



中华人民共和国国家标准

GB/T 1094.101—2023

代替 GB/T 1094.101—2008

电力变压器 第 101 部分：声级测定 应用导则

Power transformers—
Part 101: Determination of sound levels—Application guide

(IEC 60076-10-1:2016, Power transformers—
Part 10-1: Determination of sound levels—Application guide, MOD)

2023-03-17 发布

2023-10-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 III

引言 V

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 声的物理基础 1

5 变压器和电抗器的噪声源及其特点 4

6 测量原理 12

7 声级测量的注意事项 20

8 工厂试验与现场声级测量的差异 22

附录 A（资料性） 因绕组中谐波电流引起的声级 25

参考文献 30

图 1 近场中不同测量距离 d 的空间平均声强级(实线)和声压级(虚线)模拟 3

图 2 某牌号铁芯钢片施加 50 Hz 交流时最大磁感应强度 $B_{\max}$ 从 1.2 T~1.9 T 之间变化时完整
循环状态下叠片长度的相对变化曲线 4

图 3 无直流偏磁条件下施加峰值磁密 1.8 T、频率 50 Hz 交流时的磁密随时间变化的函数曲线
(光滑线)和叠片长度随时间相对变化的曲线(点划线) 5

图 4 施加 50 Hz 完整交流周波、峰值磁密达到 1.8 T、直流偏磁 0.1 T 时叠片长度的相对变化曲线
示例 5

图 5 施加峰值磁密 1.8 T、频率 50 Hz 交流、直流偏磁 0.1 T 时磁密随时间变化的曲线(光滑线)和
叠片长度随时间相对变化的曲线(点划线) 6

图 6 声级增加值与绕组中直流偏磁电流的关系 6

图 7 负载电流引起的典型声谱 7

图 8 31.5 MVA 变压器的 100 Hz 声压场(彩色)及沿测量路径的声强矢量仿真 11

图 9 由函数 $A(f)$ 导出的 A 计权图 12

图 10 试验环境中影响声压的干扰分布图 14

图 11 传声器布置 15

图 12 穿过试验区域的背景噪声和试品发射的噪声示意图 16

图 13 50 Hz 和 60 Hz 系统中 1/1 倍频程和 1/3 倍频程的变压器音调 17

图 14 声压沿测量路径的空间变化记录 19

图 15 试验环境 20

图 A.1 表 A.2 中给出的星结和角结绕组的电流频谱的电流波形 26

表 1 1 次~15 次变压器音调的 A 计权值 13

表 A.1 谐波电流引起的绕组电动力的分量 25

表 A.2 B6 换流引起的电流频谱 26

表 A.3 试验电流和力分量计算 27

表 A.4 谐波力及试验电流汇总 28

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 1094《电力变压器》的第 101 部分。GB/T 1094 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：总则；
- 第 2 部分：液浸式变压器的温升；
- 第 3 部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙；
- 第 4 部分：电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则；
- 第 5 部分：承受短路的能力；
- 第 6 部分：电抗器；
- 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则；
- 第 10 部分：声级测定；
- 第 101 部分：声级测定 应用导则；
- 第 11 部分：干式变压器；
- 第 12 部分：干式电力变压器负载导则；
- 第 14 部分：采用高温绝缘材料的液浸式电力变压器；
- 第 15 部分：充气式电力变压器；
- 第 16 部分：风力发电用变压器；
- 第 18 部分：频率响应测量；
- 第 23 部分：直流偏磁抑制装置。

本文件代替 GB/T 1094.101—2008《电力变压器 第 10.1 部分：声级测定 应用导则》，与 GB/T 1094.101—2008 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 增加了更多的声场的信息(见第 4 章)；
- 增加了对绕组电流谐波影响方面的考虑(见 5.2)；
- 增加了 A 计权的说明(见 6.2)；
- 增加了声压测量法和声强测量法的信息(见 6.3.2 和 6.3.3)；
- 增加了频段的信息(见 6.4)；
- 增加了测量距离的背景信息(见 6.6)；
- 增加了步行移动测量方式和逐点测量方式的支持信息(见 6.7)；
- 增加了绕组谐波电流引起的附加噪声(见附录 A)。

本文件修改采用 IEC 60076-10-1:2016《电力变压器 第 10-1 部分：声级测定 应用导则》。

本文件增加了第 3 章“术语和定义”，相应的章、条号依次顺延。

本文件与 IEC 60076-10-1:2016 的技术差异及原因如下：

- 在第 2 章增加了对 GB/T 2900.95 的引用；
- 将 4.2.5.3 的最后一段内容由正文调整为注(因涉及的附录 A 为资料性)；
- 为了与 6.2 的内容相协调，删除了 IEC 原文 3.2 最后一段中的“对频率的灵敏度峰值约在 1 kHz，在较低或较高的频率下灵敏度会降低”。

本文件做了下列编辑性改动：

- 纳入了 IEC 60076-101-1:2016/AMD1:2020 的修正内容；

- 为与我国标准协调,将标准名称改为《电力变压器 第 101 部分:声级测定 应用导则》;
- 对公式的编号进行了调整;
- 将 A.3 中的列项调整为条文形式;
- 将表 A.3 表头中的“ i_{Tn} ”调整为“ i_{nT} ”;
- 将表 A.4 中 200Hz 谐波噪声频率所对应的两个试验电流值由“0.630”更正为“0.632”;
- 将 IEC 原文参考文献中的 ISO 3746:2010 调整为规范性引用文件;
- 对参考文献进行了调整。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国变压器标准化技术委员会(SAC/TC 44)归口。

本文件起草单位:沈阳变压器研究院有限公司、保定天威保变电气股份有限公司、中国电力科学研究院有限公司、特变电工衡阳变压器有限公司、正泰电气股份有限公司、西安西电变压器有限责任公司、特变电工沈阳变压器集团有限公司、特变电工股份有限公司新疆变压器厂、明珠电气股份有限公司、吴江变压器有限公司、广东中鹏电气有限公司、顺特电气设备有限公司、浙江江山变压器股份有限公司、成来电气科技有限公司、天津市特变电工变压器有限公司、海鸿电气有限公司、常州西电变压器有限责任公司、合肥元贞电力科技股份有限公司。

本文件主要起草人:张显忠、郭满生、王欣盛、苏钟焕、官俊军、张鹏飞、董春光、虞金华、蔡定国、林灿华、韩宝家、肖明、姜振军、郑国培、赵文忠、许凯旋、陈辛夫、熊世锋。

本文件所代替文件及其的历次版本发布情况为:

- 2008 年首次发布 GB/T 1094.101—2008;
- 本次为第一次修订。

引 言

电力变压器标准的制定,是为了给电力变压器建立一套最佳的评价准则,为电力变压器从原材料选择、设计、生产、检验、选用、运行、维护等方面所需的注意事项提供指导。GB/T 1094 旨在确立适用于电力变压器的设计、制造、试验、运行、维护等方面的遵循原则和相关规则,拟由 16 个部分构成。

