

大型电力变压器振动法故障诊断的现状与趋势

冯永新¹, 邓小文¹, 范立莉², 刘石¹, 王飞¹, 肖小清¹

(1. 广东电网公司 电力科学研究院, 广州 510600; 2. 广州粤能电力科技开发有限公司, 广州 510600)

摘要: 振动法故障诊断是近年来兴起的变压器故障诊断新方法, 正成为常规法故障诊断的有力补充, 在大型变压器故障诊断中发挥着越来越重要的作用。对振动法故障诊断的原理、作用、技术要求等方面进行了分析, 结合相关电力规范提出了振动法故障诊断的要点, 并阐述了振动法故障诊断在今后一段时期内发展趋势及值得关注的若干问题。

关键词: 变压器; 振动方法; 故障诊断

Status and Trend of Large Power Transformer's Faults Diagnosis with the Vibration Method

FENG Yong-xin¹, DENG Xiao-wen, FAN Li-li, LIU Shi, WANG Fei, XIAO Xiao-qing

(1. Guangdong Power Test & Research Institute, Guangzhou 510600, China;

2. Guangzhou Yueneng Power Technology Co. Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: Developing fast in recent years, the vibration method becomes a powerful substantial supplement of the traditional method for power transformer's faults diagnosis, and especially for the large power transformer it takes a more and more important position. This paper analyzes the principle, function and technic requirements of the vibration method faults diagnosis, focusing on the key issues of the vibration method faults diagnosis in combination with correlative codes on transforms, and the development trend and the notable technology aspects of the vibration method faults diagnosis.

Key words: transformer; vibration method; faults diagnosis

在电力系统的各种设备中, 变压器的价值既十分昂贵, 作用也十分重要。主变压器能否安全可靠运行, 直接关系到电网的安全运行。要使主变压器安全运行, 提高供电可靠率, 一方面在设备订货阶段应选用技术过硬、产品质量优异的变压器, 另一方面要不断提高主变压器的运行、维护、检修水平。在长期的理论研究与工程实践中, 变压器的故障诊断积累了许多有效的技术手段与方法, 也取得了很多成果。近年来, 基于振动测试的变压器故障诊断法逐渐成形, 已经成为常规方法的有力补充。

1 变压器振动法故障诊断原理

实际运行中发现, 大容量变压器的油箱表面的振动, 与绕组和磁导体压紧固定的状态是密切相关的。运行中压紧状态的变化可以由振动的改变反映出来, 压紧状态变松则会使振动增大, 频率也发生变化, 进而出现谐振。

变压器器身的振动是由于变压器本体(铁心、绕组等的统称)的振动及冷却装置的振动产生的。

从物理角度来看, 电力变压器器身表面的振动与变压器绕组及铁心的压紧状况、绕组的位移及变形密切相关。因变压器器身各位置处的振动特征与距离最近的振源关系最紧密, 根据变压器器身各处测取振动信号改变的程可方便地判断出是哪一部分绕组、或铁心发生了故障, 即利用振动法监测电力变压器的振动异常可实现故障定位。以往认为, 变压器的本体振动完全取决于铁心的振动。而实际上随着超取向高导磁硅钢片(例如 Hi-B 硅钢片)在变压器制造中的使用, 以及铁心结构设计的改进, 铁心工作磁密的降低, 负载电流产生的漏磁引起的绕组振动大大增加, 这种振动的大小与负载电流的平方成正比。特别是在额定工作磁密低于 1.4 T 时, 绕组的振动甚至会超过铁心磁致伸缩引起的变压器器身的振动。

在空载条件下, 电力变压器负载电流为零, 此时绕组的振动可忽略不计, 器身振动主要是激磁电流作用下铁心的振动引起的。因此, 测量空载条件下运行的变压器器身振动信号即可得到变压器铁心

的振动特性。在负载条件下,线圈中有负载电流流过,因此除了铁心的振动之外,变压器器身振动还包括负载电流作用下的绕组线圈的振动。

一般认为,变压器激磁电流在铁心中产生的主磁通在空载、负载变化时大小基本保持不变,因此铁心的振动在空载、负载及负载变化时也基本不变。利用振动传感器,在空载及负载条件下分别测量变压器器身的振动信号,空载时测得的就是变压器铁心振动信号,负载时是铁心和绕组的振动信号的叠加。从负载时的振动信号中分离出空载时的振动信号显然可以得到绕组的振动信号。

