

[变压器]

基于辐向稳定性计算的变压器绕组抗短路能力研究

文/付佳宇 陶蕾 朱军

中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司

通过构建数学模型来分析不同短路电流参数对于变压器绕组辐向稳定性的影响。实验结果证明,在短路电流为8 000 A情况下,累积5次后的绕组形变量超过2 mm,形变曲线偏离直线,材料已经逐渐硬化。变压器中的撑条数量和撑条宽度同样会对变压器的辐向稳定性产生影响,当撑条个数为17个,撑条宽度为15 mm时,绕组的形变达到8.43 mm。此时进一步降低撑条宽度,则绕组会出现失稳状态。对变压器的失稳荷载进行分析,实验结果证明,在变压器受到7次短路冲击后,绕组累积形变约为2.0 mm,而使变压器绕组的失稳临界荷载约为133.2 MPa,与短路前相比,失稳荷载下降约34%。多次短路造成的形变累积,会严重破坏绕组的稳定性,因此在变压器的设计中需要充分考虑短路冲击的作用效果。

根据国家电网的统计数据,电力系统中用于输电的变压器容量远远超过发电设备的容量,是其容量的6~8倍^[1]。电网需要的增加和电压等级的攀升,使得变压器的单台容量逐年上升,进而也使得变压器的故障发生率逐年升高,其中最常见的故障为变压器的短路故障^[2]。变压器抗短路能力一直是大容量变压器设计的关键,抗短路能力不足将导致变压器绕组失稳,因此定量计算绕组短路强度与稳定性就具有重要意义。

在国家电网公开的事故报告分析中,变压器短路故障占据总故障的40%以上^[3]。发生短路故障的原因多种多样,主要包括抗短路强度、材料工艺和质量等不过关,而抗短路强度又是所有质量问题中的重中之重。据统计,变压器的容量越大,其发生短路故障的概率也越大。许多专家学者针对变压器的抗短路问题展开研究,通过理论实践和数据仿真的方式,分析不同因素对于变压器稳定性的影响,但是依然没有形成完善的抗短路理论。

R. Guimarães等^[4]对变压器失稳问题展开研究,利用三维仿真的方式,对绕组的受力进行分析,通过实验对其研究进行验证。刘晓丽等^[5]通过有限元分析的方式,建立变压器漏磁数学模型,并在短路实验方面进行适用性验证,证明变压器的稳定性与振动之间的关联性。

国内外这些关于变压器短路方面的研究,大部分是考虑短时间内一次短路造成的变压器影响,未能考虑多次冲击情况下的变压器承受情况。本文针对多次短路情况下变压器短路强度与稳定性的问题展开研究,综合考虑基于辐向稳定性计算的变压器绕组抗短路能力研究,分析不同因素对于抗短路能力的影响,并通过理论和试验两个方面对其加以验证。

变压器抗短路模型

1. 变压器短路形式

变压器根据短路的形式可以分为单相短路、两相短路以及三相短路;同样可以根据冲击工况的情

况，将其划分为单次短路和多次短路；根据损坏形式的不同，可以将其分为轴向、辐向、弯曲和扭转等多种失稳形态^[6]。其中对变压器危害最大的短路形式为三相对称短路。

由于三相变压器的漏磁通路是对称的，任选其中一相作为研究对象。可以得到二次侧短路时，一次侧电压的表示式为

$$u_1 = U_m \sin(\omega t + \alpha) = L_d \frac{di_1}{dt} + i_1 r_d \quad (1)$$

式中， α 为电压初相角； L_d 为变压器的漏感系数； r_d 为一次侧等效电阻。

可以得到短路电流的解为

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{2} I_d [\cos \alpha e^{-r_d t / L_d} - \cos(\omega t + \alpha)] \\ &= i_1 + i_2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中， i_1 和 i_2 分别代表电流中的暂态分量和稳态分量。

进而可以获得最大短路电流为

$$i_{dm} = \sqrt{2} I_d (e^{-r_d t / L_d} + 1) \quad (3)$$

多次短路冲击可以分为长间隔的多次冲击以及短间隔的多次冲击，短间隔的冲击一般发生在重合闸的工况下，此时由于磁通量的剧烈变化，给变压器的短路电流带来剧烈影响。

变压器的辐向失稳一般是由于受到两部分荷载的共同作用而产生，通常是由扭转力和辐向力共同作用的结果，辐向失稳主要包括辐向的自由翘曲和辐向强制翘曲。

2. 变压器电磁场

变压器的一次绕组建立电磁场，而二次绕组则会由于受到电磁感应而产生电流，方向与一次绕组中的电流相反^[7]。

根据右手定则分析，一次绕组会受到向外侧的拉力作用，使其表现出向外扩张的倾向，而二次绕组受到的作用力方向相反，表现为向内压缩的作用力倾向。如果绕组上受到的电磁力足够大，则会使得绕组由于抗短路能力的不足而产生失稳现象，甚至导线断裂。

