

基于变压器磁—路—力数字模型的永久性短路故障下重合闸配置研究

王 谦¹, 任志刚¹, 滕景竹¹, 赵禹辰¹, 王 乐¹, 姚玉菲², 祝建昊², 滕福运², 姚嘉欣², 王 亮², 张子康², 汪鑫宇²
(1. 国网北京市电力公司电科院, 北京 100075; 2. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 为研究电力系统永久性短路故障重合闸失败造成二次冲击的系统故障问题, 文中搭建重合闸短路冲击电路数字模型, 计算并对比了一次短路电流和不同合闸角及剩磁作用下的二次短路电流。同时建立了变压器三维磁—路—力有限元仿真模型, 获得了漏磁场及电磁力数值分布。结果表明, 变压器在永久性短路故障重合闸后二次短路冲击电流会与剩磁激励产生的电流矢量叠加, 三相绕组最大短路电流和所受最大电磁力在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内先减小后增大, 在 90° 时达到最小值。并且同一次短路相比, 合闸角为 90° 时轴向电磁力减小 40.21%, 辐向减小 34.30%, 减小幅度最大, 据此给出了重合闸相关控制策略的建议, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 变压器短路故障; 重合闸; 剩磁; 短路冲击电流; 合闸角

Transformer Magnetic Field-circuit-force Digital Model During Reclosing and Configuration Study

WANG Qian¹, REN Zhigang¹, TENG Jingzhu¹, ZHAO Yuchen¹, WANG Le¹, YAO Yufei², ZHU Jianhao², TENG Fuyun², YAO Jiixin², WANG Liang², ZHANG Zikang², WANG Xinyu²

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute Hunan Power Grid Co., Ltd., Beijing 10007, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding, 071003, China)

Abstract: To study the system fault problem of secondary impact caused by permanent short-circuit fault reclosing failure, the reclosing short-circuit impulse circuit digital model is built, the primary short-circuit current and the secondary short-circuit current under different reclosing angles and remanence is calculated and compared. At the same time, a three-dimensional magnetic-circuit-force finite element simulation model of the transformer is established, and the numerical distribution of the leakage magnetic field and electromagnetic force is obtained. The results show that the secondary short-circuit impulse current of the transformer will be superimposed with the current vector generated by remanence excitation after the permanent short-circuit fault is reclosed. When reclosing angle range from 0 to 180° , the amplitude of impulse current decreases first and then increases, and reaches the minimum value at 90° . Compared with the primary short circuit, when the reclosing angle is 90° , the axial electromagnetic force is reduced by 40.21%, the radial direction is reduced by 34.30%, which is with the largest reduction than at other angles. Based on this, suggestions on the control strategy of reclosing are given, which have high engineering application value.

Key words: transformer short-circuit fault; reclosing; remanence; short-circuit impact current; reclosing angle

0 引言

据统计, 短路故障是引起变压器损坏的主要原因之一。随着电网的不断发展, 突发短路故障次数越多, 变压器受电流冲击的情况也就越多, 这对变压器抗短路能力提出更高的要求^[1-3]。因此开展变压器短路后重合闸过程的电流及磁场、电磁力计算对变压器抗短路能力有着重要的工程指导意义。

经典变压器短路冲击电流计算方法主要基于

Jiles-Atherton(J-A)磁致模型进行解析法求解。贾志斌根据 J-A 磁滞理论以及基于铁心材料特点建立相应磁滞模块, 经过对参数的合理调试设置和对实验数据的比对, 建立了单相变压器电磁暂态计算模型^[4]。刘清友等为了解决表达式不同导致建立的塑性变形磁化模型不准确而出现差异化问题, 对改进模型在 J-A 磁滞理论上进行了推导, 得到了短路冲击电流及磁场强度^[5]。王欢通过 B-H 曲线对绕组励磁涌流进行了计算, 获得了变压器空载合闸状态下

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGTYHT/21-JS-223)。

Project Support by Science and Technology Project of SGCC(SGTYHT/21-JS-223).

