

一起 220 kV 变压器绕组变形缺陷分析与处理

绕组变形检测对预防变压器短路冲击损坏具有重要作用。针对一起 220 kV 变压器绕组变形缺陷，综合利用频响特性法、低电压阻抗法和绕组电容法判断了绕组变形的程度与部位；结合变压器短路冲击情况和抗短路能力分析，进行了变压器更换的处理决策；通过解体检查与绕组变形诊断进行了对照，验证了分析结论的准确性；最后，从短路冲击统计、变形试验管理、线圈材料管控和抗短路能力治理等方面，为预防变压器短路冲击损坏提出了相应的技术和管理措施。

王楠¹ 马小光² 王伟¹ 刘宝成¹ / 1. 国网天津市电力公司电力科学研究院 2. 国网天津市电力公司



王楠/工程师

关键词/Keywords

变压器 ·
绕组变形 ·
缺陷分析 ·

随着电力系统规模不断扩大，电网间的联系日趋紧密，电力系统中短路电流逐年攀升，这使得电力变压器运行的条件变得更为苛刻。加之，早期生产的变压器，受当时技术水平所限，变压器中（35 kV）、低压线圈多采用组合纸包扁铜线，其材料抗变形能力较差，当变压器出口或近区发生长时短路故障时，短路电流与漏磁通叠加产生的辐向力和轴向力共同作用于变压器绕组，极易发生变形，并导致变压器短路损坏。

变压器遭受短路冲击后，如何确定绕组状态，是进行变压器投退运决策，合理安排技改、大修和更换的关键。绕组变形分析一般多以频响法为主，也有众多学者对此进行了研究^[1-3]，但是，任何一种方法均有局限性，国家电网公司在十八项反事故措施中，提出增加低电压阻抗的试验要求^[4]。在绕组变形的综合分析方法上，国内外学者也进行了一定的研究^[7,8]，但具体的实际案例分析较少^[9,10]。本文针对一起 220 kV 变压器绕组变形案例进行了详尽的阐

述，为绕组变形综合诊断提供了实践经验。

缺陷变压器基本参数

缺陷变压器为三相五柱式铁心结构，线圈从内到外依次为低压包、中压包、高压包和调压包，其中调压包分为上、下两段组成，高压采用中部出线的方式。高压线圈采用内屏蔽连续式的绕线方式，分为上、下两段分别绕制，并联后经中部出线，其中工作线和屏蔽线材质均为纸包扁导线。中压线圈、低压线圈以及调压线圈材质也为纸包扁铜线，采用螺旋的绕线方式，具体参数如表 1 所示。

表 1 缺陷变压器基本参数

项目	参数
设备型号	SFPSZ11 - 120000 / 220
绕组额定电压和分接范围	220 ± 8 × 1.25% / 37 / 10.5 kV
联结组标号	YN yn0 d11
冷却方式	强迫油循环风冷 (ODAF)
额定电流	394 / 2 341 / 4 124 A
出厂日期	1999 - 01
退运日期	2013 - 06

缺陷发现与处理过程

2013 年 6 月 27 日，在进行缺陷变压器绕组变形试验时发现，中压线圈频响特性一致性较差，怀疑绕组有变形情况。

为进一步诊断缺陷情况，2013 年 6 月 28 日，对该变压器进行了复测，同时增加低电压阻抗法、绕组电容法进行综合判断。试验结果表明，频响特性试验与 2013 年 6 月 27 日试验结果一致，低电压阻抗法、绕组电容法亦可判断绕组发生明

显变形。经分析讨论，最终确定对该变压器进行更换。2013 年 12 月 2 ~ 6 日，在检修基地对该变压器进行了解体。

绕组变形综合诊断分析

在绕组变形分析上，目前现场应用的主要有三种方法，分别为频响特性法、低电压阻抗法和绕组电容法。其中频响特性法能灵敏、准确地反映绕组的变形，但易受环境和试验方法的影响，且判断指标不直观；低电压阻抗法对影响整体变形较为灵敏，如幅向变形、轴向扭曲等，但对匝、饼间的局部拉伸压缩，绕组整体位移等不灵敏，但其指标可以量化；绕组电容法对严重的变形和绕组的整体窜动灵敏度较高，对鼓包、扭曲等故障灵敏度很差。

