

[干式配电变压器]

干式配电变压器抗短路能力提升措施研究

文/赵海龙
正泰电气股份有限公司

干式配电变压器作为一种重要的配电设备，广泛应用于城市配电网和工业领域。短路电流对于干式配电变压器的安全运行构成极大危害，可能导致变压器绕组变形、绝缘击穿和火灾等。通过干式配电变压器短路试验失败案例，分析垫块断裂、位移、低压绕组变形、高压绕组开裂、绝缘子拉裂以及铜排与绕组拉裂等故障现象的原因，提出优化垫块设计和材料选择、加强绕组的固定和支撑、提高绕组的机械强度和耐热性等抗短路能力提升措施，旨在提升干式配电变压器的可靠性。

干式配电变压器作为一种重要的配电设备，具有结构紧凑、高效可靠、阻燃防爆和维护方便等优点，广泛应用于城市配电网和工业领域，其安全稳定运行对于保障配电网的可靠性至关重要^[1-4]。

干式配电变压器在运行过程中，短路电流是一个严重的安全威胁^[5-6]。短路电流通常由电网故障或变压器内部绝缘损坏引起，其特性表现为电流急剧上升，短时间内达到峰值。短路产生的高能量电流对于干式配电变压器的结构造成极大危害，尤其是对绕组和绝缘系统的影响最为显著^[7-8]。在短路条件下，干式配电变压器将承受巨大的电磁力和热应力，可能导致绕组变形、绝缘材料急速老化甚至击穿，严重时会引起干式配电变压器的损坏或火灾。因此，研究干式配电变压器短路故障下损坏原因，采取有效措施提升其抗短路能力，对于提高干式配电变压器的可靠性和使用寿命具有重要意义。

本文通过分析干式配电变压器在短路条件下的受力情况，并通过短路承受能力试验失败案例，找出干式配电变压器普遍存在的缺陷和技术不足，提出抗短路能力提升措施，以提升干式配电变压器的性能和可靠性，可为干式配电变压器的设

计、制造和运行提供参考。

短路条件下的受力分析

当干式配电变压器发生短路时，高、低压绕组中的电流会急剧增加，短路电流的瞬时冲击会导致变压器绕组和铁心中产生复杂的应力分布，导致绕组之间和绕组内部的磁场强度迅速变化。变化的磁场会产生电磁力，作用于变压器绕组中，电磁力主要表现为径向力和轴向力。干式配电变压器绕组通常为椭圆形同心式结构，短路时绕组中的电流分布如图1所示。

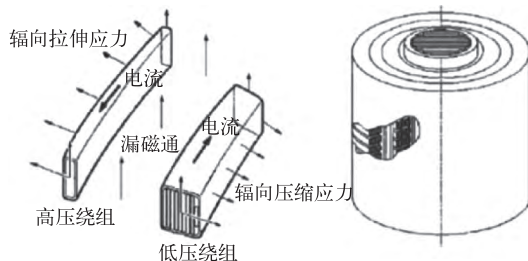


图1 短路时干式配电变压器绕组的受力示意图

通常干式配电变压器的高压线圈位于外围，低压线圈位于内侧，在短路电流作用下，高压绕组和

低压绕组之间的电磁力主要表现为径向力，该力试图将高压绕组向外拉升，并将低压绕组像内部挤压。此外，绕组内部的电流分布不均匀会产生轴向力，可能使绕组发生弯曲变形。

径向力主要由绕组之间的磁场相互作用产生，径向力 F_r 计算公式为

$$F_r = \frac{\mu_0 I_{sc}^2 N^2}{2\pi r} \quad (1)$$

式中， μ_0 为真空磁导率； N 为线圈匝数； r 为线圈半径。

轴向力主要由绕组内部的磁场分布不均匀引起，计算公式为

$$F_{axial} = \frac{1}{2} \mu_0 N^2 I^2 \frac{\partial^2 L}{\partial z^2} \quad (2)$$

式中， N 为线圈匝数； I 为绕组中的电流； L 为绕组的电感； z 为轴向坐标。

短路电流还会在铁心中产生磁场，导致铁心受到电磁力的作用。铁心的受力主要表现为磁致伸缩力和磁滞力。磁致伸缩力 F_{ms} 计算公式为

$$F_{ms} = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (3)$$

式中， B 为磁感应强度； A 为铁心截面积。

磁滞力 F_h 主要由铁心的磁滞回线特性决定，通常由实验测定。

干式配电变压器在短路故障下，线圈中的径向力会使线圈产生内缩变形，轴向力会让低压线圈沿轴向内缩、高压线圈沿轴向外扩，造成线圈层间或匝间绝缘损坏，严重时可能使线圈整体结构发生位移，影响变压器正常运行。