各相涌流分布规律^[6]。

在解析法的理论基础上，随着计算机计算能力及效率大幅提高，数值计算方法高速并行发展并被广泛应用。王雄博等考虑了变压器铁心非线性特性，对无励磁调压变压器进行不平衡安匝建模，求解了变压器不同分接下电磁场分布，该方法可应用于交错式、矩形等多种结构绕组类型^[7]。Ahn H M 等通过建立三维有限元模型，对其进行瞬态仿真计算分析，得到绕组漏磁场及短路力的变化规律^[8-9]。秦雪峰等针对不同调压绕组的布置方案，对有载调压变压器进行绕组短路力的计算，并研究单独调压及上、下并联结构变压器不同分接位置上电磁力分布规律^[10]。

上述的研究与分析主要讨论变压器突发短路工况时的绕组电气性能与机械性能。然而电力系统实际运行中，变压器在遭受初次短路后可实现自动重合闸动作，系统可能不能及时排除故障，变压器短时间内可能再次遭受短路电流的冲击，且在断路器断开时间内铁心内剩磁对二次短路冲击电流影响较大，实际上重合闸后短路冲击电流很有可能大于初次短路电流，因此针对变压器短路及重合闸过程必须考虑剩磁及合闸角的影响^[11-12]。

文中通过搭建变压器重合闸线路模型，模拟了突发永久性短路故障后重合闸工况，计算并对比了一次短路电流和不同合闸角及剩磁作用下的二次短路电流，同时建立了变压器磁—路—力有限元仿真模型，量化获得了改变合闸角对不同短路冲击的电磁力影响。文中研究对变压器短路重合闸配置策略提供了理论基础，具有一定的工程指导意义。

1 重合闸冲击电流计算

1.1 瞬态过程理论分析

变压器遭受突发短路时，继电保护动作以后断开断路器，经整定后进行重合闸。理想情况下，继电保护动作后故障切除随后重合闸成功，变压器重新投运，但在短路故障未及时切除时，变压器重合

闸后会再次遭受短路电流的冲击，且由于铁心的磁滞效应，分闸时剩磁无法短时间消失，因此合闸时剩磁会与激磁矢量叠加，导致二次短路冲击电流区别于初次短路冲击电流^[13]。

以三相短路故障重合闸后短路故障仍存在工况为例进行电流计算分析。变压器突发短路与重合闸过程均为 RL 串联电路电流状态响应问题，等效电路相同，且三相短路为对称短路，本节以 A 相为例进行分析，则其电流满足微分方程见式(1)^[14]

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

解得式(1)的通解为

$$i_a(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + Ce^{-t/T_a} \quad (2)$$

式(1)、(2)中： φ 为线路阻抗角； I_m 为稳态短路电流的幅值； C 为积分常数； T_a 为衰减时间常数。

1.2 重合闸过程电流计算模型搭建

文中基于某退役 110 kV 真型变压器搭建 Simulink 重合闸过程仿真模型，变压器结构参数见表 1。结构模型及磁滞回线分别见图 1、2。

表 1 变压器结构参数

Table 1 Transformer structural parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
变压器型号	SFSZ7-31500/110	$P_{k(1-2)}/\text{kW}$	147.0
额定电压/kV	110.0/38.5/10.5	$P_{k(3-1)}/\text{kW}$	143.5
额定容量/MVA	31.5/31.5/31.5	$P_{k(2-3)}/\text{kW}$	120.0
工作频率/Hz	50	$U_{k(1-2)}/\%$	10.03
空载损耗/kW	40 240	$U_{k(3-1)}/\%$	17.14
$I_0/\%$	0.9	$U_{k(2-3)}/\%$	6.67