- 第 1 部分:总则。目的在于确立适用于各类电力变压器设计制造和生产试验等所需要遵循的总体原则和相关规则。
- 第 2 部分:液浸式变压器的温升。目的在于确立适用于各类液浸式电力变压器有关温升方面的技术要求和试验方法。
- 第 3 部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙。目的在于确立适用于各类液浸式电力变压器有关绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙方面的技术要求和绝缘试验方法。
- 第 4 部分:电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则。目的在于确立适用于各类电力变压器和电抗器有关雷电冲击试验和操作冲击试验方面的技术要求和试验方法。
- 第 5 部分:承受短路的能力。目的在于确立适用于各类电力变压器有关承受短路能力方面的技术要求和试验方法。
- 第 6 部分:电抗器。目的在于确立适用于各类电抗器的技术要求和试验要求。
- 第 7 部分:油浸式电力变压器负载导则。目的在于对各类油浸式电力变压器有关带负载运行时提供指导。
- 第 10 部分:声级测定。目的在于确立适用于各类电力变压器和电抗器有关声级测定方面的技术要求和试验方法。
- 第 101 部分:声级测定 应用导则。目的在于对各类电力变压器和电抗器有关声级测定应用方面提供指导。
- 第 11 部分:干式变压器。目的在于确立适用于各类干式电力变压器的技术要求和试验要求。
- 第 12 部分:干式电力变压器负载导则。目的在于对各类干式电力变压器有关带负载运行时提供指导。
- 第 14 部分:采用高温绝缘材料的液浸式电力变压器。目的在于确立适用于各类采用高温绝缘材料的液浸式电力变压器的技术要求和试验要求。
- 第 15 部分:充气式电力变压器。目的在于确立适用于各类充气式电力变压器的技术要求和试验要求。
- 第 16 部分:风力发电用变压器。目的在于确立适用于各类风力发电用变压器的技术要求和试验要求。
- 第 18 部分:频率响应测量。目的在于确立适用于各类电力变压器有关频率响应方面的技术要求和试验方法。
- 第 23 部分:直流偏磁抑制装置。目的在于确立适用于各类直流偏磁抑制装置的技术要求和试验要求。

GB/T 1094 通过 16 个部分明确了各类电力变压器和电抗器等产品的技术内容,给出了具体的技术要求、试验项目、试验程序、试验方法及运行指导等。通过确立各类产品明确的范围、术语、技术要求和试验要求等,让从事相关产品设计、生产、试验、使用及运行维护等方面的人员能够更加清晰、准确地进行操作,从而为设计、制造高质量的产品奠定基础,更好地促进贸易、交流和技术合作,并为我国电网的正常运行提供保障。

本文件与 GB/T 1094.10 结合使用。

电力变压器

第 101 部分：声级测定 应用导则

1 范围

本文件向制造方及用户就如何使用 GB/T 1094.10 所规定的测量技术提供了指导。除基本的声学原理外,本文件还阐述了变压器和电抗器的噪声源和特性,给出了进行测量的实际指南,讨论了可能影响测量方法准确度的各种因素,也阐明了工厂测量值与现场测量值不同的原因。

本文件适用于变压器和电抗器及其相关的辅助冷却设备。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 1094.10—2022 电力变压器 第 10 部分:声级测定(IEC 60076-10:2016,MOD)

注:GB/T 1094.10—2022 被引用的内容与 IEC 60076-10:2016 被引用的内容没有技术上的差异。

GB/T 2900.95 电工术语 变压器、调压器和电抗器(GB/T 2900.95—2015,IEC 60050-421:1990,NEQ)

GB/T 3768—2017 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 采用反射面上方包络测量法的简易法(ISO 3746:2010,IDT)

3 术语和定义

GB/T 2900.95 和 GB/T 1094.10—2022 界定的术语和定义适用于本文件。

4 声的物理基础

4.1 现象

声音为人耳能感受到的(在空气、水或其他弹性媒质中的)压力变化波。此压力变化波通过媒质(本文件指空气)从声源传递到听者的耳朵内。

每秒发生周期性压力变化的次数称为声音的频率,其测量值的单位为赫兹(Hz)。声音的特定频率感知为独特的声调或音高。变压器的嗡嗡声基本上是 100 Hz 或 120 Hz 的低频声,而汽笛声则是高频声,其典型频率值超过 3 kHz。健康青年人的正常听力范围约为 20 Hz~20 kHz。

4.2 声压 p

在特定位置和给定时间间隔的瞬时声压的方均根值称为声压,其测量值的单位为帕斯卡(Pa)。

声压是标量,只用其幅值表示其特征。

健康人耳能感受到的最弱声压与频率有明显关系。一般在 1 kHz 下为 20 μ Pa。可感受到痛阈对应于该值的百万倍,甚至更高,如 20 Pa。由于范围太大,为了避免使用很大的数值,因此采用分贝(dB)

作为标度。分贝的标度是对数,20 μPa 作为基准值,对应于 0 dB;20 Pa 是痛阈,对应 120 dB。

另一个实用观点是,与线性刻度的帕斯卡值相比,分贝标度更接近人的听力感受。这是因为人耳是按对数形式对声音做出反映的。

在声音领域普遍接受的观点是:

——1 dB 的变化感觉不到;

——3 dB 的变化可感觉到;

——10 dB 的变化感觉到声音大了两倍。

人类听觉依赖频率。在较低或较高的频率下灵敏度会降低。一种名为“A 计权”的国际化标准滤波器能够确保测量的声音反映出在整个听力范围中人耳感受到的声音(见 6.2)。

4.3 速度 u

在指定位置和给定时间间隔的瞬时速度的方均根值称为速度,其测量值用米每秒(m/s)表示。

该量描述了传递声波的媒质的振荡速度。它既有幅值又有方向,因此是一个矢量。

4.4 声强 $\bar{I}$

声强是表示某一指定位置处声压与质点速度乘积的时间平均值,见公式(1):

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_T (p(t) \times \bar{u}(t)) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

声强的单位用瓦特每平方米(W/m^2)来表示。

声强是描述单位面积声功率流入量的既有大小又有方向的矢量。而法向声强是法向单位面积声功率的流入量,即在垂直于指定单位面积方向的量值。

声功率流的方向取决于指定位置速度的相角。

4.5 声功率 W

声功率是单位时间内从声源辐射出的声能,单位用瓦特(W)表示。

声源向周围空气辐射声能,从而形成声场。声功率标识了声源的发射特征。声压和质点速度标识了指定位置声音的特性。用传声器测到的或听到的声压取决于与声源的距离和周边声学环境的性质。因此声源的声功率不能简单量化为测量的声压或声强。声功率确定取决于整个包络表面上声强或声压的积分。声功率或多或少独立于环境,是标识声源特性的唯一表述。