当变压器额定工作磁密比较高(大于1.4 T)时,铁心的振动要远远大于绕组的振动,此时可忽略绕组的振动。在变压器稳定工作时,可以认为其器身振动是铁心振动引起的,振动情况的改变也是由于铁心故障引起的,以此可以诊断电力变压器铁心的状况。在变压器发生短路事故时,绕组线圈中有很大的冲击电流流过,绕组的振动信号不再微弱,可认为其远远大于铁心振动。因此,在短路状况下变压器器身振动主要是由绕组振动引起的,这样可以利用发生短路事故时的变压器器身振动信号,来监测绕组线圈是否发生了变形或松动。

高、低压绕组之一在发生了变形、位移或崩塌后,绕组的压紧不够,使高、低压绕组间高度差逐渐扩大,导致绕组匝间不平衡加剧,使漏磁造成的轴向力增大,从而绕组的振动加剧;当铁心的压紧力不够大时,硅钢片的自重将使铁心产生弯曲变形,致使磁致伸缩增大,即铁心的振动加剧。一般认为这些现象具体表现在振动信号上的特征为:振动频率中增加了更高次的谐波成分,且振动的幅值变大。

正常运行的变压器振动信号,绕组振动信号基本上集中在基频100 Hz处,且振动信号的大小与负载电流平方成正比;铁心振动信号主要集中在100~400 Hz,而1 000 Hz后基本衰减到零。因此,在变压器油箱表面测得的振动信号高次谐波分量是由铁心振动引起,可通过200、300 Hz等高次谐波分量的变化诊断铁心状况。当其变化不大于某一限值时,可确定铁心无故障,然后通过基频幅值的变化诊断绕组状况。这一振动特征为振动法用于监测电力变压器提供了更有效的判据。

变压器大修的目的,主要是进一步把绕组和磁导体压紧、固定好。因此,对大型变压器器身紧固

状态需要进行诊断并提出是否需要进行大修的建议。但是,用传统的试验方法以及通过人孔检查的办法均不能彻底解决问题。值得指出的是,通过对变压器振动参数进行预测可能会发现内部故障发展的最初起因,发现事故苗头,及时组织大修。例如,变压器器身中导线、磁路等固定部件紧固状态开始松动,其发展可使绝缘损伤。虽然绝缘变劣可以通过分析变压器油来判定,但是分析油样所得到的结果只是内部故障后的结果而变压器故障的根本原因却仍不清楚。

振动测量分两种:一种是成套的空载测量;另一种是有载测量。空载时绕组的振动较小,可忽略不计,主要是铁心的振动。有载时,铁心主磁通是稳定不变的,但由于绕组和结构元件有漏磁通,因而其振动应加上绕组的振动和结构元件的振动。不论在何种运行方式下进行测量,都应该测量那些最容易反映故障状况的位置。另一方面,测量点过多,也会使测量系统过于复杂,导致工作效率低。常见的情况一般是取12个振动信号,即将12个振动信号发送器分别安装在变压器油箱外表面规定的各个测振点上。这12个点的分布是每相4个测点。其中每相的高压侧上部和下部各1个测点,低压侧上部和下部各1个测点。由于变压器种类繁多,具体的测量数目及部位可现场根据设备的状态,综合其试验的数据并依据工程师的诊断经验来确定。

2 振动法故障诊断研究的现状

大量实践表明,绕组与铁心是发生故障较多的部件之一^[1-3]。大型电力变压器由于体积更大,通过的电流更大,对绕组的安装工艺要求更严格。通常对变压器进行基本维修的重要目的就是压紧线圈。因此,在决定是否对大型电力变压器进行维修时,非常有必要预测绕组的压紧状况。目前国内外尚无可用于在线或离线监测和诊断变压器绕组状态(松动、变形等)的可靠手段。

从目前国内对变压器进行振动测试与研究的重点来看,大致可以分为三个方面,一是对变压器产生振动的机理进行研究,包括故障原因、故障发展与趋势预测等;二是对变压器产生振动信号的分析,包括谱分析、噪声分离技术等;三是对振动监测分析系统的研制,包括测点布置、信号隔离及故障分析等。

变压器器身的振动是一个复杂的综合表现,包括铁心振动、绕组的振动、变压器器身在干扰状态下的振动及一些环境干扰等。

文献[4]通过贴在变压器器身上的振动传感器来监测空载时变压器器身振动加速度信号的变化情况,从而诊断内部绕组的压紧情况。其优点在于与整个导电系统没有电气连接,可安全、可靠地在线监测。