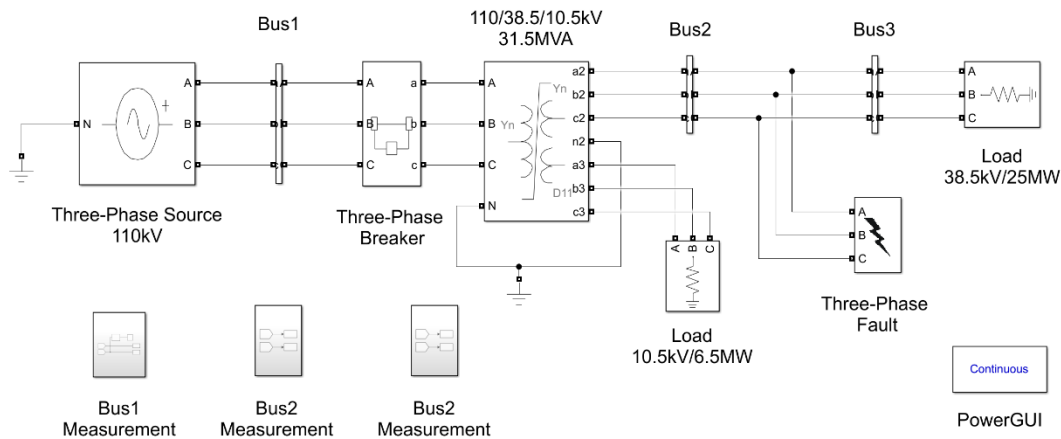


图 1 重合闸 Simulink 模型示意图

Fig. 1 Simulink connection diagram simulating the reclosing process

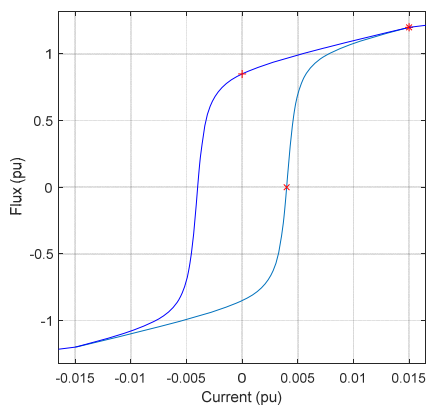


图 2 磁滞回线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hysteresis loop

重合闸过程的时间设置为: 0~0.1 s 变压器正常运行, 0.1 s 时刻在短路模块设置三相短路, 0.5~0.6 s 断路器跳闸切断电源, A 相分闸角为 0°, 期间故障未成功切除, 0.6s 断路器重合闸, A 相合闸角为 0°。全过程电流波形见图 3。

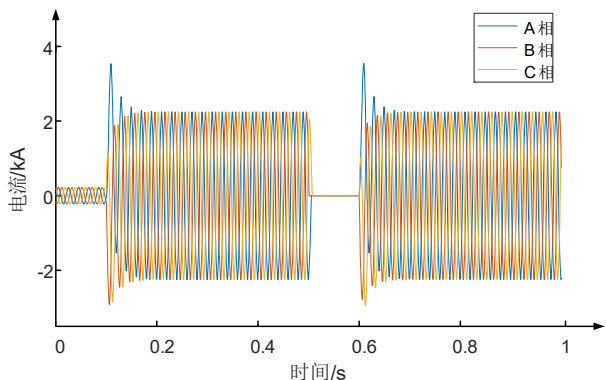


图 3 突发短路及重合闸过程电流波形

Fig. 3 Current waveform during sudden short-circuit and reclosing

如图 3 所示, 二次短路冲击电流在合闸后 0.01

s 达到幅值为 3 548 A, 略大于初次短路冲击电流 3 505 A, 这是由于在断路器分闸时铁心的磁滞效应, 剩磁无法短时间消失, 因此合闸时剩磁会与激磁矢量叠加, 当剩磁与激磁方向相同时, 二次短路冲击电流将大于初次短路冲击电流^[15]。

只改变故障类型, 其他设置不变, 对其他永久性短路故障工况的重合闸过程冲击电流进行计算分析, 不同短路工况下二次短路冲击电流幅值大小见表 2。

表 2 不同短路工况下二次短路电流幅值

Table 2 Secondary short-circuit current amplitude under different short-circuit conditions

工况	三相短路	两相相间短路	两相接地短路	单相接地短路
短路电流/A	3 548	3 022	3 543	3 493

通过比较表 2 中不同短路工况下二次短路冲击电流的大小可以得出, 三相短路工况下二次短路冲击电流最大, 因此后续研究仅讨论对短路电流最大的三相短路工况, 并分析重合闸相角对三相短路冲击电流的影响。

1.3 不同重合闸相角的三相短路电流分析

根据上文搭建的重合闸过程电流计算模型, 重合闸后冲击电流大小受剩磁影响较大, 且由于系统继电保护整定及动作时间不同, 不同合闸时间下合闸角也会有所区别。因此本节分别设置不同合闸角, 计算三相短路电流的大小。

对于绕组所属的 RL 电路而言, 电流不能突变, 重合闸瞬间电流满足式(3)^[16]

$$i_a(0) = I_{m|0|} \sin(\alpha - \varphi_{|0|}) \quad (3)$$

代入式(2), 解得积分常数 C

$$C = I_{m|0|} \sin(\alpha - \varphi_{|0|}) - I_m \sin(\alpha - \varphi) \quad (4)$$

则重合闸时电流响应可求解为

$$i_a(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \left[I_{m|0|} \sin(\alpha - \varphi_{|0|}) - I_m \sin(\alpha - \varphi) \right] e^{-t/T_a} \quad (5)$$