变压器短路瞬间，变压器一二次侧绕组的电流都急剧增大，同时漏磁场显著增强，由于一二次绕组在短路过程中出现形变，使得空间中的磁场受到影响而发生变化，进而造成绕组磁场随绕组位置形变而变化的效果^[8]。

3. 电磁场计算

变压器中，磁场是连接一二次绕组的桥梁^[9]。二次绕组中产生的感应电流受一次绕组的磁场分布影响，而二次绕组中感生电流的磁场，同样会对一次绕组的磁场分布产生作用。二者的相互作用最终决定绕组上的电磁力分布和大小。

由于变压器绕组上的线圈绕制具有固定的形式，因此可以假设一次绕组的线圈匝数为 n ，利用近似原理，将其近似为 n 个并排的同轴导电线圈。此时空间磁场的形状具有轴对称性，从而根据导电线圈的形状建立空间上的柱坐标系，假设中心轴的方向为 z 轴方向，线圈中的电流方向为 dl 方向，结果如图1所示。

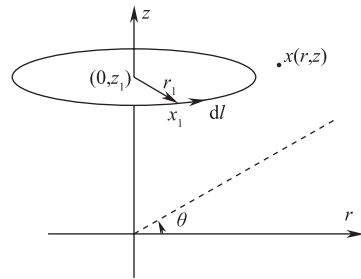


图1 电磁场计算模型

由毕奥萨伐定律可知，对于圆心位置为点 $(0, z_1)$ ，半径为 r_1 的空间导电线圈来说，其线元 dl 对于空间中任一点的磁场 dB 可以表示为

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \times r(x_1, x)}{4\pi I r(x_1, x)^3} \quad (4)$$

式中， $x(r, z)$ 点为空间中的任一点； μ_0 为真空磁导率； $x_1(r_1, z_1)$ 为导电线圈上任一点； x_1 点至 x 点的空间矢量可以表示为 $r(x_1, x)$ ； I 为导电线圈中的电流。

矢量 $r(x_1, x)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} r(x_1, x) &= r(x) - r(x_1) \\ &= (r - r_1 \cos \theta, -r_1 \sin \theta, z - z_1) \end{aligned} \quad (5)$$

线元 dl 可以表示为

$$dl = (-r_1 \sin \theta d\theta, r_1 \cos \theta d\theta, 0) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以得到

$$\begin{aligned} dl \times r(x_1, x) &= \begin{vmatrix} i & j & k \\ -r_1 \sin \theta d\theta & r_1 \cos \theta d\theta & 0 \\ r - r_1 \cos \theta & -r_1 \sin \theta & z - z_1 \end{vmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} r_1 \cos \theta (z - z_1) i + r_1 \sin \theta (z - z_1) j \\ + (r_1^2 - r_1 r \cos \theta) k \end{bmatrix} d\theta \end{aligned} \quad (7)$$

对式(4)进行积分,可以得到

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_1^2 \cos\theta (z - z_1) i + r_1^2 \sin\theta (z - z_1) j + (r_1^2 - r_1 r \cos\theta) k}{[r^2 - 2r_1 r \cos\theta + r_1^2 + (z - z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} d\theta \quad (8)$$

为了便于磁场分析和数学计算,可以将式(8)中的磁场分成轴向分量 B_z 和径向分量 B_r 两个部分,表示为

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{(r_1^2 - r_1 r \cos\theta)}{[r^2 - 2r_1 r \cos\theta + r_1^2 + (z - z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} d\theta \quad (9)$$

$$B_r = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{(z - z_1)}{[r^2 - 2r_1 r \cos\theta + r_1^2 + (z - z_1)^2]^{\frac{3}{2}}} d\theta \quad (10)$$

将式(3)中的最大短路电流代入,即可获得磁场分布情况。

将一次绕组产生的磁场分布情况等效为 n 个独立的导电线圈产生的磁场叠加,可以获得空间任一点的磁场分布情况。对二次绕组可以利用同样的计算方法进行处理,并与一次绕组的磁场结合,获得空间任一点的总磁场叠加情况^[10]。