4.6 声场

4.6.1 概述

声场是传播声波的区域。按照声波传播的方式进行分类。

当声压与速度相位相同时,相应的声场为有功场。当声压与速度之间呈 90° 相位角时,相应的声场为无功场。在有功场中,声能完全从声源向外传播,如同在远场(见 4.6.5)传播。在无功场中,声能也是向外传播,但在稍后的瞬间,能量又会返回,能量好像在弹簧中那样可贮存。无功场的例子如混响室的扩散场(见 4.6.3)和驻波(见 4.6.6)。尽管存在声压和速度,无功场在一个周波内平均的净传输能量为零,因此测得的声强等于零。

实际声场具有有功和无功两个分量。

4.6.2 自由场

在均匀各向同性媒质中,边界对声波的影响可不计的声场称为自由场。这是一个理想的自由空间,声能在其中传播不受干扰。

在离地面和墙壁足够远的露天环境,或者在一个当声音到达墙壁、天花板或地面时都被完全吸收的消声室,就可视为具备自由场的条件。

声音从自由场中某个理想点源向四周传播,当沿声音传播方向到声源的距离加倍时,其声压级和声强级便降低 6 dB。当距面源的距离足够大,以致于可把面源看做理想点源时,上述规律也近似正确。

当测量电力变压器声级时,除了地面的反射,测量场所要接近自由场的条件。

GB/T 1094.10—2022 要求所有声级测量应在一个反射面(地面)上方进行,因此不允许在完全消声室内进行测量。

4.6.3 扩散场

在扩散场中,声音经过多次反射导致声场中声音的方向和幅值都相同,因此所有位置的声压级相同,且声强接近于零。混响室便是近似的扩散场,按照能量守恒定律,当混响室边界吸收或传递的声功率等于声源发出的声功率时,便处于平衡状态。因此,在声音吸收或传递特性低的环境中便有可能出现声压级非常高的情况。

扩散场的实例如变压器隔声罩内的区域。

4.6.4 近场

近场是指与声源振动表面相邻的区域,一般规定为拟测频率的声音波长的 1/4 距离以内。此区域存在有功分量和无功分量。无功分量随测点与声源振动表面的距离呈指数衰减。

如果振动结构的弯曲波长比声源的波长短,就会产生无功分量。此时,声发射呈现为在临近的过压与欠压区之间的声学上的短路状态。在此声学短路状态下,空气就像一个质量弹簧系统在一个周波内储存和释放能量。结果是部分声功率一直循环,不是所有的能量都发射至远场(见 4.6.5)。

近场效果随频率增加而减小。

由于近场中声压与速度之间固有的相位差(见 4.6.1),因此近场中进行声压测量会引起系统性高估(见图 1)。结果是,通常空间平均声压级比相应声强级高 2 dB~5 dB,且某些点测量的差值可高达 15 dB。

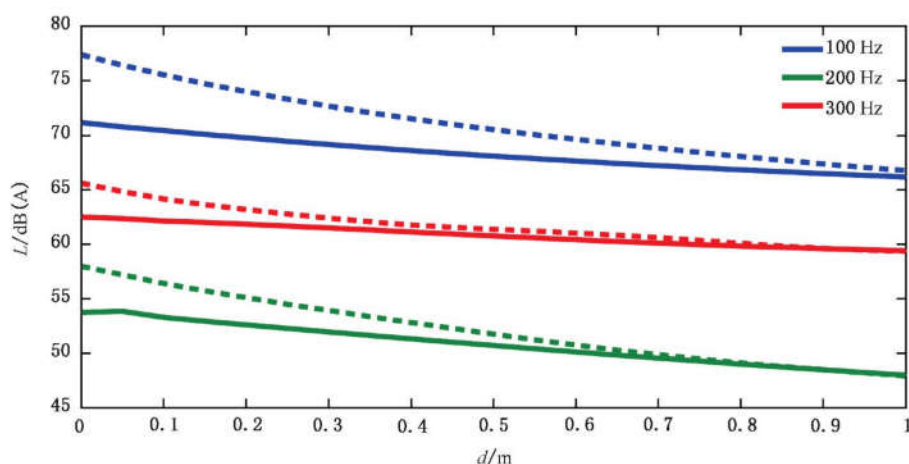


图 1 近场中不同测量距离 d 的空间平均声强级(实线)和声压级(虚线)模拟

4.6.5 远场

远离声源一定距离后,由声源大小和形状等带来的固有干扰以及其他干扰变得不明显,此时的声场称为远场。在这种场中声源可被视为理论上的点源,接近于自由场存在的条件。

4.6.6 驻波

驻波是向相反方向传播的两个相同频率声波间干涉的结果。驻波的形成是由于声源与不连续结构(如声场边界)之间的反射,而且重点在于反射墙是平行的并且此时声音频率与距离之间满足一定的条件。频率为 f_v 的驻波的出现取决于反射墙之间的距离 d ,见公式(2)。

$$f_v = v \frac{c}{2d}$$

.....(2)

式中:

c ——声音在空气中的速度,单位为米每秒(m/s)(20 ℃时, $c = 343 \text{ m/s}$);

v ——其值为 1、2、3、.....

驻波不向远场传播能量,这是一个无功场的例子。

在驻波的区域:

- 所测声压在很小的距离内会发生较大变化,声压有被高估的趋势;
- 声强测量值趋向不准确,实际声强被低估。

5 变压器和电抗器的噪声源及其特点

5.1 概述

变压器和电抗器的噪声有几个固有的物理来源。这些噪声来源与设备的设计和运行条件有密切的关系。设计将影响产生噪声的振动,并影响由声源到变压器油箱或外壳表面的传播以及最终声音发射到空气中。

5.2 声源

5.2.1 铁芯

磁致伸缩是铁磁材料在磁密(磁感应强度)变化时观察到的尺寸变化。在电工钢铁芯中,当磁密为典型值时,其每米长度下的尺寸变化为 $0.1 \text{ }\mu\text{m} \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ 。图 2 表示某牌号铁芯片在五种不同的磁密下的磁致伸缩与磁密的关系曲线。图中每个回环曲线表示为 50 Hz 时尺寸的变化与磁密 B_{max} 的对应关系。