由于合闸前电流为 0, 即 $I_{m|0|}=0$, 而且短路回路中电抗远远大于电阻, 即 $\varphi=90^\circ$, $\varphi_{|0|}=90^\circ$, 则有

$$i_a(t) = -I_m \cos(\omega t + \alpha) + I_m \cos \alpha e^{-t/T_a} \quad (6)$$

调整合闸角计算获得各相短路电流见表 3。

表 3 不同合闸角下的三相短路冲击电流幅值

Table 3 Three - phase short circuit impulse current amplitude at different closing angles

项目	冲击电流/A				
	0°	45°	90°	135°	180°
A 相	初次		3 505		
	二次	3 548	3 114↓	2 418↓	3 181↓
B 相	初次		2 918		
	二次	2 779↓	2 692↓	3 379	3 502
C 相	初次		2 823		
	二次	2 944	3 499	3 351	2 381↓

由表 3 所示, 不同合闸角下各相的二次短路冲击电流幅值较一次会有不同程度的变化, 且由于三相的固定相位差, 同时段不同相的单调性有所不同, 也即至少有一相在剩磁作用下二次短路冲击电流幅值较一次有所下降。当合闸角为 0° 时, 各相绕组中最大二次冲击电流幅值为 3 548 A, 较其他合闸角时最大, 而当合闸角为 90° 时, 各相绕组中最大二次冲击电流幅值为 3 379 A, 较其他合闸角时最小。因此合理配置重合闸时间能够显著减小二次短路电流, 降低其对系统的冲击危害。

2 重合闸过程漏磁场及电磁力计算

2.1 变压器磁—路—力多物理场耦合模型

为量化不同合闸角对变压器绕组的冲击程度, 搭建变压器有限元电磁仿真模型进行电磁力计算。文中以某三相三柱式真型变压器为研究对象, 建立三维磁—路—力(磁场—电路场—固体力学)多物理

场耦合有限元仿真模型。为了便于研究, 对模型简化如下^[17-18]:

1) 夹件及拉板等结构件由于自身材料的导磁特性, 对漏磁场分布影响不大, 因此忽略绕组的支架、拉板、夹具等结构件;

2) 认为高中低压绕组线圈高度一致且线圈均匀分布, 绕组采用圆筒状实体结构。

该变压器的主要几何参数见表 4, 据此进行三维模型搭建, 见图 4。

表 4 变压器主要几何参数

Table 4 Main parameters of transformer

参数名称	数值	参数名称	数值
柱间中心距/mm	1 335.0	中压绕组内径/mm	435.0
铁心窗高/mm	1 670.0	中压绕组外径/mm	500.0
铁心直径/mm	600.0	高压绕组内径/mm	547.0
低压绕组内径/mm	331.0	高压绕组外径/mm	640.5
低压绕组外径/mm	396.0		

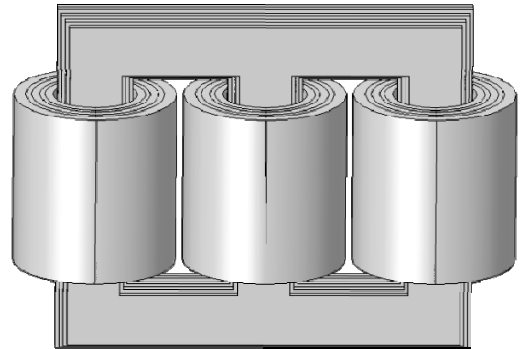


图 4 变压器几何模型

Fig. 4 Geometry structure of transformer

本模型中, 铁心材料为硅钢片, 由多层薄硅钢片叠加而成, 相较于整体拉伸而成的芯柱计算更为精确^[19]。绕组采用圆筒式均匀多匝分布, 材料为铜导线, 铁心及绕组外空气域在模型图中已进行隐藏处理。铁心及绕组的材料参数设置见表 5, 考虑到铁心的磁化饱和效应, 对铁心添加 $B-H$ 曲线, 见图 5。

表 5 材料属性

Table 5 Material properties

序号	部件名称	材料名称	相对磁导率	电导率 ($MS \cdot m^{-1}$)
1	铁心	硅钢片	$B/(\mu_0 H)$	2.00
2	绕组线圈	铜	1	57.14

