. 800 kV 换流变压器缩比模型波过程研究[J]. 变压器, 2016, 53(2):12-16.
XIE Qijia, LI Jinliang, WANG Tao, et al. Research on wave process for 800 kV converter transformer scale model[J]. Transformer, 2016, 53(2):12-16.
- [14] SEBO S A, CALDECOTT R, KASTEN D G. Model study of HVDC electric field effects[J]. IEEE Transactions on Power Engineering Review, 1982, PER-2(6):57-58.
- [15] LINAN R, PONCE D, BETANCOURT E, et al. Optimized models for overload monitoring of power transformers in real time moisture migration model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6):1977-1983.
- [16] 王慧娟. 高压直流换流站阀体电磁辐射建模及实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
WANG Huijuan. Research on electromagnetic radiation of HVDC converter station valve tower by modeling and experiments[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [17] 宫攀. 基于缩比实验法的空心电抗器空间磁场研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
GONG Pan. Study of magnetic field of air-core reactors using small-scale experimental technique[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [18] BIONDI T, SCUDERI A, RAGONESE E, et al. Analysis and modeling of layout scaling in silicon integrated stacked transformers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(5): 2203-2210.
- [19] TAKAMI J, TSUBOI T, YAMAMOTO K, et al. Lightning surge characteristics on inclined incoming line to substation based on reduced-scale model experiment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 739-746.
- [20] TSUBOI T, UETA G, OKABE S, et al. Insulation breakdown characteristics of UHV-class oil-immersed transformer for lightning impulse withstand voltage test waveform - K-factor value and front time related characteristics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 2049-2058.
- [21] ZAKRZEWSKI K, TOMCZUK B A, WAINDOK A. Non-linear scaled models in 3D calculation of transformer magnetic circuits[J]. COMPEL—International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2006, 25(1): 91-101.
- [22] BRUBAKER M A, LINDGREN S R, FRIMPONG G K, et al. Streaming electrification measurements in a 1/4-scale transformer model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3):978-985.
- [23] 李光范, 赵志刚. 特高压自耦变压器绕组间主绝缘间隙上的工频/雷电冲击叠加过电压[J]. 电网技术, 2007, 31(s2):1-2.
LI Guangfan, ZHAO Zhigang. Main-gap voltage of UHV auto-transformer under AC/impulse superposed voltage[J]. Power System Technology, 2007, 31(s2): 1-2.
- [24] 汪涛, 谢齐家, 张亚东, 等. 基于相似理论的电力变压器缩比关系研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(6):76-80.
WANG Tao, XIE Qijia, ZHANG Yadong, et al. Research on scaling relationship of power transformer based on similarity theory[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(6):76-80.

普子恒(1987—),男,讲师,博士,主要研究方向为高压电器设备绝缘试验技术、间隙放电机理。

刘路(1994—),男,工学硕士,主要研究方向为高电压与绝缘技术。

(上接第95页)

放电定位实验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11):2711-2716.

XIE Qing, LYU Fangcheng, ZHEN Shusheng, et al. PD locating experimental analysis in oil using ultrasonic phased array[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2711-2716.

高超飞(1986—),男,博士研究生,研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。

宋树(1991—),男,硕士研究生,主要从事电气设备在线监测与故障诊断。