

[变压器]

干式变压器匝间短路故障分析与处理

文/何宏理

上海外高桥万国数据科技发展有限公司

结合干式配电变压器在运行过程中突然发生的匝间故障，分析检查结果，查明引起干式变压器故障的根本原因，更换故障变压器。简要地分析了在制造过程中，影响变压器纵绝缘的主要因素，提出相应的解决对策。在预防性试验中增加局部放电试验，关注后续新变压器的出厂检验和交接试验等工作，解决匝间短路的问题。

变压器作为配电网的关键设备，其可靠性对配电网的可靠运行至关重要。环氧树脂浇筑式变压器（简称干式变压器）具有优良的电气性能、对短路和雷电冲击耐受度好、易维护、无爆炸及火灾等特点，得到广泛应用。由于受到使用年限、安装、制造工艺、质量管控及检测手段等因素的影响，干式变压器内部故障导致的配电故障时有发生。通过分析工作中的故障案例，提出预防及维护的建议，对于配电网的安全、可靠运行具有重要的指导意义。

干式变压器故障简述

1. 干式变压器的绝缘结构

从结构上分为主绝缘和纵绝缘。主绝缘是外部绝缘，指线圈和其他结构的绝缘，可分为相间绝缘、绕组对地绝缘和同相内的不同绕组间绝缘。纵绝缘是内部绝缘，指同一相线圈的绝缘，由内至外可逐次分为匝间、层间及段间绝缘。

干式变压器在运行过程中要承受电场、热量等因素的影响。绝缘材料在电场、热量等因素的影响下，绝缘性能逐渐下降，当超过临界点时，绝缘被击穿，造成短路故障。

2. 干式变压器的故障分类

干式变压器的故障可分类如下：①相间短路；

②单相接地短路；③绕组内的匝间短路；④过载；⑤变压器的绕组温度过高。

树脂浇注干式变压器的匝间、层间短路较为常见。造成匝间短路的原因多数是在浇筑工序中，树脂中含气隙或树脂配比异常，造成在匝间绝缘处树脂未填满或树脂与电磁线绝缘漆融合性不好，导致该处先发生局部放电，从而导致匝间的绝缘结构损坏。

故障概述

某日监控室报警，低压配电室前置柜断路器（VCB）跳闸，变压器低压总进线断路器（ACB）自动分闸，低压母线联络断路器（ACB）自动合闸，后端负载由对侧变压器带载。值班人员到达现场后，发现有浓烟且前置开关柜跳闸，通过应急处置措施，将隔离变压器高低压侧隔离后，打开变压器外壳柜门，发现C相高压线圈内壁有灰喷出，下部有绝缘筒融化物滴下，高压线圈树脂层有开裂，初步确认为C相高压线圈故障。现场对故障变压器高压线圈的直流电阻测试，阻值分别为：A相365.8 mΩ、B相367.2 mΩ及C相340.1 mΩ，C相直流电阻偏小，判断为C相高压线圈内短路。

故障原因分析

1. 基本参数

基本参数见表1。

表1 基本参数

型号	SCB11-2500/10	联结组别	Dyn11
电压/kV	10/0.4	冷却方式	AN/AF
频率/Hz	50	短路阻抗 (%)	7.67

2. 生产流程排查

根据变压器的生产编号，调出该台变压器生产的原始数据，包含原材料进厂检验、生产过程记录、生产设备记录及出厂试验数据等均正常。调阅交接试验数据均在正常范围，运行环境良好，环境温度25℃，故障前负载率在20%上下。

3. 高压线圈解剖

变压器返厂后，对高压线圈解体后发现树脂端面和内壁膨胀开裂，如图1、图2所示。将线圈膨胀的内层树脂剥离，将线圈几处开裂部位的内层树脂剥离，逐层揭开导线，最终在线圈背部（低压侧位置）发现短路点，短路位置位于第二层导线处，如图3所示。导体灼烧情况如图4所示，根据情况判断为匝间短路。



图1 端面树脂开裂



图2 内壁树脂开裂



图3 短路点位于第二层导线



图4 导线熔断情况

4. 直接原因分析

通过解剖观察到，故障位置位于线圈内部正常绕线区域，该区域无分接无焊点，且位于内层线图，不存在线圈在运输和操作过程中因磕碰造成故障的可能。

从解剖过程观察到，正常部位导体环氧树脂在层间和导体匝间渗透充分。短路部位出现连续五匝导体有烧蚀，其中最严重部位三匝导体完全熔断，可以确认该处是故障始发位置。由此推断引起故障的直接原因为C相高压线圈第二层导体匝间短路，形成短路电流，短路导体急速发热，烧毁层间绝缘，造成一二及二三层层间短路，如图5所示，产生的热能从线圈内壁上部端部释放，导致线圈内壁上部端部及相对应的低压线圈表面出现炭黑现象。