干式配电变压器的铁心在短路电动力作用下不易发生故障，主要原因在于：干式变压器铁心采用环氧玻璃粘带绑扎或者槽钢等坚固的结构件对铁心进行夹紧，能够有效地将铁心的各个部分紧密连接在一起，防止在电动力作用下铁心片间发生相对位移；在硅钢片表面涂覆绝缘漆等措施，使得铁心在电动力作用下不会因为片间短路而产生局部过热或其他故障；与油浸式变压器相比，不存在油流对铁心温度分布的复杂影响。笔者对30余台干式配电变压器短路故障案例进行统计，未发现一起铁心故障案例。

短路试验故障分析

干式配电变压器短路承受能力试验按照国家标

准GB/T 1094.5—2008《电力变压器 第5部分：承受短路的能力》开展，对于A、B、C三相，每相各试验3次，试验后对干式配电变压器进行外观检查，应无位移、铁心片移动、绕组及连接线和支撑结构变形等明显缺陷。对实验室近年来开展的干式配电变压器短路承受能失败案例进行分析，总结出以下几种典型故障。

1. 垫块断裂、位移

在进行短路试验后，发现干式配电变压器内部的垫块出现断裂、位移，甚至脱落等现象，如图2所示。垫块的断裂、位移会导致绕组失去支撑，进而引发绕组位移和变形。

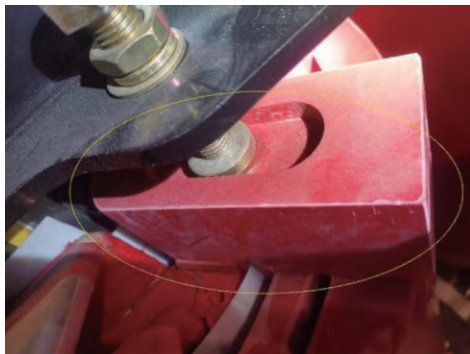


图2 垫块位移

原因分析：①垫块材料强度不足：垫块材料的选择可能不当，在短路电流冲击下无法承受应力而断裂。常见的垫块材料包括环氧树脂、玻璃纤维等，如果材料强度不足，容易在短路电流的冲击下发生断裂或变形；②垫块安装不牢固：在变压器制造过程中，垫块的固定可能不够牢固，尤其是垫块与铁心或垫块与绕组之间的固定点，短路电流的冲击力可能导致这些固定点松动，进而引起垫块位移；③垫块结构设计不合理：垫块的结构设计未充分考虑短路电流的冲击力，存在应力集中点，这些点在短路电流冲击下容易发生变形和断裂；④制造工艺缺陷：在垫块的制造过程中，存在工艺缺陷，如垫块内部存在气泡、杂物等，在垫块的装配过程中，可能存在装配误差，导致垫块在短路电流冲击下发生断裂和位移。

2. 低压绕组变形、高压绕组开裂

短路试验后，发现低压绕组变形、高压绕组开裂现象，如图3和图4所示。低压绕组的变形导致绕组间的绝缘距离减小，高压绕组的开裂则可能导致

绝缘击穿。



图3 低压绕组变形和开裂

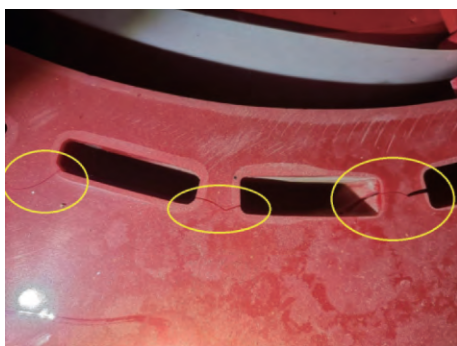


图4 高压绕组开裂

原因分析：①绕组设计不合理：低压绕组和高压绕组的设计可能未充分考虑短路电流的冲击力，绕组存在应力集中点，这些点在短路电流冲击下容易发生变形和开裂；②材料选择不当：低压绕组和高压绕组材料的选择不当，导致在短路电流冲击下无法承受应力而发生变形和开裂。常见的绕组材料为铜线和铝线，如果材料强度不足，容易在短路电流的冲击下发生变形和开裂；③设计不合理：短路试验中的电流峰值可能超过了绕组的设计承受能力，导致绕组在短路电流的冲击下发生变形和开裂。短路电流的冲击力在绕组中的分布可能不均匀，导致部分绕组承受的冲击力过大，发生变形和开裂；④安装不牢固：在变压器的制造过程中，低压绕组和高压绕组的固定可能不够牢固，尤其是在绕组与铁心之间的固定点。短路电流的冲击力可能导致这些固定点松动，进而引发绕组的变形和开裂；⑤制造工艺缺陷：在绕组的制造过程中，存在工艺缺陷，如绕组层间绝缘不均匀、绕组层间应力分布不均等，在绕组的装配过程中，可能存在装配误差，导致绕组在短路电流冲击下发生变形和