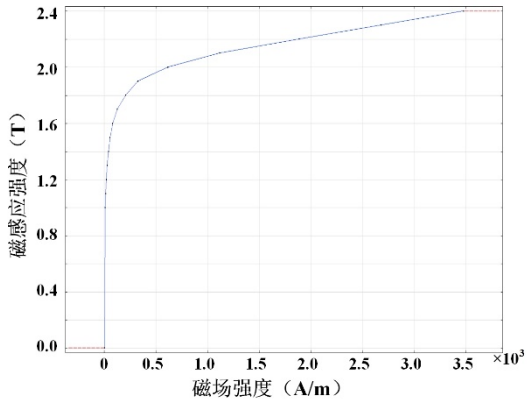


图 5 铁心 $B-H$ 曲线

Fig. 5 $B-H$ curve of iron core

为兼顾模型求解的精确性和高效性，对模型分区域剖分网格。绕组部分通过对端面进行三角形网格划分并沿轴向进行扫掠，形成如图 6 橙色区域；空道部分剖分方法同绕组一致，但由于空道较为狭窄，需调整网格大小以适应计算需要，如图 6 白色区域；铁心部分由于硅钢片厚度限制，必须采用更加细化的四面体网格，如图 6 灰色区域。

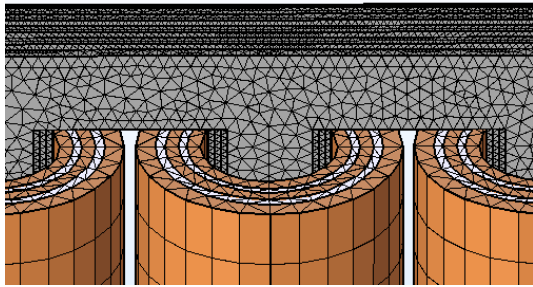


图 6 局部网格剖分图

Fig. 6 Local meshing diagram

计算变压器漏磁及电磁力的基本流程图见图 7，通过模拟电路计算得到重合闸冲击电流，作为激励输入磁-路-力三维有限元模型，进行耦合计算，得出漏磁及电磁力分布。

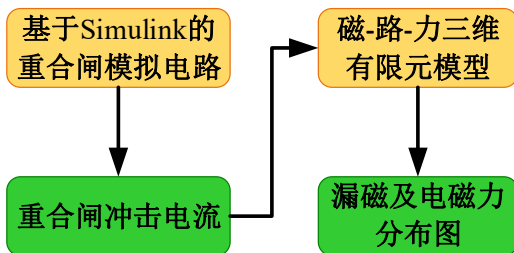


图 7 流程框图

Fig. 7 Flow block diagram

2.2 重合闸过程漏磁场及电磁力计算

短路电流通过线圈时，会在附近空间产生漏磁

场，为了研究变压器发生三相短路工况下的内部漏磁场分布，以 A 相电流为参考，经仿真计算，三相短路后 0.01 s 时刻，此时短路电流最大，绕组周围漏磁场及所受电磁力也最大，漏磁分布见图 8。

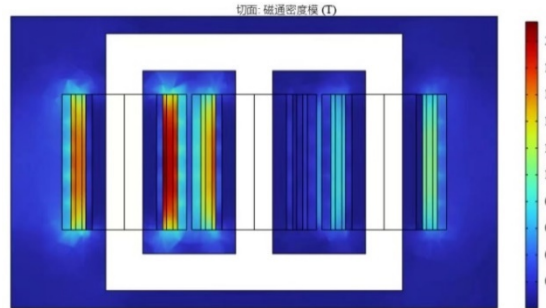


图 8 突发短路后 0.01s 漏磁分布

Fig. 8 Magnetic flux leakage distribution at 0.01s after sudden short circuit

由图 8 可看出，漏磁场磁通密度主要集中在 A 相空道内，空道中心的数值最大，达到 2 T。由于此时磁通分布为各项叠加所得模值，为方便分析，分别绘制轴向及辐向的漏磁分布图，见图 9、10。