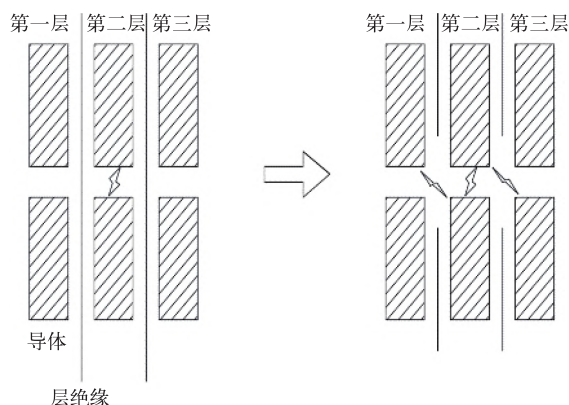


图5 层间短路示意图

5. 根本原因分析

电磁线表面都覆盖有一层绝缘漆膜，两匝导线并排绕制，即使有一根导线漆膜受损，另一根导线漆膜完好，也可以耐受正常的匝间电压。而本次故障导致三匝导线有熔断的现象。

排查线圈其他工序记录，其中浇注记录显示有一个异常现象，浇注临近结束时，浇注设备出现一次冲程下料时浇注料配比异常报警，然后停止浇注检查后发现固化剂进出料密封圈破损，重新更换后完成浇注。

由此推断，这次浇注报警时，下料树脂与固化剂配比异常，刚好注入到线圈故障部位，导致该部位树脂与线材绝缘层融合性变差，长期运行，产生气穴，造成局部放电。长时间的局部放电导致了线圈内部绝缘性能缓慢下降，当绝缘性下降到达临界点时，绝缘被击穿，最终引起导体匝间短路故障，

造成此次突发故障。

综上所述，本次故障的根本原因为浇筑树脂配比异常导致局部放电超标，最终造成匝间短路，变压器故障停运。

6. 故障原因综合分析

在变压器制造过程中，往往在浇注工艺阶段易潜伏工艺性的局部缺陷，在变压器的出厂试验时，由于局部放电量很小，从而造成局部放电试验数据也在国标要求范围内，使变压器带隐患流入运行环节。

在变压器维护试验过程中，这些缺陷是交流耐压试验无法检测到的，局部放电试验由于场地等原因未进行，未能及时发现和消除隐患故障。

在变压器的运行过程中，人的直觉无法察觉到的局部放电，只有借助局部放电测量仪器才能发现局部放电现象。短期内单个放电量对变压器的内部绝缘不会造成明显的影响，但长期运行，局部放电会逐步扩大，此过程产生的化合物又加速了绝缘结构损坏，形成累加效应，超过临界点，匝间绝缘被击穿发生匝间短路，形成的短路热量又损坏层间绝缘，形成层间短路，造成突发性故障。

短时的局部放电不一定造成整个通道的介质受损，但放电的电解作用使绝缘加速氧化，并腐蚀绝缘，从而降低了变压器的寿命。损坏程度取决于放电性能和放电作用下绝缘的破坏程度。变压器在长期运行过程中，内部绝缘性能逐渐下降，长期严重的局部放电累加，造成绝缘击穿。如干式变压器局部放电量严重超标，使用寿命一般在5年左右会出现内部绝缘老化而击穿导致匝间短路，有的甚至2~3年就导致匝间短路。

由于局部放电是导致变压器匝间短路的主要原因之一，因此要对局部放电引起足够的认识和重视。局部放电有多种放电类型，其中一种是发生在绝缘表面的局部放电形式，若能量较大，在绝缘体表面留下放电痕迹时，则影响变压器的寿命。还有一种是放电强度较高，发生在气穴或尖角电极上，集中在少数几点的局部放电形式腐蚀性放电，此放电能深入到绝缘纸材料的内部，造成绝缘强度下降，最终导致击穿。

由于短时感应电压试验（ACSD）是验证变压器主绝缘以及纵绝缘的耐受强度的重要方法，局部

放电试验作为检测变压器内部绝缘隐形缺陷的有效手段，是用来验证变压器下是否存在超标的局部放电量的质量控制试验。因此通过ACSD附加局部放电试验可以及时发现有匝间短路隐患的变压器，从而进行预测性维修和更换。