文献[5]利用先进的振动测试仪和声学测试系统对一台单相三柱式变压器铁心在空载条件下不同位置处的振动和噪声参数进行测量,并在对测试结果进行分析的基础上,提出了减小一般磁路振动和噪声的建议。

文献[6]在理论研究影响铁心及绕组振动各因素的基础上,实验验证了在空载状态下油箱表面测得的铁心振动信号的基频幅值与施加电压的平方以及绕组振动信号的基频幅值与流过绕组的负载电流平方都呈较好的线性关系。同时指出了铁心振动信号中含有高次谐波含量,且与施加电压的平方不存在线性关系,而绕组振动信号主要集中在100 Hz处的分析结果。提出了电网电压波动较大时必须考虑空载电压大小对铁心振动的影响,评价绕组的振动水平时必须考虑负载电流的大小等建议。

由于变压器工作的特殊性,它所产生的振动信号与常规的旋转机械振动信号有很大不同,主要表现在强干扰性、非周期性等。文献[7]提出了一种在不改变变压器运行状况的条件下,通过负载电流与器身振动信号之间的关系,分析得到变压器铁心振动信号的方法。通过这种方法无须空载运行变压器,就可得到铁心的振动信号,从而极大地改善了通过测量变压器的器身振动信号来获得铁心振动信号的方法。

文献[8]为有效诊断铁心和绕组的机械状态,利用小波变换对变压器振动信号进行时域与频域综合分析,提出基于频段-能量分布的变压器铁心和绕组机械故障诊断新方法。试验结果表明,小波变换能够有效地提取振动信号的特征,得到实时振动信号各频段上的能量分布状态,据此可有效在线诊断变压器机械故障。

变压器振动监测分析系统则是理论研究的最后工程应用,综合反映了科技人员对于利用振动法对变压器进行故障诊断的全面努力。文献[9]介绍了振

动法监测电力变压器铁心及绕组状况的原理。根据对测量对象等的分析,在合理选择了传感器、电荷放大器及采取了一系列的抗干扰措施后,设计并组成了一套完整的测试系统。由于高电压特性,电力变压器在运行过程中随时可能发生短路故障。如果在被突然短路的变压器内部绕组发生故障,导致带电绕组与油箱接触,油箱可能带有很高电压。另外,暂态感应也会在变压器器身上产生高电位。为了测试仪器以及人身的安全,文献[10]在线测量变压器器身振动信号时,设计了一套光电传输系统。把贴在油箱表面的振动传感器在经电荷放大器转换成电信号,然后送入数据采集卡或者示波器时,实现电隔离。介绍了系统的原理和对其性能进行的研究,结果证明这套光电传输系统具有很好的线性度和幅频特性。

基于振动数据分析的变压器诊断方法最先在电力技术比较发达的国家获得研究及应用。俄罗斯、美国最先开展了这方面的研究,俄罗斯已经有一个专利产品应用于现场在线检测中。国内最早开展这方面研究的是西安交通大学,对变压器应用振动法进行故障诊断的机理与方法进行了初步研究。上海交通大学联合上海电力公司对变压器进行了机械动力学建模,用变压器部件和整体的机械激振下的模态识别得到的参数进行了理论计算,得到了用建模方法分析变压器振动的理论成果。但综合来看,对变压器振动法故障诊断的深入研究仍然有很多工作要做。

3 变压器振动测试的技术要求

变压器的振动测试不同于一般旋转机械或结构件的振动测试,主要是因为变压器本身是工作在高电压和高电流的环境中。一般的传感器及测试系统均含有大量的电子元器件,因而测试系统本身的安全及防干扰性能相当重要。

3.1 国内技术规范中对变压器振动参数的要求

国内多数关于变压器的技术规范中对振动均提出了一定的要求。对国内目前大型电力变压器的振动技术要求进行了归纳。表1是不同技术规范中对变压器(电抗器)振动测试的技术要求。

3.2 振动测试中的若干问题

直到现在,变压器振动测试仍然没有完全满足各种要求的统一规范。对变压器进行振动测量,根

表1 不同技术规范中对变压器(电抗器)振动测试的技术要求

Tab. 1 Specification of Vibration Requirements for T-transformers or Reactors in Different Codes