利用三种方法之间的关联性和互补性，对缺陷变压器进行绕组变形诊断性试验。

1. 频响特性法

频响特性法是采用正弦信号扫频的方法，从变压器某个绕组的一端对地注入扫频信号（1 ~ 1 000 kHz），在绕组的另一端测量传递过来的信号，计算传递函数并绘制出频率响应曲线。一般可通过三相曲线之间的拟合度和相关系数进行横比，亦可与历次试验的频响曲线进行纵比。

对缺陷变压器进行频响特性试验，频响特性曲线表征和相关系数分析表明：高、低压绕组正常，中压绕组明显变形。中压频响特性曲线如图 1 所示，对应的相关系数如表 2 所示。

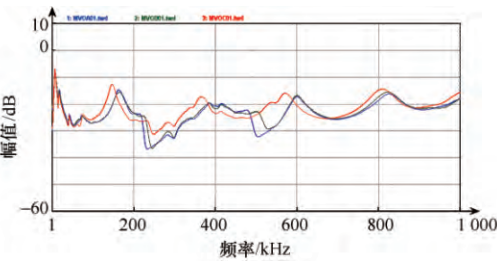


图 1 中压频响特性曲线

表 2 中压频响特性相关系数

相关系数	低频段	中频段	高频段	全频段
R21	1.503	1.041	1.971	1.221
R31	1.829	0.353	0.819	0.511
R32	1.406	0.390	0.863	0.571

根据 DL/T 911—2004 《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》，当中压相关系数小于 0.6 时，证明绕组发生明显变形。本次试验结果显示，中压 $A_m C_m$ 相关系数为 0.35，中压 $B_m C_m$ 相关系数为 0.41。另外，查阅 1999 年该变压器中压侧的频响试验结果显示，三相曲线拟合度较高，中压 $A_m C_m$ 相关系数为 1.58，中压 $B_m C_m$ 相关系数为 1.796。因此，通过频响特性法的横比和纵比分析，初步推断：中压 C 相发生明显变形。

2. 低电压阻抗法

低电压阻抗法是通过测量变压器绕组的短路阻抗或漏抗等集中电气参数的变化来诊断绕组变形。由于漏电感可以反映两个绕组的相对距离，且与电流成线性关系，因此，可在低电压下测量，而不影响复验性。一般可通过三相间的互差进行横比，亦可与历史数据进行纵比判断。

对缺陷变压器进行低电压阻抗试验，通过三相相互差分析表明：高、低压绕组正常，中压绕组明显变形。试验结果如表 3 所示。

表 3 低电压阻抗法试验结果

位置	相别	U/V	I/A	Z/Ω	三相互差 (%)
高压对中压	AO	221.49	3	73.83	5.4
	BO	223.17	3	74.39	
	CO	240.95	3	80.32	
高压对低压	AO	193.92	1.5	129.28	0.42
	BO	193.63	1.5	129.09	
	CO	194.44	1.5	129.63	
中压对低压	$A_m O_m$	21.05	20	1.05	9
	$B_m O_m$	20.95	20	1.05	
	$C_m O_m$	18.22	20	0.91	

根据 DL/T 1093—2008 《电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则》，三相绕组低电压阻抗参数互差应不大于 2%。本次试验结果显示：高压对中压 C 相偏大，互差为 5%；中压对低压 C 相偏小，互差为 9%。

因为变压器每一对绕组的电抗值是这两个绕组相对距离（同心圆的两个绕组的半径 R 之差）的增函数，另外根据绕组绕制方式和线圈结构，当发生短路时中压绕组受到向内的压应力，有靠