4. 受力情况

在变压器绕组中磁场分布固定的情况下,可以对模型受到的磁力作用进行分析。在电磁场的作用下,内外绕组均会受到电磁力的作用,用于克服绕组自身的应力作用,使得内侧绕组的电磁力作用表现为绕组的压缩趋势,而外侧绕组的电磁力是向外的拉伸趋势^[11]。

为了分析方便,假设绕组结构及其电磁分布呈现严格轴对称,使得电磁力与绕组自身的应力在绕组上为均匀分布。在绕组的中部,由于电磁力的相互作用,其受到的轴向电磁力互相抵消,绕组受到作用力只有辐向电磁力。对于绕组的两端,受到轴向电磁力的作用,越向两端靠近,受到的电磁力越大。

对外侧绕组中的一根导电线圈为例,对其在短路情况下的受力情况展开分析。由于短路过程中的作用时间很短,第一个短路电磁力峰值在短路后20 ms以内。这种瞬时的形变对于材料塑性要求很高,使得线匝材料的延展性提高。短路力卸载后,线圈上残留较大形变量,而应力残留较小。

瞬时的短路作用对线匝形成严重的形变,因

此需要在分析短路作用机制时,着重考虑线匝的短路电磁冲击对于绕组的影响和对稳定性的冲击效果。

电磁力在单匝线圈上作用后的加速度表示为

$$a_M = \frac{F_m}{m_r} = \frac{B_d Idl}{\rho_j S_j dl} = \frac{B_d I}{\rho_j S_j} \quad (11)$$

式中, F_m 为线圈短路后受到的作用电磁力; m_r 为对应线圈质量; B_d 为线圈受到的磁感应强度; I 为线圈产生感应电流; ρ_j 为线圈材料的密度; S_j 为线圈截面积; dl 为线圈线元。

对于二次绕组侧产生的辐向拉伸力,可以根据能量守恒,通过能量的方式来计算。二次绕组中含有的磁场能量 W_c 表示为

$$W_c = \frac{1}{2} L_j I^2 \quad (12)$$

式中, L_j 为二次绕组中的自感强度。

此时,产生的能量加速度可以表示为

$$a_L = \frac{dW_c}{dr} = \frac{1}{2} \frac{dL_j}{dr} I^2 \quad (13)$$

假设线匝在扩展过程中的密度不随温度变化,其体积也不发生变化,在计算其形变时,忽略自身周向力外的所有作用力,单位体积上线匝受到的应力为

$$F_1 = -f_1 dz dr d\theta \sin\alpha = -f_1 \frac{rdz dr d\theta}{\sqrt{r^2 + z_1^2}} \quad (14)$$

式中, f_1 为体积单元受到的两侧应力大小,而体积单元的质量 m_d 可以表示为

$$m_d = \rho_j r d\theta dz dr \quad (15)$$

此时,周向应力对应的加速度可以表示为

$$a_1 = \frac{F_1}{m_d} = -\frac{f_1}{\rho_j \sqrt{r^2 + z_1^2}} \quad (16)$$

外绕组线匝在形变中受到的总加速度为

$$a_r = a_M + a_L + a_1 = \frac{B_d I}{\rho_j S_j} + \frac{1}{2} \frac{dL_j}{dr} I^2 - \frac{f_1}{\rho_j \sqrt{r^2 + z_1^2}} \quad (17)$$

内绕组线匝的加速度可以通过同样的方法求得。

假设绕组体积不变,则形变过程中线匝的应变 ε ,存在

$$d\varepsilon = \frac{2\pi dr}{2\pi r} = \frac{dr}{r} \quad (18)$$

积分后可得

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_0^r \frac{dr}{r} = \ln \frac{r}{r_0} \quad (19)$$

线匝的位移平衡方程可以描述为

$$\rho \frac{\partial u_s}{\partial t^2} - \Delta \sigma = F_v \quad (20)$$

式中, ρ 为线圈导线密度; σ 为受到的流动应力; u_s 为位移矢量; F_v 为单位体积线圈受到的短路电磁作用力。

5. 绕组辐向稳定性计算模型

内撑条是维持变压器绕组稳定的关键因素, 若将绕组内侧的撑条等效为弹簧的话, 则关于绕组的辐向稳定性跨行业看作为弹性梁, 利用弹性梁模型对其加以等效, 如图2所示。