序号	法规或规范名称	标准号或文件号	振动要求	备注
1	500 kV 油浸式并联电抗器技术参数和要求	JB/T 8751—1998	额定持续电流下的振动不大于 100 μm	-
2	110 (66) kV~500 kV 油浸式变压器(电抗器)技术标准	国家电网生 [2004]634 号	变压器油箱壁的振动限值为不大于 100 μm (峰峰值)	-
3	500 (330) kV 并联电抗器及中性点电抗器的技术参数和要求	GB/T 16274—1996	油箱的机械振动幅度应小于等于 100 μm (峰峰值)	油箱振动测量应在最高运行电压和额定频率下进行
4	10~66 kV 干式电抗器技术标准	国家电网生 [2004]634 号	对于铁心电抗器, 振动最大值不超过 100 μm	实际运行时电流引起的振动频率不在电抗器的固有振动频率附近
5	750 kV 系统用油浸式并联电抗器技术规范	Q/GDW 104—2003	在额定电压下运行时, 油箱振动的最大振幅不应大于 0.1 mm	箱壁振动(峰峰值的位移)需在系统最高电压的情况下测量

据目前的常规做法及兼顾到效果与成本等多种因素, 在做试验前如下因素应综合考虑:

1) 要考虑是对单台变压器做测试还是对全部变压器做测试。

2) 当额定电压和最高连续运行电压不一致时, 要考虑在哪一个电压下进行试验。

3) 要考虑在哪个位置测量及如何进行测量。一般是在油箱的四个侧面, 并取足够的测量点求得平均值。

4) 从运行中的电力变压器油箱表面测取振动信号。虽然这样做会受到来自冷却系统及油箱振动等“噪声”的干扰, 影响所测取的信号, 但只有这种做法, 才可保证测量全过程的简便、快速和投资少的优点。

5) 测量的结果一般用振动波的主波峰的幅值来表示。

6) 对于大容量电抗器, 出厂前要进行振动测量, 作为日后运行振动比较的原始数据。若不可能在制造厂实现振动测量, 可在安装现场进行测试。

4 振动法故障诊断研究趋势

在变电站中, 主变压器、电抗器等能否安全可靠运行, 直接关系到电网的安全运行。传统的试验与诊断方法已不能满足电力系统的大容量化、高电压化发展要求。随着国外成功的研制变压器器身振动带电监测系统, 并在多台大型充油电力变压器上的使用, 振动信号分析法受到众多科研人员的重视。

由于多种原因, 对于这些电气设备在交接试验和运行中的振动特性并没有统一的考核标准。但随

着设备容量增加和对电网可靠性的日益重视, 大型电气设备的振动特性逐步引起了国家相关部门及各企业的重视。国内外对各级别的油浸式变压器及电抗器制定了相关的标准, 例如, 在《电气设备安装工程: 电气设备交接试验标准》中明确要求: 500 kV 电抗器, 在额定工况下测得的箱壳振动振幅双峰值不应大于 100 μm 。在大型电气设备的运行导则中也明显提出在运行中应加强对设备振动的监视, 对稳定运行时变压器油箱壁的振动限值也进行了规定, 避免设备在过大的振动状态下运行。

从目前电气设备的振动测试现状上来看, 大型电机的测试开展较多, 故障诊断工作也取得了很多成果。而大型变压器、电抗器的振动测试开展的工作不多, 通过振动对其进行辅助故障诊断方面的工作则更少。目前, 各地投运的大型电气设备如变压器、电抗器等越来越多。随着容量的增大, 不仅单个电气设备的体积越来越大, 而且由于线圈匝数的增多, 在制造和安装工艺上出现的问题也呈现逐步增加的趋势, 如有些变压器、电抗器一通入电流, 机箱或壳体的振动就呈上升趋势, 导致设备根本无法长期运行。由于振动与制造, 安装及地基结构等可能都存在关系, 因此, 振动已经成为衡量设备能否安全和长期运行的一个重要指标。但长期以来, 除了常规的电流、电压、温升等参数外, 对于振动的测试与分析并没有受到足够的重视, 如何通过监测变压器的振动信号来解决变压器稳定运行时的振动故障问题就成为实际工作中亟待解决的课题。

4.1 变压器振动故障的机理研究

从理论上讲, 亟待加强对变压器振动故障的机

理研究,其中包括:故障模型的建立与分析;振动信号与故障间对应关系;故障判定准则;振动故障的趋势预测;振动信号的测试与分析方法;振动信号的噪声剔除;等等。

4.2 变压器振动故障在线监测诊断系统的研发

从实际系统的研制上看,可以先走离线开发及测试诊断的路子,等技术与方法成熟后再进行在线系统的移植和大规模运用。包括:测试仪器的选择;测试位置的选择;振动测试系统的配置;振动测试系统的抗干扰措施以及诊断系统的软件开发等。