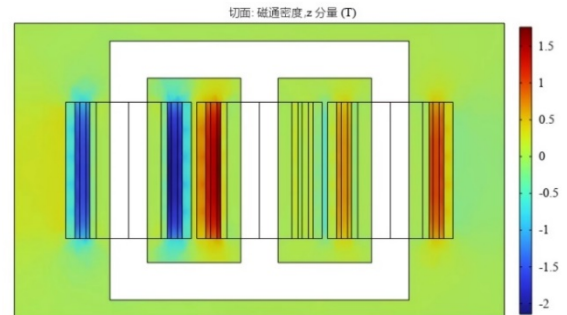


图 9 突发短路后 0.01 s 轴向漏磁分布

Fig. 9 Axial flux leakage distribution at 0.01 s after sudden short circuit

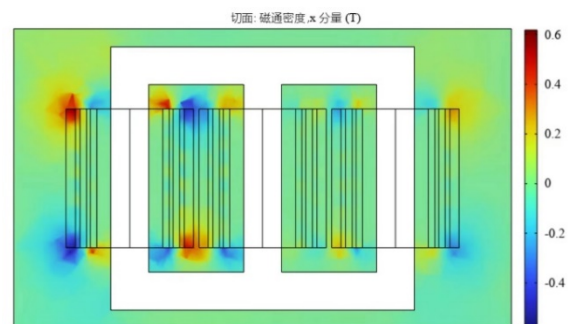


图 10 突发短路后 0.01s 辐向漏磁分布

Fig. 10 Radial flux leakage distribution at 0.01s after sudden short circuit

由图 9 仿真结果，轴向漏磁关于绕组中心高度

成轴对称分布，绕组端部轴向漏磁随着磁场方向的变化而减小，最大值在绕组中心位置。

突发短路后 0.01 s 辐向漏磁分布见图 10，各相辐向漏磁沿芯柱中心呈中心对称分布，绕组中部辐向磁感应强度为 0。

变压器短路工况时，绕组线圈会受到短路电磁力作用，为了便于讨论，文中取轴向和辐向两个方向进行分析。轴向电磁力由辐向漏磁和绕组短路电流两者的乘积决定^[20]，计算式为

$$F_z = B_r ILN \quad (7)$$

式(7)中： B_r 为辐向漏磁磁密； I 为导线中的电流； L 为导线的长度； N 为绕组的匝数。

初次短路时三相绕组所受轴向电磁力分布见图 11。

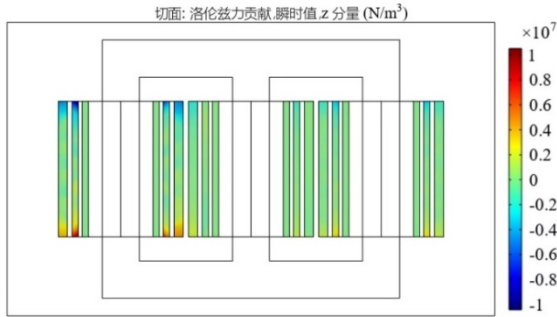


图 11 突发短路后 0.01s 轴向电磁力分布

Fig. 11 Axial electromagnetic force distribution at 0.01s after sudden short circuit

由于绕组中部辐向磁感应强度几乎为 0，故中部不会产生轴向电磁力，绕组端部产生的电磁力最大且方向相反，最大值为 $9.55 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ ，因此绕组依然会受到轴向电磁力的作用，出现轴向失稳故障。当轴向电磁力过大时，会导致绕组与结构件产生碰撞、摩擦，这种碰撞会造成导线匝绝缘破损^[21]，最终发生轴向失稳。

同理，辐向电磁力 F_r 计算式为

$$F_r = B_z ILN \quad (8)$$

式(8)中， B_z 为轴向漏磁磁密。

初次短路时三相绕组所受辐向电磁力分布见图 12。

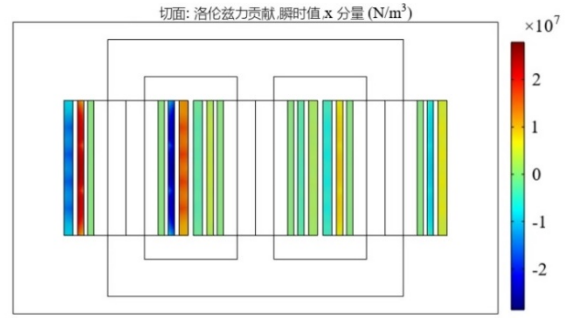


图 12 突发短路后 0.01s 辐向电磁力分布

Fig. 12 Radial electromagnetic force distribution at 0.01s after sudden short circuit

如图 12 所示，A 相中压绕组中部感应产生的辐向电磁力最大，数值达到 $2.77 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ ，上下部产生的电磁力关于绕组中心高度成轴对称分布，当所受短路辐向电磁力达到某一平均临界值时，线圈会产生辐向失稳，严重时会导致绕组的匝绝缘断裂，造成匝间短路。在轴向和辐向电磁力的共同作用下，垫块会出现收缩、移位现象，导线松动或倾斜^[22]，多次短路冲击会导致绝缘失效，最终造成严重运行事故。