开裂。

3. 固定低压引出线铜排的绝缘子有拉裂现象

短路试验后，发现固定低压引出线铜排的绝缘子出现拉裂现象，导致低压引出线铜排失去固定，进而引发引出线位移和变形，如图5所示。



图5 固定低压引出线铜排的绝缘子断裂

原因分析：①绝缘子材料强度不足：绝缘子材料的选择可能不当，导致在短路电流冲击下无法承受应力而发生拉裂。常见的绝缘子材料包括环氧树脂、陶瓷等，如果选用的材料强度不足，绝缘子容易在短路电流的冲击下发生拉裂；②绝缘子安装不牢固：在变压器的制造过程中，绝缘子的固定可能不够牢固，尤其是在绝缘子与铜排或铁心之间的固定点。短路电流的冲击力可能导致这些固定点松动，进而引发绝缘子的拉裂；③绝缘子结构设计不合理：绝缘子的结构设计可能未充分考虑短路电流的冲击力，导致绝缘子在短路试验中无法承受应力而发生拉裂。绝缘子的设计中可能存在应力集中点，这些点在短路电流冲击下容易发生拉裂；④制造工艺缺陷：在绝缘子的制造过程中，可能存在工艺缺陷，如绝缘子内部存在气泡、杂物等，导致绝缘子在短路电流冲击下发生拉裂。绝缘子在短路电流的冲击下发生拉裂，会导致低压引出线铜排失去固定，进而引发引出线位移和变形。

4. 低压引出线铜排与低压绕组本体拉裂

短路试验后，发现低压引出线铜排与低压绕组之间出现拉裂现象，导致铜排与绕组之间的连接失效，如图6所示。

原因分析：①引出线与绕组连接不牢固：低压引出线铜排与低压绕组之间的连接可能不够牢固，尤其是在连接点处。短路电流的冲击力可能导致这些连接点松动，进而引发引出线与绕组间的拉裂。

如果引出线与绕组之间的连接是通过焊接实现的，焊接质量差可能导致连接点在短路电流冲击下发生拉裂；②设计考虑不足：短路试验中的电流峰值可能超过了引出线与绕组连接点的设计承受能力，导致连接点在短路电流的冲击下发生拉裂。短路电流的冲击力在连接点中的分布可能不均匀，导致部分连接点承受的冲击力过大，发生拉裂；③引出线与绕组设计不合理：低压引出线铜排与低压绕组本体的设计可能未充分考虑短路电流的冲击力，导致连接点在短路试验中无法承受应力而发生拉裂。低压引出线铜排在短路电流的冲击下与低压绕组发生拉裂，导致引出线位移和变形；④制造工艺缺陷：在引出线与绕组本体的制造过程中，可能存在工艺缺陷，如连接点处存在气泡、杂物等，在引出线与绕组的装配过程中，可能存在装配误差，导致连接点在短路电流冲击下发生拉裂。