5 结 语

电力变压器器身振动信号与内部绕组及铁心状况密切相关,包含着丰富的信息,开展变压器振动的在线监测工作具有良好的应用前景。

振动法用于电力变压器在线监测的研究目前还没有达到完善、可靠的程度,归纳起来主要有以下几个方面问题需要解决:

1) 由于高压与大电流的存在,如何对变压器、电抗器的振动进行实时监测;

2) 除了常规的电流、电压、温升等参数监测外,如果变压器、电抗器出现了故障,振动变化是否能先于常规参数表现出来;

3) 振动变化与电气设备的故障之间是否存在着一一对应的关系;

4) 对变压器、电抗器的振动故障进行系统和长期监测分析的可能性及其方法;

5) 由于变电站的特殊性,应将专家系统技术在振动故障诊断中加以应用;

6) 由于变电站的特殊性,应将现场的反映大型变压器、电抗器实时运行状况的振动等工艺参数传至一个约定的诊断中心进行远程诊断、故障预测及接受维修建议等。

参考文献:

- [1] 翟季青,刘志清. 变压器故障诊断的综述[J]. 电力设备, 2003, 4(6): 60-61.
ZHAI Ji-qing, LIU Zhi-qing. Overview of Transformer Fault Diagnosis [J]. Electrical Equipment, 2003, 4(6): 60-61.
- [2] 周青山. 电力变压器器身振动带电监测[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 73.
ZHOU Qing-shan. Power-on Vibrancy Monitoring of Active Part of Power transformer [J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 73.

- [3] 汲胜昌,刘味果,单平,等. 小波包分析在振动法监测变压器铁心及绕组状态中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 24-27.
JI Sheng-chang, LIU Wei-guo, SHAN ping, et al. The Application of the Wavelet Packet to the Monitoring of the Core and Winding Condition of Transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 24-27.
- [4] 谢坡岸,金之俭,饶柱石,等. 振动法检测空载变压器绕组的压紧状态[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 188-189.
- [5] 王志敏,顾文业. 高压电器设备磁路振动和噪声特性试验测试分析[J]. 噪声与振动控制, 2004, 24(2): 42-44.
WANG Zhi-min, GU Wen-ye. Experimental Research on Vibration and Noise of Magnetic Circuit of High-Voltage Electrical Apparatus [J]. Noise and Vibration Control, 2004, 24(2): 42-44.
- [6] 汲胜昌,程锦,李彦明. 油浸式电力变压器绕组与铁心振动特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 616-619, 658.
JI Sheng-chang, Cheng Jin, LI Yan-ming. Research on Vibration Characteristics of Windings and Core of Oil-Filled Transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 616-619, 658.
- [7] 汲胜昌,李彦明. 变压器负载条件下提取铁心振动信号基频成分方法的研究[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(2): 64-67.
JI Sheng-chang, LI Yan-ming. [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(2): 64-67.
- [8] 颜秋容,刘欣,尹建国. 基于小波理论的电力变压器振动信号特征研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 165-168, 184.
YAN Qiu-rong, LIU Xin, YIN Jiang-guo. Features of Vibration Signal of Power Transformer Using the Wavelet Theory[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 165-168, 184.
- [9] 汲胜昌,何义,李彦明,等. 电力变压器空载状况下的振动特性研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(5): 47-48.
JI Sheng-chang, HE Yi, LI Yan-ming, et al. Study on The Vibration of Transformer under No Load Condition. 2001, 27(5): 47-48.
- [10] 汲胜昌,王世山,李清泉,等. 光电系统在变压器振动测试中的应用[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 18-20.
JI Sheng-chang, WANG Shi-shan, LI Qing-quan, et al. The Application of Optic-Electro System in Vibration Test of Transformer [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 18-20.
- [11] 汲胜昌,刘味果,单平,等. 变压器铁心及绕组状况的振动测试系统[J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 1-3.
JI Sheng-chang, LIU Wei-guo, SHAN Ping, et al. The Vibration Measuring System for Monitoring Core and Winding Condition of Power Transformer [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(6): 1-3.

收稿日期: 2008-11-25

作者简介:

冯永新(1968-),男,广西人。高级工程师,工学博士,主要从事汽轮机及燃气轮机的调试、试验及振动故障诊断等工作。Tel: 13926029649, E-mail: yongxingf@126.com。

邓小文(1974-),男,湖南人。高级工程师,工学博士,主要从事汽轮机及燃气轮机的调试、试验及振动故障诊断等工作。

范立莉(1981-),女,湖南人。工程师,工学硕士,主要从事汽轮机振动故障诊断工作。