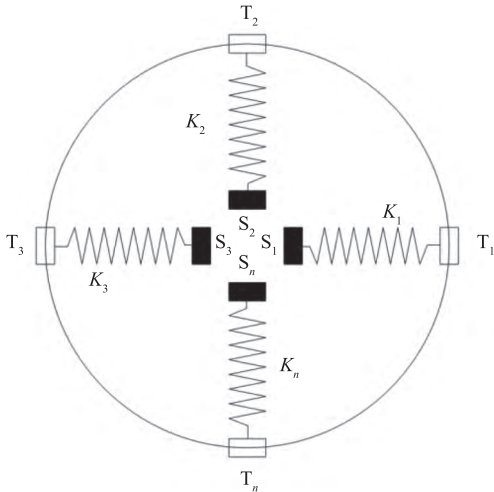


图2 弹性梁模型

设线圈绕组共存在 n 根撑条, 撑条的约束节点 $S_1 \sim S_n$ 为变压器中的固定节点, 并利用 $K_1 \sim K_n$ 来表示对应撑条的弹性吸收, $T_1 \sim T_n$ 为线匝位置上的节点, 用于支撑线匝的稳定, 使其只能在辐向产生位移。

撑条的平衡方程可以表示为

$$K_0 u + (\partial U_n / \partial u) - Q = 0 \quad (21)$$

式中, u 为对应节点的位移矢量; K_0 为刚度矩阵; U_n 为弹性系数应变能的非线性项之和; Q 为节点载荷矢量。

撑条的总势能 Π 可以表示为

$$\Pi = U - Q^T u = U_L + U_n - Q^T u \quad (22)$$

式中, U_L 为弹性系数应变能的线性项之和。

该结果能否稳定与总势能的二阶变分息息相关, 总势能二阶变分的表示式为

$$\delta^2 \Pi = \delta u^T (K_0 + K_1 + K_2) \delta u = \delta u^T K \delta u \quad (23)$$

式中, K_1 为初始应力刚度矩阵; K_2 为位移矩阵。

若式(20)结果 >0 , 则该结构为稳定结构; 若其 <0 , 则结构处于不稳定状态, 若其 $=0$, 则需要进一步计算器高阶变分情况。

绕组受到的短路强度可以通过式(24)进行求解^[15]

$$\left(K + \frac{G_t}{3} \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_{k_i}} + G_t \frac{\partial u_i}{\partial x_{j_j}} + F_r = 2G_t \frac{\partial (\omega e_{ij})}{\partial x_j} \quad (24)$$

式中, G_t 为绕组系统的剪切弹性模量; K 为对应体积模量; ω 是一个函数, 与等效塑性应变有关, 在系统为弹性状态时取0。

实验结果与数据分析

1. 绕组强度结果

利用前文的计算模型, 对变压器的绕组进行仿真计算, 并利用实验模型对计算结果进行验证。目标变压器型号为 ODFPS-250000/500, 总容量 250 MV·A, 对其中压绕组进行建模, 线规和结构尺寸均与该变压器相同。

对变压器分别加载不同数值的短路电流冲击, 依次为4 000 A, 5 000 A, 6 000 A, 7 000 A和8 000 A, 每次计算后, 数据清零。设定短路的间隔时间够长, 绕组内不存在剩磁。

将位移传感器置于绕组内侧, 用于测量辐向最大位移。设定绕组的初始内径为基准, 绕组压缩时的基准位移为负方向, 反为正方向。波形幅值变化情况见表1。

表1 波形幅值变化情况

电流/A	波谷/mm	波峰/mm	基线位移/mm
4 000	-0.332	+0.254	0
5 000	-0.643	+0.104	-0.523
6 000	-1.438	+0.985	-0.769
7 000	-2.042	-0.521	-1.083
8 000	-2.671	-0.643	-1.164