图6 低压引出线铜排与低压绕组本体拉裂

抗短路能力提升措施

针对干式配电变压器在短路承受能力试验中表现出的多种故障，提出以下抗短路能力提升措施。

1. 优化垫块设计和材料选择

垫块在变压器中起到固定和支撑绕组的作用，若断裂和位移会导致绕组失去稳定性，进而引发其他故障。为了提升垫块的抗短路能力，可以从以下几个方面进行优化：

1) 材料选择：选择高强度、高韧性的材料制作垫块，如高强度工程塑料或复合材料，以提高垫块的抗冲击和抗断裂能力。

2) 结构设计：优化垫块的结构设计，采用多层复合结构或增加加强筋，以提高垫块的整体强度和稳定性。

3) 安装工艺。改进垫块的安装工艺，确保垫块与绕组之间的紧密配合，减少位移的可能性。

2. 加强绕组的固定和支撑

绕组的位移和偏心会导致变压器内部电磁力的分布不均匀，进而引发局部过热和机械损伤。为了提升绕组的抗短路能力，可以采取以下措施：

1) 加强固定。在绕组内部增加固定装置，如加强环或固定夹，确保绕组在短路冲击下不会发生位移。

2) 优化支撑结构。改进绕组的支撑结构，采用多点支撑设计，减少绕组在短路冲击下的偏心现象。

3) 预应力设计。在绕组制造过程中引入预应力设计，使绕组在正常运行状态下保持一定的预紧力，增强其抗短路能力。

3. 提高绕组的机械强度和耐热性

绕组的变形和开裂是短路冲击下的常见故障，严重影响了变压器的正常运行。为了提升绕组的抗短路能力，可以从以下几个方面进行改进：

1) 材料升级。采用高强度、高耐热性的绕组材料，如高强度铜合金或高温耐热材料，以提高绕组的机械强度和耐热性。

2) 绕组设计。优化绕组的设计，采用多层绕组结构或多股并绕设计，以分散短路冲击力，减少绕组的变形和开裂。

3) 热处理工艺。在绕组制造过程中引入热处理工艺，提高绕组的机械强度和耐热性。

4. 增强绝缘子的机械强度和稳定性

绝缘子在变压器中起到固定和绝缘引出线的作用，其拉裂现象会导致引出线失去稳定性，进而引发短路故障。为了提升绝缘子的抗短路能力，可以采取以下措施：

1) 材料选择。选择高强度、高韧性的绝缘材料，如高强度陶瓷或复合材料，以提高绝缘子的抗拉裂能力。

2) 结构设计。优化绝缘子的结构设计，增加加强筋或采用多层复合结构，以提高绝缘子的整体强度和稳定性。

3) 安装工艺。改进绝缘子的安装工艺，确保绝缘子与引出线之间的紧密配合，减少拉裂的可能性。

5. 改进引出线与绕组本体的连接方式

引出线与绕组连接处的拉裂会导致电流中断。为了提升引出线的抗短路能力，可以从以下几个方面进行改进：

1) 连接方式。改进引出线与绕组本体的连接方式，采用多点焊接或螺栓连接，以提高连接的稳定性和可靠性。

2) 材料选择。选择高强度、高韧性的引出线材料，如高强度铜合金，以提高引出线的抗拉裂能力。

3) 结构设计。优化引出线的结构设计，采用多层复合结构或多股并绕设计，以分散短路冲击力，减少引出线的拉裂。

6. 引入智能监测和预警系统

除了上述硬件提升措施外，还可以通过增加智能监测和预警系统，实时监测变压器的运行状态，及时发现潜在的故障隐患并发出预警信号，以便及时采取措施。

1) 布置传感器。在变压器的关键部位布置振动传感器、应力传感器等，实时监测变压器的运行状态。

2) 数据分析。利用大数据和人工智能技术，分析传感器采集的数据，识别并预测潜在的故障。

3) 预警系统。建立预警系统，当监测到异常时，及时发出预警信号，提醒运维人员采取措施，避免故障的发生。

7. 加强运维管理和定期检测

提升干式配电变压器的抗短路能力还需要加强运维管理和定期检测，通过定期的检测和维护，可以及时发现和处理潜在的故障隐患，确保变压器的长期稳定运行。

1) 定期检测。制定详细的检测计划，定期对变压器进行全面检测，包括绝缘电阻测试、绕组变形检测和机械强度测试等。

2) 维护保养。根据检测结果，及时进行维护保养，更换老化或损坏的部件，确保变压器的正常运行。

3) 运维管理。建立完善的运维管理体系，制定详细的运维规程，确保变压器的运维工作有序进行。

结束语

本文分析了干式配电变压器在遭受突发短路时，绕组所承受的径向力和轴向力的情况，以及铁心受到电磁力作用的情况。

通过对干式配电变压器短路试验失败案例的分析，总结出垫块断裂、位移、低压绕组变形、高压绕组开裂、绝缘子拉裂以及铜排与绕组拉裂等是导致短路试验失败的主要原因，进而提出优化垫块设计和材料选择、加强绕组的固定和支撑、提高绕组的机械强度和耐热性、增强绝缘子的机械强度和稳定性等提升干式配电变压器抗短路能力提升措施。这些提升措施不仅包括硬件的优化和改进，还引入智能监测和运维管理等软件手段，全面提升干式配电变压器的抗短路性能。

通过上述措施的综合应用，可以显著提升干式配电变压器的抗短路能力，减少短路故障，确保干式配电变压器长期稳定运行。EA

(收稿日期：2024-10-24)

参考文献

- [1] 付强, 彭磊, 李智, 等. 环境友好型干式变压器用绝缘材料的发展与面临挑战[J]. 广东电力, 2024, 37(5): 69-83.
- [2] 熊兰, 赵艳龙, 杨子康, 等. 树脂浇注干式变压器温升分析与计算[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 265-271.
- [3] 杨生泽, 吴永洋, 曲翔. 三相干式电力变压器局部放电试验的研究[J]. 电气传动自动化, 2023, 45(1): 63-65.
- [4] 陈奎. 干式变压器抗短路能力分析及改进措施[J]. 变压器, 1998, 35(2): 7-8, 35.
- [5] 姜益民, 马骏. 变压器的全寿命周期成本分析[J]. 变压器, 2006, 43(12): 30-34.
- [6] 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.
- [7] 李德海, 刘生, 尚方, 等. 防止短路电流对电力变压器造成损坏的措施分析[J]. 黑龙江电力, 2019, 41(5): 377-402.
- [8] 张杰, 李春. 变压器短路事故浅析[J]. 四川电力技术, 2008, 31(8): 31-32, 86.