故障处理及改进

为了能彻底地解决该次的故障并保证维修质量，变压器制造厂用新的同型号变压器更换了该台故障变压器，并对新变压器进行了严格的交接试验，试验数据符合国家标准要求。新变压器安装至今，运行状况良好。

为排除同批次生产变压器没有此类隐患故障，变压器制造厂制订了详细完整的计划，对所有同批次在运行变压器进行短时感应耐压（ASCD）和局部放电测量试验。

考虑到变压器已运行3年，先对变压器进行局部放电试验，当局部放电量检测值小于标准值10 pC时，再进行感应耐压试验，防止先进行感应耐压试验直接将绝缘击穿。局部放电试验加压程序如图6所示（ U_r 为额定电压10 kV）。感应耐压试验按照出厂交流耐压的70%（20 kV）进行。

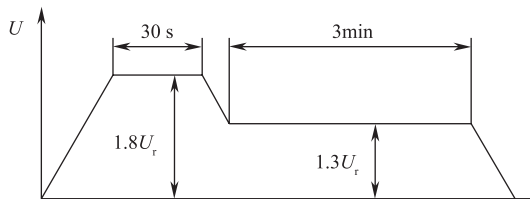


图6 局部放电试验的施加电压程序

通过对同批次在运行变压器的局部放电进行试验，未发现局部放电量超标的变压器，排除了此故障为批次纵绝缘质量问题，保障了在运行变压器的安全稳定运行。

由于变压器内部绝缘故障的隐蔽性强，在日常的运行维护过程中，难以通过人的感觉发现，因此对在运行变压器预防性维护计划时，每6年进行局部放电量试验，便于及时发现有内部绝缘故障隐患的变压器。

后续重视干式变压器的工厂检验工作，要重点关注变压器的原材料进场检验、线圈的绕制、真空浇筑固化及装配工艺等环节的工艺记录、质量控制

卡及出厂试验。发现异常,及时提出异议,避免不合格部件流入下道工序,在源头上保障变压器的产品质量。

重视干式变压器的交接试验,此为变压器投入运行前的最后一道工序,要按照GB 50150—2016《电气设备交接试验标准》的试验条件严格执行,确保只有质量合格的变压器才能投入运行。

结束语

由于干式变压器内部绝缘故障(特别是匝间短路)难以被发现,一旦发生将造成配电的中断或切换,影响重要负荷的安全稳定运行。要重视变压器的厂验、交接试验及预防性试验工作,避免类似故障的发生。**EA**

(收稿日期:2022-04-15)

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电力变压器第3部分:绝缘水平绝缘试验和外绝缘空气间隙:GB/T 1091.3—2003[S]. 北京:中国电力出版社,2003.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电力变压器第11部分:干式变压器:GB/T 1091.11—2007[S]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电气装置安装工程:电气设备交接试验标准:GB/T 50150—2016[S]. 北京:中国计划出版社,2016.
- [4] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用配电设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2016:520.
- [5] 岑戎珍. 浅谈环氧树脂浇注干式变压器[J]. 变压器,2016,33(9):28~31.
- [6] 张翰林,李祎春,陈应龙,等. 大型变压器绝缘件监造典型案例[J]. 电气应用,2021,40(10):66-69.
- [7] 夏彦卫,高树国,成立,等. 热老化下换流变压器内油纸绝缘组合理化和电气特性研究[J]. 电气应用,2020,39(7):101-107.

第八届全国电气工程师论文大赛 征文通知

征文主题

出于可持续发展的必然要求,以及中国“碳中和”目标的提出,新能源及新技术的发展目标油然而生。加强技术合作和集成创新对实现新能源的发展和应用具有重要意义。本届论文大赛将通过征文的形式,围绕“低碳 高效 创新”这一主题,搜集并发掘相关的知识与经验,并面向业界做进一步推广。

征文范围

- (1) 体现“新能源和新技术”的理论研究及相关实用技术应用。
- (2) 风力发电、光伏发电等新能源相关技术探讨,分布式能源并网的技术原则和方案设计。
- (3) 全面展示输电、变电、配电、用电各个环节最新节能产品、技术成果和解决方案。
- (4) 建设新型电力系统的应用技术方案和工程案例。
- (5) 储能技术领域的最新研究进展和解决方案。
- (6) 电气设备系统集成和变频节能技术的解决方案。
- (7) 节能减排、安全环保的应用电气技术及解决方案。
- (8) 电气节能创新技术的自主研发及相关应用案例。

www.eage.com.cn



扫描二维码
查看通知详情