近低压线圈远离高压线圈的趋势。因此，根据低电压阻抗试验推断：中压 C 相发生辐向变形，中压绕组向低压绕组塌陷。

3. 绕组电容法

绕组的等效电容量直接反映出了各绕组间、绕组对铁心、绕组对箱体及地的相对位置和绕组的自身结构等。当变压器遭受短路冲击后，绕组发生相对位移，电容值改变，从而可判断其是否有结构变化。根据 Q/GDW 168—2008 《输变电设备状态检修试验规程》电容量变化注意值为 5%。

对原张贵张 1 号变压器进行介损试验，本次试验、2010 年例行试验以及 1999 年交接试验时的电容量测试结果如表 4 所示。

表 4 历次电容量试验结果

项目	电容量/nF		
	本次	2010 年例行	1999 年交接
高压对中压、低压及地	13.54	13.82	15.58
中压对高压、低压及地	19	18.08	18.80
低压对高压、中压及地	27.86	26.12	24.20

本次试验结果与 2010 年例行试验结果比对显示：高压对中、低压及地电容量变化率为 2%；中压对高、低压及地电容量变化率为 4.8%；低压对高、中压及地电容量变化率为 6.2%。

本次试验结果与 1999 年交接试验结果比对显示：高压对中、低压及地电容量变化率为 11.5%；中压对高、低压及地电容量变化率为 1%；低压对高、中压及地电容量变化率为 15.1%。

由于两同轴导体圆柱间的电容量公式 $c = 2\pi\epsilon / \ln(b/a)$ (b 为外圆半径； a 为内圆半径) 可知，若绕组间距离变小，则电容量变大，反之正好相反。因此，根据电容量试验结果推断：2010 年前变压器已发生较明显变形，C 相中压有向低压塌陷的趋势。

短路冲击情况与变压器抗短路能力分析

缺陷变压器中压侧共发生七次出口短路，2004 年、2005 年分别发生中压侧母线短路故障各一次；2011 年线路开关速断保护动作两次；2012 年线路开关速断保护动作三次。从电容量变化趋

势来看，2004 年、2005 年中压侧发生的母线故障是造成中压 C 相绕组变形的主要原因。

2000 年前后生产的变压器，其制造工艺、线圈材料相对落后，变压器抗短路能力也未建立相应的考核指标或标准，随着电网短路水平的提升，其抗短路能力将凸显不足。缺陷变压器制造厂提供的最大短路耐受电流为 12.52 kA，根据电网运行方式，该变压器 35 kV 电网短路水平为 13.499 kA。如变压器继续运行，发生出口短路时，该变压器损坏概率极高。

解体检查

对缺陷变压器进行吊罩、解体，以验证分析结论的准确性。

1) 拔出上铁轭，打开 C 相上压板并拆除部分角环后，发现 C 相中压存在变形情况，如图 2 所示。

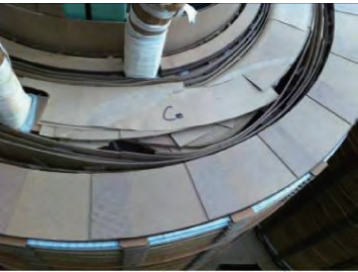


图 2 去除上压板后检查情况

2) 拆除高压围屏，发现 C 相高压有很轻微的局部变形情况，应为受 C 相中压变形挤压所致，如图 3 所示。由于高压线圈与中压线圈间存在内衬硬纸筒和绝缘纸板，且线圈间有一定的间距，因此，中压线圈变形凸起对高压线圈影响不明显。