2.3 不同合闸相角下漏磁场及电磁力计算

由 1.3 节对不同合闸角下二次短路冲击电流分析，进行不同重合闸相角下的漏磁场及电磁力计算，合闸后产生的最大电磁力见表 6。

表 6 不同合闸相角下三相绕组最大轴向、辐向电磁力

Table 6 Maximum axial and spoke electromagnetic force of three-phase winding under different closing phase angles

参数	0°	45°	90°	135°	180°
初次短路轴向电磁力/(MN·m ³)			9.55		
初次短路辐向电磁力/(MN·m ³)			27.70		
二次短路轴向电磁力/(MN·m ³)	9.57	7.04	5.71	7.11	9.53
二次短路辐向电磁力/(MN·m ³)	27.90	22.00	18.20	22.30	27.50

由表 6 可知，当合闸角为 0°时，绕组感应产生的轴向及辐向电磁力最大，此时二次短路冲击电流最大；当合闸角在 0°~90°变化时，轴向及辐向电磁力有减小趋势，且在 90°时产生的电磁力最小，在 90°~180°电磁力不断增大。

合闸相角为 45°或 135°时，轴向电磁力较初次短路时减小了 26.28%，辐向电磁力减小了 20.58%；合闸相角为 90°时，轴向电磁力较初次短路时减小

了 40.21%，辐向则减小了 34.30%。由前文知，当合闸相角为 45°和 90°时，与 0°相比，最大二次短路冲击电流分别降低了 49A 和 169A。即在相同时刻，最大轴向及辐向电磁力随着短路电流降低而减小，当短路电流激励逐步减小时，三相绕组所受最大电磁力也减小，90°合闸相角下各相绕组中最大短路冲击电流幅值最小，所受电磁力也最小。

3 结论

文中基于某三相三柱式真型变压器，建立了重合闸线路模型及磁—路—力多物理场耦合三维有限元仿真模型，并计算了永久性短路故障及重合闸过程中的电流，以及该过程下主磁通、漏磁场和电磁力的分布，同时计算了合闸相角对电磁力的影响，最终得出以下结论：

1) 变压器在永久性短路故障重合闸后二次短路冲击电流会与剩磁激励产生的电流矢量叠加。当电流相位为 0°分闸，合闸角为 0°时，三相绕组中二次短路冲击电流最大，为 3 548 A；合闸角为 90°时，三相绕组中二次短路冲击电流最小，为 3 379 A；

2) 合闸相角在 0°~180°变化时，三相最大短路冲击电流先降低再升高，三相绕组最大轴向、辐向电磁力也先减小后增大，0°合闸角时所受电磁力最大，90°合闸角时电磁力最小，即相同时刻，最大轴向及辐向电磁力随着二次短路电流降低而减小。

3) 合闸角在 0°~180°变化时，绕组所受电磁力先减小后增大。90°时电磁力最小，与一次短路相比轴向电磁力减小了 40.21%，辐向减小了 34.30%，减小幅度最大。因此，合理配置重合闸的相角，可使变压器受到的短路冲击影响有效减小。

参考文献：

[1] 张波, 张帆, 姚晖, 等. 一起连续近区短路导致的变压器内部故障分析及对策[J]. 变压器, 2020, 57(6): 81-84.
ZHANG Bo, ZHANG Fan, YAO Hui, et al. Analysis and countermeasure of transformer fault caused by continuous near-zone short circuit[J]. Transformer, 2020, 57(6): 81-84.

[2] 李金辉. 超高压电力变压器绕组短路电磁力的计算与分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
LI Jinhui. Calculation and analysis of short circuit electromagnetic force in EHV power transformer winding[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

[3] 张明丽. 大型变压器抗短路能力校核研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
ZHANG Mingli. Study on checking Anti short circuit capability of large transformer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[4] 贾智彬. 基于 J-A 磁滞理论的变压器谐波损耗研究[J]. 通信电源技术, 2016, 33(4): 42-44.
JIA Zhibin. Study on harmonic loss of transformer based on J-A hysteresis theory[J]. Telecom Power Technologies, 2016, 33(4): 42-44.

[5] 刘清友, 罗旭, 朱海燕, 等. 基于 Jiles-Atherton 理论的铁磁材料塑性变形磁化模型修正[J]. 物理学报, 2017, 66(10): 286-295.
LIU Qingyou, LUO Xu, ZHU Haiyan, et al. Modeling plastic deformation effect on the hysteresis loops of ferromagnetic materials based on modified Jiles-Atherton model[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10): 286-295.