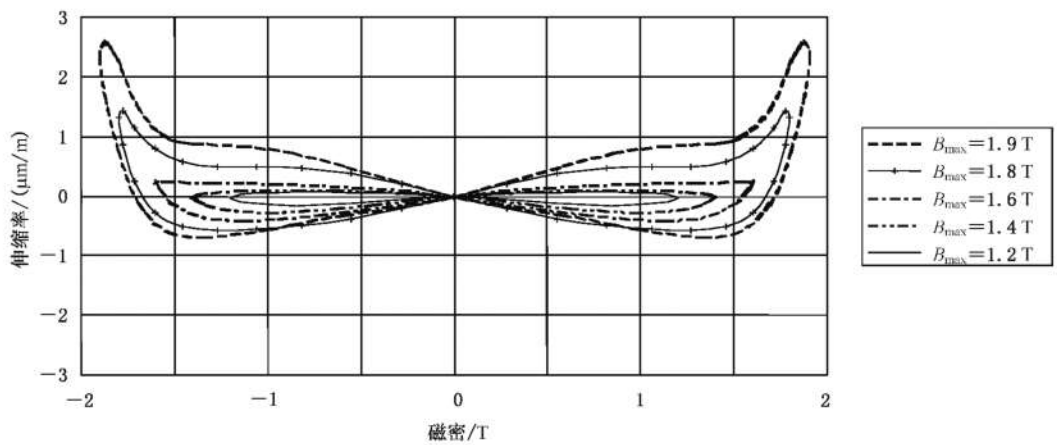


图 2 某牌号铁芯钢片施加 50 Hz 交流时最大磁感应强度 B_{max} 从 1.2 T~1.9 T 之间变化时完整循环状态下叠片长度的相对变化曲线

注:铁芯片机械应力对磁致伸缩有严重影响。

这种尺寸变化与磁密的极性无关,只与其幅值和其材料结晶轴之间的相对方向有关。因此在正弦磁通励磁下,尺寸变化的基波频率是励磁频率的两倍。尤其是在磁密值接近饱和的情况下,这种效果很明显是非线性的。非线性将在铁芯振动频谱中引起明显的谐波分量。图 3 表示当 $B_{\max}=1.8\text{ T}$ 、频率为 50 Hz 的磁致伸缩曲线。尺寸变化的频率是励磁频率的两倍,在 5 ms 和 15 ms 处的峰值难以区分。

变压器铁芯发出的声音与振动的速度有关,即与磁致伸缩(图 3 中的点划线)变化的速率有关。这导致了频率为两倍励磁频率的基波中谐波(畸变)的放大。在频谱中将会看到一些等于励磁频率偶数倍的频率。此时,两倍于励磁频率的基波分量成分很少作为 A 计权声波最重要的频率分量。

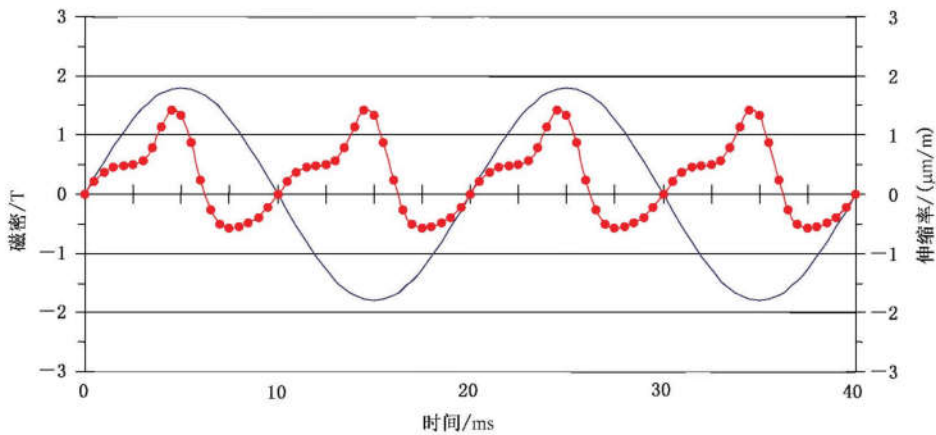


图 3 无直流偏磁条件下施加峰值磁密 1.8 T、频率 50 Hz 交流时的磁密随时间变化的函数曲线(光滑线)和叠片长度随时间相对变化的曲线(点划线)

如果磁通中有直流偏磁,例如在此前测量绕组电阻时残留了剩磁,或在电流中含有直流分量,则这些都会导致磁致伸缩的明显的非线性,从而引起振动幅度显著增大。由于励磁中有直流偏磁,因此与正负峰值磁密对应的磁致伸缩峰值有明显差异,见图 4 的磁致伸缩回环曲线。