图 3 C 相高压线圈检查情况

3) 拔出高压线圈，发现 C 相中压绕组发生变形严重，中压出线一侧的线圈向内塌陷，并在

两边上、下部分形成两处明显凸起，相隔四个撑条档，凸起处的线圈绝缘已有破损现象，如图 4 所示。线圈变形程度和趋势与绕组变形综合诊断结论一致。



图 4 C 相中压线圈变形情况

4) 拔出中压线圈，发现 C 相低压线圈外表面上、下部分受中压线圈挤压凹进变形，但变形不明显，如图 5 所示。

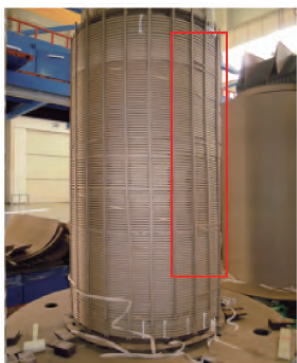


图 5 C 相低压线圈检查情况

结束语

绕组变形综合诊断结论与解体结果完全相符，变压器中压 C 相发生严重的辐向变形，受短路力作用，出线一侧的线圈向内塌陷，凹进变形，挤压力使线圈两边上、下部分形成两处明显凸起，变压器绝缘并未损坏，但已有破损现象，若继续运行，很有可能会发生匝间短路或者相间短路。C 相高、低压线圈受中压线圈变形的影响，有轻微的局部变形情况，但不明显。采取如下措施解决。

1) 在运 220 kV 及以上主变压器应留存绕组变形原始记录。对于没有平衡绕组的变压器应留存频响特性测试数据；对于有平衡绕组的变压器，由于平衡绕组接线方式的不对称，可能造成各绕

组频响曲线拟合度较低，应留存低电压阻抗测试数据。

2) 推进并规范 220 kV 主变压器短路冲击的统计工作。变压器中、低压侧发生近区或出口短路故障，受总开关动作或线路开关速断保护动作时，应详细记录故障电流和故障时间，有条件时记录故障电流和电压波形。

3) 加强绕组变形试验管理，强化绕组变形试验综合诊断。当变压器发生近区或出口短路，短路电流超过额定电流的 4 倍，持续时间超过 1 s，或经受多次短路电流冲击，应及时安排停电，进行绕组变形诊断分析。在无法确定变压器是否遭受过短路冲击的情况下，建议每六年进行一次绕组变形试验。强化绕组变形综合分析，利用频响特性法、低电压阻抗法和绕组电容法及其他化学、电气手段，综合分析绕组变形趋势。

4) 梳理 220 kV 主变压器绕组 35 kV、10 kV 线圈材料，建立相应的管理措施。对于采用自粘性换位导线，其抗短路能力较好，可采用正常维护方式；对于扁铜线，其绕组抗短路能力较差，但变形后仍可能继续运行，应加强变形试验诊断；对于非自粘性换位导线，其不但抗短路能力一般，且一旦变形将直接发生匝间短路，应结合运行工况和历史情况尽快安排改造。

5) 推进抗短路能力治理工作，强化外部运行环境治理。研究中、低压出口加装串联电抗器、选用高阻抗变压器及调整保护等措施的现场应用。排查“十八项反措”执行情况，包括低压母线绝缘化等。加强主变压器出口电缆终端接头、开关柜和主变压器单元内一次设备隐患排查。

参考文献

- [1] 姚森敬，欧阳旭东，林春耀. 电力变压器绕组变形诊断分析[J]. 电力系统自动化，2005，29(18): 95-98.
- [2] 何平，文习山. 变压器绕组变形的频率响应分析法综述[J]. 高电压技术，2006，32(5): 37-40.
- [3] 毕建刚，王献丽，高克利. 变压器绕组变形现场测试中应注意的问题[J]. 变压器，2009，46(12): 29-31.