[6] 王欢. 大型变压器多次短路工况下的电磁特性与绕组累积效应研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
WANG Huan. Research on electromagnetic characteristics and cumulative effect of large transformer windings under multiple short circuit conditions[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.

[7] 王雄博, 刘文里, 李祎春, 等. 电力变压器绕组漏磁场及涡流损耗的三维数值分析[J]. 黑龙江电力, 2016, 38(2): 169-173.
WANG Xiongbo, LIU Wenli, LI Yichun, et al. Three-dimensional numerical analysis of winding leakage magnetic field and eddy current losses in power transformer[J]. Heilongjiang Electric Power, 2016, 38(2): 169-173.

[8] AHN H M, KIM S Y, KIM J K, et al. Numerical investigation for transient electromagnetic force computation of power transformer during short-circuit condition[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 52(3): 1141-1149.

[9] PARK K H, AHN H M, HAHN S C. A study on calculation of short-circuit electromagnetic force in power transformer considering winding tap condition[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2019, 68(5): 625-633.

[10] 秦雪峰, 李中祥, 郭占泉, 等. 极限分接下调压绕组位置改变对短路力的影响[J]. 变压器, 2018, 55(2): 32-36.

- QIN Xuefeng, LI Zhongxiang, GUO Zhanquan, et al. Influence of short circuit force with change position of regulating winding on limit tap[J]. Transformer, 2018, 55(2): 32-36.
- [11]张 博. 多次短路冲击条件下的大型变压器绕组强度与稳定性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- ZHANG Bo. Study on strength and stability of large transformer windings under multiple short-circuit impacts[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [12]孙 昕. 短路与重合闸工况下大容量电力变压器绕组强度研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- SUN Xin. Study on winding strength of large capacity power transformer under short-circuit and coincidence smelting conditions[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [13]冉德东. 短路及重合闸工况下电力变压器电流与剩磁的仿真研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- RAN Dedong. Simulation study on current and remanence of power transformer under short circuit and reclosing conditions[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [14]方万良, 李建华, 王建学. 电力系统暂态分析[M]. 第4版. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- FANG Wanliang, LI Jianhua, WANG Jianxue. Power system transient analysis[M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [15]段重玺. 力变压器绕组故障下漏磁场及短路阻抗特性分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- DUAN Chongxi. Analysis on characteristics of leakage magnetic field and ShortCircuit impedance under power transformer winding fault[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [16]张俊辰. 变压器绕组漏磁场和短路电动力分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- ZHANG Junchen. Analysis of leakage field and short-circuit electric force in transformer windings[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [17]王 楠, 刘宝成, 臧春艳, 等. 基于磁—结构耦合场的变压器绕组形变分析[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 94-100.
- WANG Nan, LIU Baocheng, ZANG Chunyan, et al. Analysis of transformer winding deformation based on magnetics-structure coupled-field[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 94-100.
- [18]高树国, 孙 路, 刘宏亮. 基于 COMSOL 多物理场仿真的短路工况下变压器轴向电磁力的计算[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5250-5256.
- GAO Shuguo, SUN Lu, LIU Hongliang. Calculation of axial electromagnetic force of transformer under short circuit condition based on COMSOL multi-physical field simulation[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(13): 5250-5256.
- [19]李 堃, 罗竣匀, 刘 君, 等. 不同铁芯模型对绕组累积效应影响的仿真对比[J]. 电力大数据, 2023, 26(1): 51-59.
- LI Kun, LUO Junyun, LIU Jun, et al. Simulation comparison of the influence of different core models on the cumulative effect of windings[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 26(1): 51-59.
- [20]吕较鹏. 配电变压器绕组抗短路能力计算与评估技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- LV Jiaopeng. Research on calculation and evaluation technology of winding Anti short circuit capacity of distribution transformer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [21]崔继朝. 电力变压器短路状态下绕组与支撑结构强度仿真研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- CUI Jichao. Simulation study on strength of winding and supporting structure of power transformer under short circuit condition[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [22]张 弛. 基于累积效应的短路工况下电力变压器绕组形变特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- ZHANG Chi. Research on Winding deformation characteristics of power transformer under short-circuit conditions based on cumulative effect[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- 王 谦(1984—), 男, 硕士, 高级工程师职称, 电气试验技师, 长期从事输变电设备故障及异常案例分析、电网过电压及绝缘研究、电力系统自动化装置研究等(E-mail: xtyz201110@163.com)。