从表1中可以看到, 当短路电流4 000 A输入时, 整个绕组并没有累积的形变, 短路电流为5 000 A

时，绕组出现压缩形变，产生残余形变量为0.523 mm，8 000 A冲击时，绕组中积累的形变为1.164 mm。

数值计算结果中的积累形变分别为0 mm、0.54 mm、0.84 mm、1.10 mm和1.16 mm，计算结果与实验结果对比如图3所示。

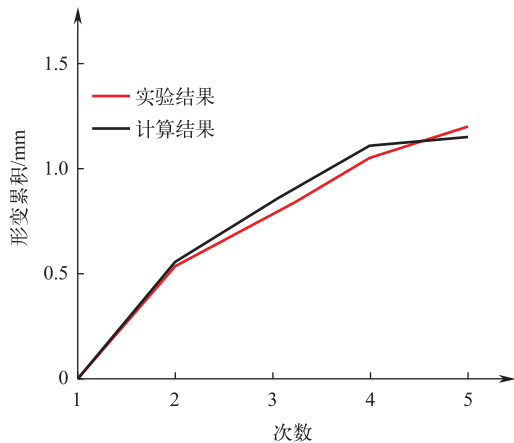


图3 实验与计算结果

图3中可以看到，通过计算获得数据与实验测试结果存在一定差距，两者相差并不大，属于可以接受的范围之内，可以认为模型计算结果是有效的。而且绕组中积累的形变并不是线性变化的，其形变增长的规律与材料塑性形变类似。

2. 短路电流对辐向强度的影响

为了考虑和分析短路电流对于变压器绕组的影响。设置变压器短路方案的短路周期为0.04 s，峰值维持时间为0.004 s，K值为短路电流的峰值。设定变压器短路方案如图4所示。

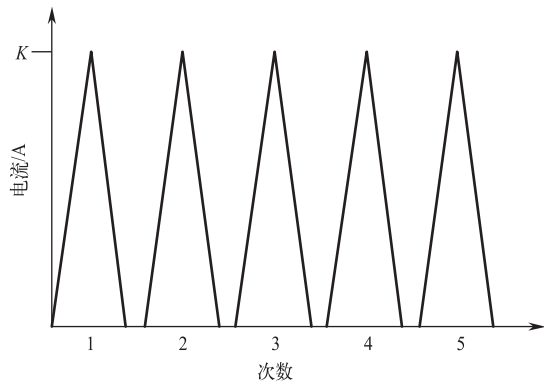


图4 变压器短路方案

该方案的计算结果如图5所示。

图5中可以看到，对于峰值短路电流为4 000 A的情况时，绕组的残余形变累积量为0 mm。而在

电流逐渐增大的情况下，绕组中的形变累积逐渐增多，且形变累积量随着短路电流的增大而显著增大。累积5次后，8 000 A情况下的形变累积量超过2 mm，且形变曲线也偏离直线，说明此时材料已经逐渐硬化，形变增加量减少。

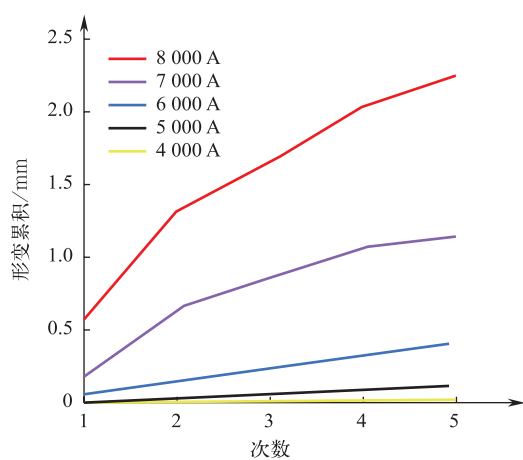


图5 不同电流下累积形变

3. 撑条对辐向强度的影响

讨论撑条对于绕组辐向形变的影响，设定绕组中撑条个数在15~35个范围中，撑条的宽度范围为8~20 mm，对其施加4 MPa的荷载，计算该绕组的形变量情况，结果见表2。

表2 4 MPa荷载下绕组形变情况（单位：mm）

撑条个数	撑条宽度				
	20	17	14	11	8
35	0.13	0.14	0.15	0.17	0.19
30	0.20	0.21	0.23	0.25	0.28
25	0.45	0.48	0.53	0.60	0.67
20	2.51	3.21	4.56	7.21	-
15	5.85	8.43	-	-	-