(下转第 99 页)

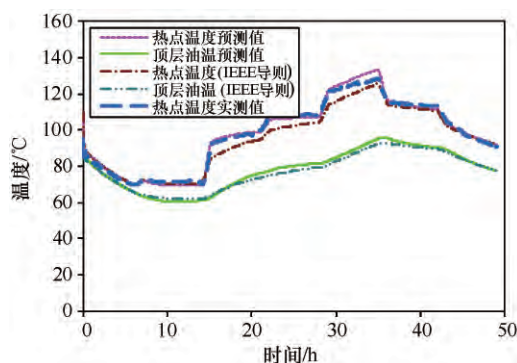


图4 与 IEEE 导则方法的比较

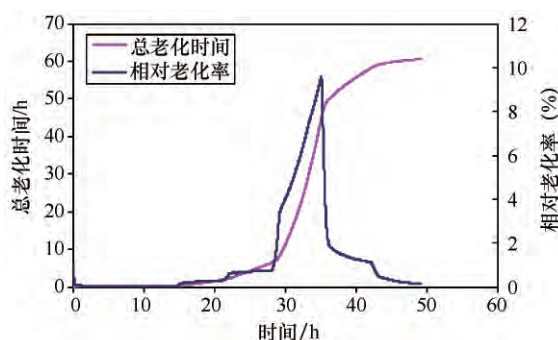


图5 变压器寿命损失

对绕组热点处油道油温的温升四部分,有效解决了油道油温和顶层油温的时间差问题,从试验验证结果中可以看出,本模型能较为有效地预测出绕组热点温度。同时在热点温度的计算基础上,研究了变压器寿命损失,实现对变压器绝缘寿命的大致预测,为变压器的运维决策提供重要的参考指标。但本方法在热点温度预测方面需要的设备相关参数较多,涉及设备设计和出厂试验参数。为满足对绝缘寿命更为准确的预测,下一步研究

应综合考虑微水含量、氧气及酸值等因素对变压器绝缘寿命的影响。

参考文献

- [1] IEC 60076 - 7 Loading Guide for Oil - Immersed Power Transformers [S]. 2005.
- [2] IEEE Std C57. 91: 1995 (R2002) IEEE Guide for Loading Mineral - Oil - Immersed Transformers [S]. 2002.
- [3] 江淘莎,李剑,陈伟根,等. 油浸式变压器绕组热点温度计算的热路模型 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (7): 1635-1640.
- [4] Swift GIMolinski T S, Lehn W A. Fundamental approach to transformer thermal modeling - Part 1: Theory and equivalent circuit [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16 (2): 171-175.
- [5] Dejan Susa, MattiLehtonen, HasseNordman. Dynamic thermal modeling of power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 197-204.
- [6] Linden W Pierce. Predicting liquid filled transformer loading capability [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30 (1): 170-178.
- [7] Kshira T Muthanna, AbhinandaSarkar, Kaushik Das, et al. Transformer insulation life assessment [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (1): 150-156.
- [8] 邓建钢,王立新,聂德鑫,等. 内置光纤光栅油浸式变压器的研制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (24): 160-167.

(收稿日期: 2014-02-08) EA

(上接第 95 页)

- [4] 曹小龙,胡春梅,曹小虎,等. 变压器频率响应法测试结果的影响因素分析及改善 [J]. 高压电器, 2012, 48 (7): 81-86.
- [5] 李晨,李强,孙昭昌. 变压器绕组变形的影响因素及出口短路后分析 [J]. 变压器, 2013, 50 (8): 66-70.
- [6] 国家电网公司运维检修部. 十八项电网重大反事故措施(修订版)及编制说明 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

- [7] 陈巧勇,任红,罗平,等. 电力变压器绕组变形的综合诊断法 [J]. 高压电器, 2011, 47 (7): 50-53.
- [8] 王丽君,刘勋. 一起电力变压器绕组变形的综合分析 [J]. 变压器, 2011, 48 (6): 68-70.
- [9] 刘海峰,刘宏亮,唐亮. 变压器绕组变形的诊断与分析 [J]. 变压器, 2008, 45 (6): 61-63.
- [10] 龙凯华,杨海超,马继先,等. 电力变压器绕组变形诊断有效性研究 [J]. 变压器, 2013, 50 (9): 54-57.

(收稿日期: 2014-01-03) EA