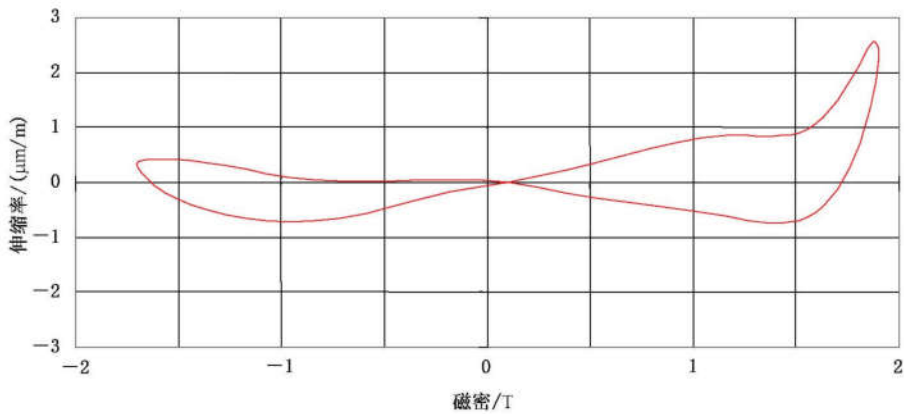


图 4 施加 50 Hz 完整交流周波、峰值磁密达到 1.8 T、直流偏磁 0.1 T 时叠片长度的相对变化曲线示例

振动模式每个周期(50 Hz 系统中即 20 ms)就会重复,在励磁频率下显示出磁致伸缩(见图 5)。频谱中奇次谐波的出现明显地表明了励磁中直流偏磁的存在。

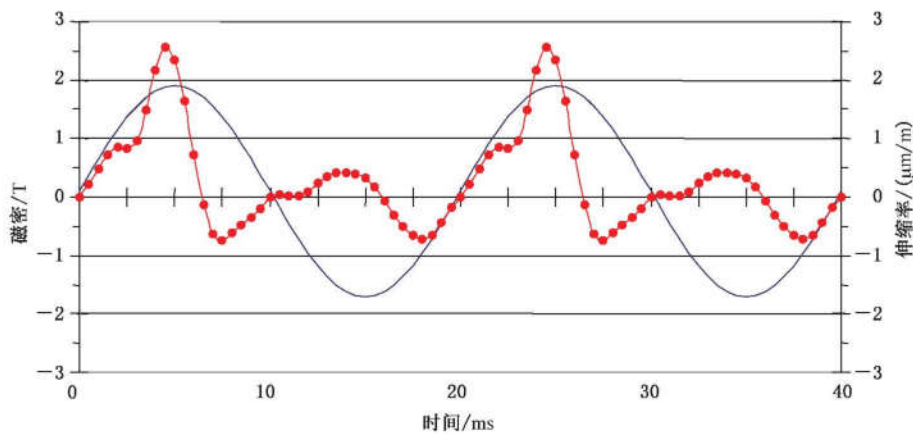
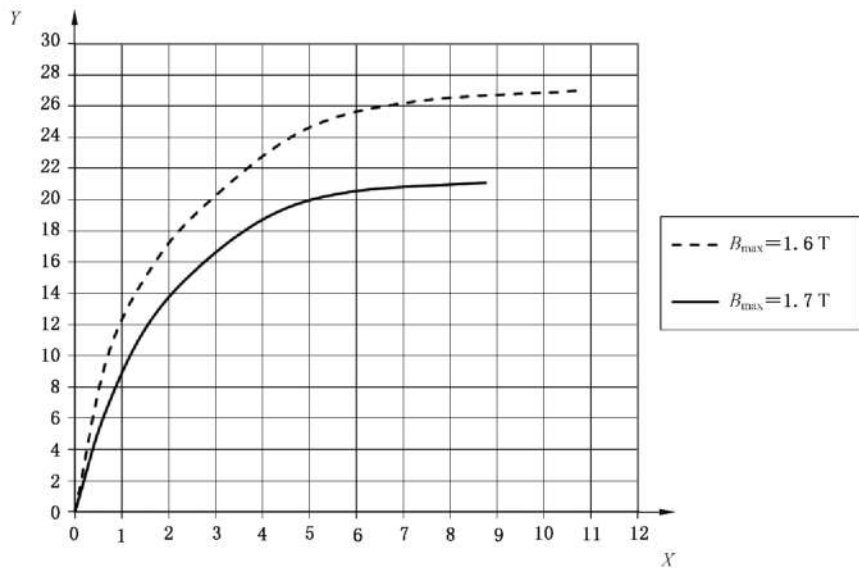


图5 施加峰值磁密 1.8 T、频率 50 Hz 交流、直流偏磁 0.1 T 时磁密随时间变化的曲线（光滑线）和叠片长度随时间相对变化的曲线（点划线）

磁化过程中的直流偏磁会严重影响变压器的声级,因此在进行变压器声级试验前应通电消磁,直到励磁涌流和剩磁效应消失且声级稳定。

直流偏磁电流与空载电流方均根之比,对于预测因直流偏磁电流导致的声功率增加是一个重要的参数。在许多大型电力变压器上已经对直流偏磁电流与空载电流方均根之比与声级增加的关系进行了测量。图 6 列出了其中的一组数据。



标引序号说明：
X 轴——直流偏磁电流,用以交流空载电流(方均根值)为基准的标么值来表示；
Y 轴——总声级增加值,单位为 dB(A)。

图 6 声级增加值与绕组中直流偏磁电流的关系

注：图 6 所示的是某种设计结构的大型电力变压器的结果,其铁芯用高导磁电工钢片制成。其他结构的变压器(例如铁芯采用不同的型式或不同牌号的材料),尽管曲线有细微的差别,但曲线向上变化的趋势不变。

5.2.2 绕组

变压器和电抗器绕组的负载电流产生以励磁频率振荡的磁场。其结果是产生作用在绕组的轴向和

幅向上的电磁力。这些力的幅值取决于负载电流和磁场的幅值,而磁场本身是负载电流的函数。因此绕组中的电磁力与负载电流的平方成正比,同时其频率是励磁频率的两倍。绕组振动的幅值取决于导体与电气绝缘材料的弹性特性以及机械本征频率(绕组固有频率)与振动频率的接近程度。在绕组卷制紧密而又紧固良好的情况下,在正常运行电流产生的位移范围内绝缘材料的弹性特性几乎是线性的。而金属材料本身具有良好的线性特性。因此谐波振动通常是很小的,绕组的振动频谱(见图 7)主要是基波频率(两倍于励磁频率)的。

绕组位移及其振动速度与电磁力成正比,而电磁力与负载电流的平方成正比。振动体发射的声功率与振动速度的平方成正比(见 5.4)。因此,绕组振动产生的声功率随负载电流的四次方而变化。

由负载电流谐波引起的声谱是:两倍的各电频率分量、任意两个电频率之和分量以及任意两个电频率之差分量的合成。这些谐波电流下的声谱对变压器和电抗器的声级有明显的影响,见 5.2.5。

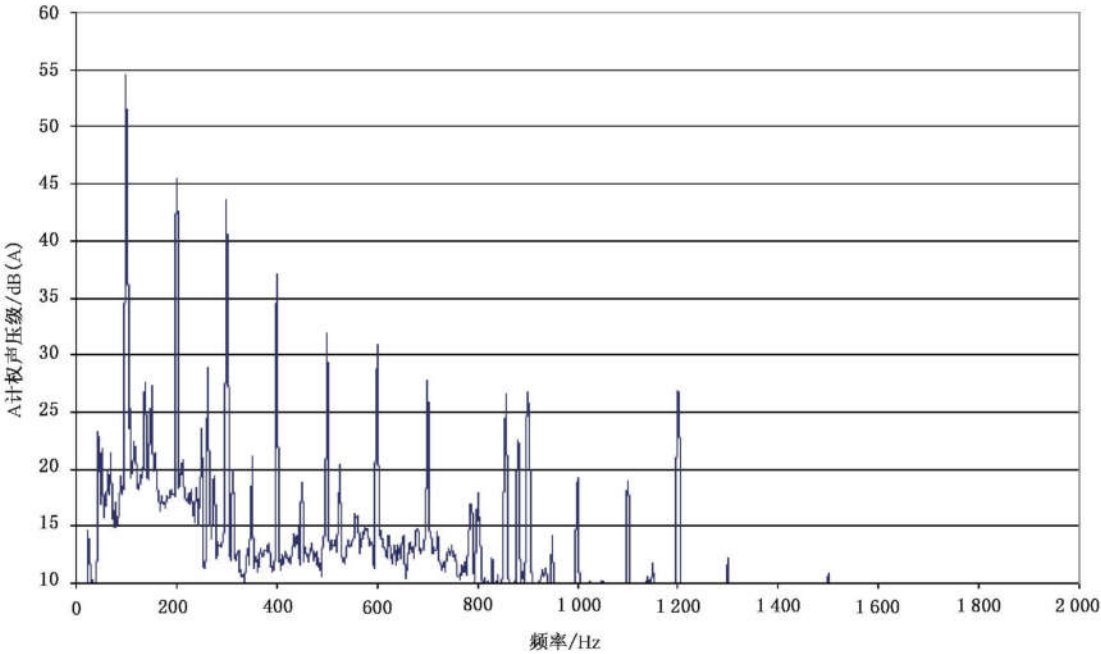


图 7 负载电流引起的典型声谱

5.2.3 杂散磁通控制措施

运行中变压器的杂散磁通与绕组及其相连的引线有关。应通过控制杂散磁通来减少涡流损耗,以避免油箱等固定金属结构件出现过热。有以下三个可行的途径控制杂散磁通:

- 采用电工钢叠片制作的磁屏蔽将漏磁通导入可控路径,这些导引部件通常称为磁分路或油箱磁分路;
- 采用铜屏蔽或铝屏蔽,通过屏蔽中的涡流回路抑制杂散磁通;
- 优化油箱尺寸,这样就无需控制杂散磁通。

由于电磁力和磁致伸缩,造成上述杂散磁通的控制措施以及油箱本身也是振动的振源,它们会影响总的声功率级。

杂散磁通控制措施的安装方法可能会影响声功率级。

5.2.4 电抗器声源

单相电抗器和三相电抗器有多种类型,一般在设计上采用两种不同的技术。

- 在空心电抗器中,绕组中因负载电流产生的声功率占主导,流过绕组的电流与其磁场相互作用

引起绕组振动力。尽管可明确地定义电动力,但绕组结构的振动响应是复杂的。其振动幅值、声发射面积的大小和发射效率决定了声功率。声功率由绕组辐向振动的幅值决定(因绕组代表了发射面的主要部分)。绕组轴向振动和其他部分对总的声功率的影响通常较小。

——在带磁屏蔽的电抗器(有或无间隙铁芯)中,随着磁通量增大,铁轭间磁场力倾向于缩小间隙;产生的周期性位移是主要的噪声源。这种力机械地作用于整个电抗器磁回路,导致噪声频谱主要是两倍励磁频率及其前几个低次谐波。磁致伸缩、绕组振动和杂散磁通控制措施也是造成声功率的原因。

注:不同类型电抗器的定义见 GB/T 1094.6。

5.2.5 变压器和电抗器绕组中谐波电流的影响

5.2.5.1 通则

正如 8.6 所指出的,电力电子设备是一个谐波电流源。其对总的声功率级的影响是明显的。

谐波电流频谱(幅值和相位)应由电力电子设备的用户或制造方确定,以预估设备实际运行的声功率级。如果相位难以得到,也可采用统计方法。

由绕组中的谐波电流产生的附加噪声的理论和工程实践的详细信息参见附录 A。

变压器和电抗器发射的声功率取决于所有频率下的电流,但通常只有电流频谱中的基波或最显著的谐波电流起主要作用。

由谐波电流引起的附加声功率可通过下列两种不同的方法来确定:

- 用单个频率激励和测量(通常适用于特殊电抗器,如滤波电抗器);
- 通过计算单个频率的贡献。

5.2.5.2 单个频率分量声级的测量

本试验需要确定一组谐波励磁电流,以代表对声级起显著作用的谐波电流。

因为工频电流试验和其他频率的电流试验通常不能同时施加,变压器和电抗器可能需要先后进行工频和其他谐波频率电流的试验。此时,变压器和电抗器应在特定的电流和频率下进行试验,此特定电流和频率不仅要反映谐波电流本身,也要反映不同频率电流的相互作用。

对于电流为 $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, \dots$ 的变压器或电抗器的电流谱,例如对噪声有显著作用的电流如果确定为 I_1, I_2, I_3 ,则由这些电流可推导得到下列声级分量:

电流幅值	电流频率	声波频率
I_1	f_1	$2f_1$
I_2	f_2	$2f_2$
I_3	f_3	$2f_3$

f_1, f_2, f_3 是变压器或电抗器方均根值为 I_1, I_2, I_3 的电流的频率。通常 f_1 为工频, f_2, f_3 为电流谱中起显著作用(作用明显的谐波)的电流的频率。

上述分量中变压器或电抗器的电流对如 I_1 和 I_2 , 因相互作用产生两种附加频率成分。

电流对的幅值	电流对的频率	电流对的声波频率
$(2I_1 I_2)^{0.5}$	$(f_2 + f_1)/2$	$f_2 + f_1$
$(2I_1 I_2)^{0.5}$	$(f_2 - f_1)/2$	$f_2 - f_1$

应将所有谐波电流和电流对中具有相同频率的电流相加,得到该频率下的试验电流。为保证总和正确,宜考虑相位相关性,有关详细信息参见附录 A。如果不可行,则可采用统计方法,即通过计算各个电流分量的平方和再开方(SRSS)得到。例如 f_1 为工频, f_2 和 f_3 是有显著作用谐波的频率,需要考虑下列分量以便得到试验电流。

贡献幅值	贡献频率	声波频率
I_1	f_1	$2f_1$
$(2I_1I_2)^{0.5}$	$(f_2+f_1)/2$	f_2+f_1
$(2I_1I_2)^{0.5}$	$(f_2-f_1)/2$	f_2-f_1
$(2I_1I_3)^{0.5}$	$(f_3+f_1)/2$	f_3+f_1
$(2I_1I_3)^{0.5}$	$(f_3-f_1)/2$	f_3-f_1

注意谐波本身、谐波电流对的频率和以及频率差的谐波通常对发射的声功率没有显著的影响。有显著影响的分量一般包括励磁频率的电流,因此需要考虑与励磁频率电流有关的电流对。

当对上述电流分量 I_1 、 I_2 、 I_3 应用 SRSS 方法时,可根据包括励磁频率 f_1 和有显著影响的频率为 f_2 、 f_3 (f_2 和 f_3 通常为 5 次谐波和 7 次谐波)的典型电流谱导出如下的试验电流:

试验电流幅值	试验电流频率	声波频率
$I_{1T} = (I_1I_1)^{0.5}$	f_1	$2f_1$
$I_{2T} = (2I_1I_2)^{0.5}$	$(f_2-f_1)/2$	f_2-f_1
$I_{3T} = \{[(2I_1I_2)^2 + (2I_1I_3)^2]^{0.5}\}^{0.5}$	$(f_2+f_1)/2 \equiv (f_3-f_1)/2$	f_2+f_1
$I_{4T} = (2I_1I_3)^{0.5}$	$(f_3+f_1)/2$	f_3+f_1

如果由于试验室的限制不能施加谐波频率 f_i 的全试验电流时,则可施加降低的试验电流,然后全试验电流下的声功率可通过基于 GB/T 1094.10—2022 中公式(7)推导出来,见公式(3):

$$L_{iT} = L_{ired} + 40 \times \lg \frac{I_{iT}}{I_{ired}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

L_{iT} ——全试验电流 I_{iT} 条件下谐波频率为 f_i 的声级;