从表2中可以看出，在具有相同的撑条个数下，撑条宽度越窄，绕组的形变越大，增长趋势呈线性变化。而在相同宽度的撑条情况下，随着撑条数量的减少，绕组的形变也逐渐增加。

当撑条个数为17时，绕组形变进一步增大，减少撑条宽度至15 mm时，绕组的形变为8.43 mm，此时进一步降低撑条宽度，绕组出现失稳状态。

4. 辐向稳定性

利用有限元法建立变压器模型，分析变压器中的绕组在三相对称短路时的形变情况，并分析多次短路时的绕组稳定性。设定变压器短路阻抗分别

为：高压-中压为10.05%；高压-低压为16.88%；中压-低压为7.23%。

分别模拟短路在1次、3次、5次和7次时绕组累积形变量，以及其失稳状态下临界荷载，结果如图6所示。

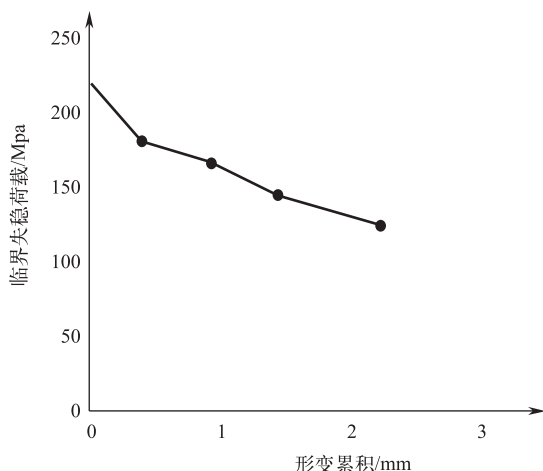


图6 绕组临界失稳荷载

对于7次短路情况下的累积形变约为2.0 mm，而使变压器绕组的失稳临界荷载约为133.2 MPa，与短路前相比，失稳荷载下降约34%。证明多次短路造成的形变累积，会严重破坏绕组的稳定性。

计算结果表明，多次短路情况下，绕组的失稳荷载急剧减少，绕组逐渐变得不再稳定，在变压器的设计中需要预留足够的裕度，保证变压器在发生多次短路故障后依然能够稳定运行。

结束语

本文研究了基于辐向稳定性的变压器绕组抗短路能力，构建其数学模型，分析短路电流参数对于变压器绕组辐向短路强度的影响。实验证明，由于巨大的短路电流冲击，变压器绕组线圈会发生明显的塑性形变，并随着短路次数的增加而叠加积累。而累积形变也会随着短路电流的大小而变化，但变压器的形变累积并不是线性的。本文同样讨论撑条宽度和数量对于变压器辐向强度的影响，实验结果证明变压器绕组的辐向强度随着撑条的宽度和数量的增多而增大。针对变压器绕组失稳荷载的分析中，本文证明随着变压器短路次数的增加，绕组辐向累积逐渐增加，使得绕组辐向失稳荷载逐渐降

低，7次冲击后，失稳荷载降低了34%，使得多次短路冲击后，变压器逐渐趋于失稳，因此在变压器的设计中需要充分考虑短路冲击的作用效果。EA

(收稿日期：2023-11-08)

参考文献

- [1] 张艳芳，徐宇．大型变压器短路冲击损坏原因与降低损坏风险措施探析[J]．内蒙古科技与经济，2022(4)：103-104+107．
- [2] 王文廷，陆建峰，吕仲成．变压器短路试验供电装置网侧电流平衡控制仿真[J]．制造业自动化，2022，44(2)：213-216．
- [3] 陈友鹏，陈璟华，何东升，等．基于蒙特卡洛模拟和综合评判法的配电变压器抗短路能力评估[J]．广东电力，2022，35(1)：60-69．
- [4] Guimarães R, Delaiba A C, Oliveira J C. Electromechanical forces in transformers caused by inrush currents: an analytical, numerical and experimental approach[J]. Journal of Control Automation & Electrical Systems, 2013, 24(6): 863-872.
- [5] 刘晓丽．电缆绕组变压器暂态漏磁场及短路强度的研究[D]．哈尔滨：哈尔滨理工大学，2008．
- [6] 邹德旭，钱国超，井永腾，等．变压器短路模型的绕组漏磁对比分析与试验研究[J]．变压器，2021，58(11)：49-54．
- [7] 漆伟．基于磁-力耦合场的单相电源变压器短路试验研究[J]．电工技术，2021(21)：132-135．
- [8] 吴东乐，孙胜然，刘群华，等．变压器用绝缘纸击穿强度的多因素协同影响研究[J]．绝缘材料，2020，53(10)：96-102．
- [9] 李中祥，谭黎军，易梅生，等．变压器绕组辐向稳定性计算方法比较与分析[J]．变压器，2018，55(11)：17-21．
- [10] 李小蓉，欧强，张晓斌，等．电力变压器真型模型突发短路试验研究与分析[J]．变压器，2018，55(9)：39-43．
- [11] 兰生，胡忠平，廖福旺，等．短路电动力对变压器低压绕组辐向稳定性的研究[J]．电机与控制学报，2018，22(5)：19-24．