L_{ired} ——降低试验电流 I_{ired} 条件下谐波频率为 f_i 的声级。

总的声级用公式(4)计算:

$$L_{tot} = 10 \times \lg \left(\sum_i 10^{L_i/10} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

L_{tot} ——总的声功率级;

L_i ——单个试验谐波成分 i 的声功率级。

注:由于没有试验设备,上述谐波试验电流的试验通常不适用于电力变流变压器(如工业用和高压直流输电用变压器)。

5.2.5.3 由谐波引起的附加声级的估算

此计算方法与已知的励磁频率的基波的声级有关,计算步骤如下。

- 应用 $(I_n/I_1)^2$ 计算由谐波 I_n 引起的频率分量为 $2f_n$ 的力的相对幅值。
- 应用 $(2I_nI_m)/I_1^2$ 计算一对谐波电流对 I_n 、 I_m 引起的频率为 (f_m+f_n) 和 (f_m-f_n) 两个分量的力的相对幅值。
- 用给定的相位关系将每种频率的所有相对力相加。如果不可行,则可考虑采用统计方法 (SRSS=平方和再开方)。
- 采用对数方法处理每种频率下由力引起的绕组位移的动态响应(考虑绕组传递函数)。
- 将每种频率成分的力分量转换为相对于基准力的对数值。
- 将角频率转换为相对于基频的对数值。
- 对每种频率的发射效率相对于基本发射效率取对数。
- 对每种频率应用 A 计权(相对基本频率 A 计权)。

i) 对以 dB(A) 表示的从 d)~h) 的所有分量求和得到总的声功率级增加值。

注：附录 A 中有此方法的更多详细信息。

5.2.6 风扇噪声

风扇发出噪声的原因是由于空气的湍流导致的较宽频率范围的压力波动，其噪声主要频段在 300 Hz~2 kHz 之间，风扇的声功率级主要由叶片的尖端速度所决定，它是叶片直径和旋转速度的函数。通过调整叶片的迎角，可影响噪声和气流。

注：减少空气流量会导致温升试验失效。

5.2.7 油泵噪声

油泵噪声和油流通常不会明显地影响变压器的声功率，除非是很高的流速或是对极低噪声的变压器。异常的油泵噪声可能是由于旋转方向不正确导致的。

5.2.8 声源的相对重要性

以前，变压器声级测量在空载条件下进行，只有励磁电流流过绕组，这是可接受的，因为铁芯的磁致伸缩变形是变压器噪声的主要来源。目前，变压器设计采用高质量电工钢带，并且选取低磁密，使得空载条件下的噪声得到一定程度的降低，而由绕组负载电流引起的噪声则变得明显起来。

基于经验数据，对于是否需要在负载条件下进行声级测量的粗略的估计见 GB/T 1094.10—2022 中的公式(5)和公式(6)，并指出了结果的重要性。声学的一般原则是，当一个声级比另一个声级低于 10 dB 以上时，则它对总声级(两个声级和)的贡献可忽略。

对于低噪声变压器设计或带有外壳(隔声罩或防护罩)的变压器，由于冷却设备的声功率相对影响更大，因此在一定环境下可考虑采取无风扇冷却方式(ONAN、ODAN)。

5.3 振动传递

磁路、绕组、油箱和隔声罩(如果需要)都是具有各自固有振动频率的机械构件。如果激励力中某个频率等于构件固有频率，则可能使该频率下的振动值出现明显放大的迹象。因此在产品阶段就要设法消除共振现象，或者采取足够阻尼措施控制振动幅度。

在液浸式变压器中，来自铁芯和绕组的振动通过铁芯和绕组装配的支撑结构件以及不可压缩的液体传递到油箱。

如果将绝缘液体换成气体，例如对于带外壳的干式变压器或 SF₆ 变压器，则振动发生取决于器身的结构支撑。

油箱内部铁芯支撑结构件下面的隔振件能减少振动向油箱的传递，因此能够减少发射的声功率。

油箱或外壳下面的隔振件能减少振动向基础的传递。这些隔振件目的在于减少振动传递，但不能明显地影响变压器本身的声功率。

注：注意 GB/T 1094.10—2022 的范围仅包括声功率发射，不包括振动传递。

在一些应用中，结构振动的传递可能足够明显地引起支撑结构问题，例如变压器安装在建筑物里边或海上平台上。

同样的，安装在某一基础的变压器可能会引起安装在同一基础较远位置的其他建筑出现问题。

5.4 声发射

发射到远场的声功率方均根值与振动速度的平方、声发射表面面积以及表面的声发射效率有关，见公式(5)：

$$W = \rho_0 c S \omega^2 x^2 \dots\dots\dots (5)$$

- 式中：
- W —— 发射的声功率,单位为瓦(W);
 - ρ_0 —— 空气密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
 - c —— 空气中声速,单位为米每秒(m/s);
 - S —— 声发射表面面积,单位为平方米(m^2);
 - σ —— 单位发射效率,频率及发射表面的几何形状和结构特性的函数;
 - $\omega = 2\pi f$ —— 所考虑频率声音的角频率,单位为每秒(s^{-1});
 - x —— 振幅方均根值,单位为米(m);
 - $\rho_0 c$ —— 表示空气中的声音阻抗;
 - ωx —— 表示振动速度方均根值,单位为米每秒(m/s)。

当振动物体的尺寸小于辐射频率的波长时发射效率就低。当振动物体尺寸接近或大于发射频率的波长时,效率接近 1。当出现声音谐振,那么发射效率就超出 1。例如:在油箱与地面间开放的空间,或者空心电抗器的线圈气隙中,可能会发生谐振。

注:当振幅相同时,具有复杂振动模式的大型软板发出的噪声比具有简单振动模式的刚性硬板发射出的声音要小。

5.5 声场特性

变压器声发射主要由箱体的弯曲波引起。参考图 8,从中可看到油箱周围的声发射是不均匀的。来自油箱表面不同部分的不同幅值和相位的振动导致的声波的相长干涉和相消干涉作用形成了不同的模式。

非均匀声场模型适用于所有带油箱的变压器,也适用于干式变压器和电抗器,无论是否是封闭的。在图 8 中可注意到在整个测量路径上声强都是不同的,这就更体现出空间平均声级测量的重要性。高次谐波的声波发射模型显示,由于声波较短,因此干涉结构的数量增加。

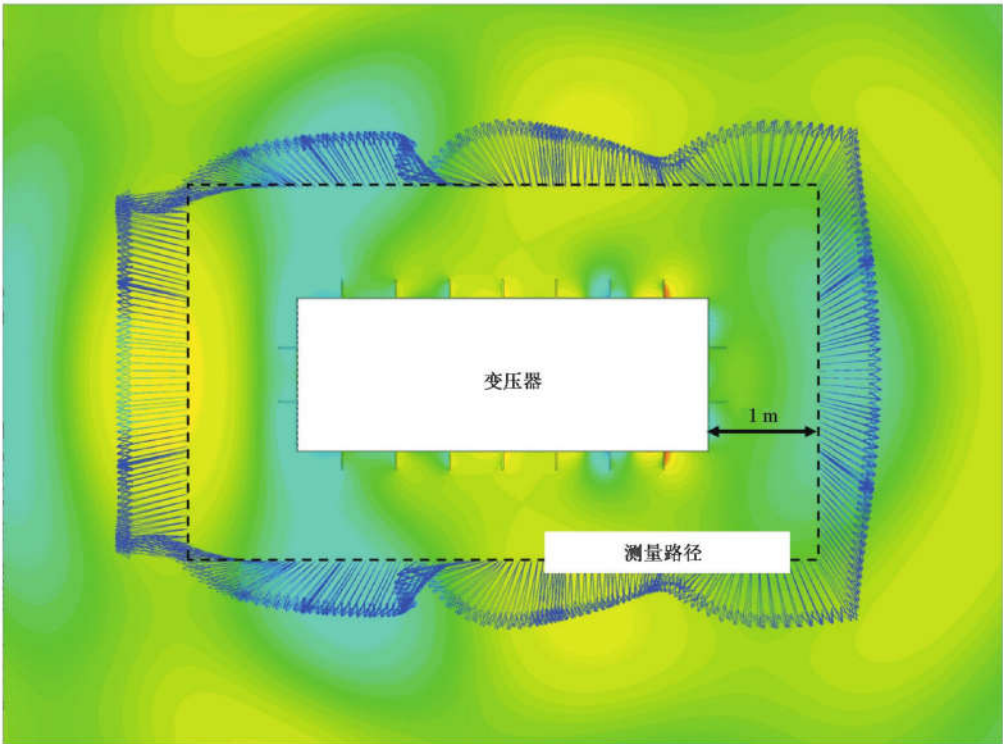


图 8 31.5 MVA 变压器的 100 Hz 声压场(彩色)及沿测量路径的声强矢量仿真

6 测量原理

6.1 通则

需要知道变压器的声功率级,以便预测其运行时的声级。声功率级不能直接测量,应通过直接测量变压器周围的声压或声强来确定。

根据 GB/T 3768—2017,声功率估算基于包络原理,由于安全原因油箱盖不能接近而采用修正的方式。变压器油箱周边所测得的平均声级假设能外推至油箱盖。

外推法通过应用 GB/T 1094.10—2022 中给出的测量表面积公式(8)来完成。在这个公式中,为了对油箱盖发出噪声提供一定的灵敏度,同时近似保持包络原理,测量高度应向上增加,增加值等于测量距离。

6.2 A 计权

人的听力取决于频率。A 计权的灵敏度最高频率约在 2 kHz~3 kHz,在较低或较高的频率下灵敏度会降低。A 计权声级已表现出它与人对声音的主观响应有良好的相关性。且也表现出它与其他计权对比中的一致性。这一事实使它成为国家标准和国际标准优先采用的标度,在变压器声级测量中得到广泛的应用。

A 计权函数 $A(f)$ 参考 GB/T 3785.1 给出,见公式(6):

$$A(f) = 2 + 20 \times \lg \left[\frac{12\,200^2 \times f^4}{(f^2 + 20.6^2) \times \sqrt{(f^2 + 107.7^2) \times (f^2 + 737.9^2) \times (f^2 + 12\,200^2)}} \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

图示见图 9。

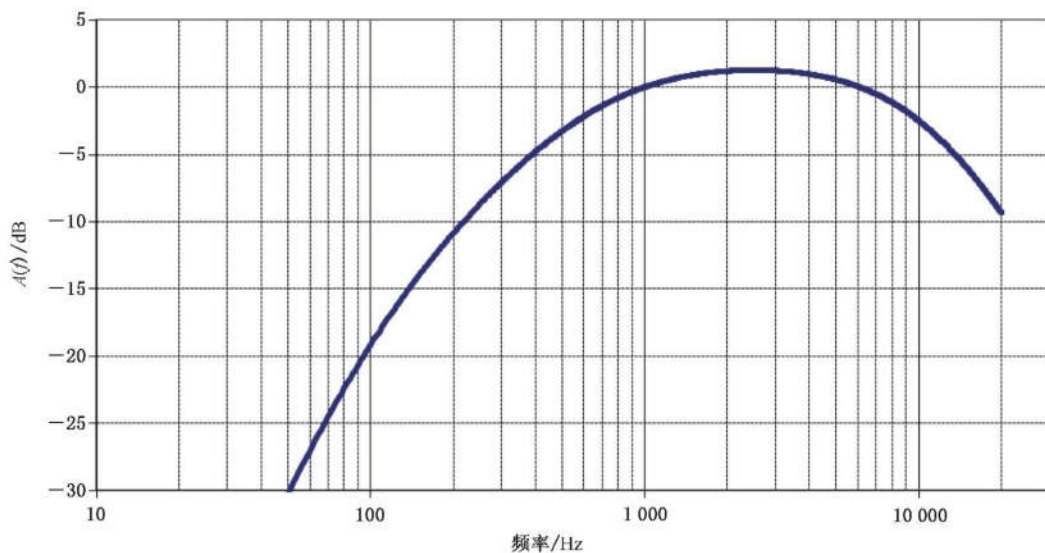


图 9 由函数 $A(f)$ 导出的 A 计权图

上述曲线是连续函数,在可听范围内对单个频率(而非频段)是有效的。在任何频段滤波前,应对分析器的输入信号进行计权(当选用时)。

如果测量时没有选择计权,则在应用基于测量频段的后计权时宜多加注意,因为频段计权只对频段中心频率是正确的。如果音调远离频段的中心频率就会产生误差。在极端情况下,当音调接近频段边缘时,预期偏差可达 5 dB。

表 1 提供了变压器基波和谐波音调的 A 计权值。

表 1 1 次~15 次变压器音调的 A 计权值

50 Hz 励磁		60 Hz 励磁	
频率 Hz	A 计权值 dB	频率 Hz	A 计权值 dB
100	-19.1	120	-16.7
200	-10.8	240	-9.1
300	-7.1	360	-5.6
400	-4.8	480	-3.5
500	-3.2	600	-2.2
600	-2.2	720	-1.3
700	-1.4	840	-0.6
800	-0.8	960	-0.1
900	-0.3	1 080	0.2
1 000	0	1 200	0.5
1 100	0.3	1 320	0.7
1 200	0.5	1 440	0.8
1 300	0.7	1 560	1.0
1 400	0.8	1 680	1.1
1 500	0.9	1 800	1.1

6.3 声级测量方法

6.3.1 概述

不论是声压还是声强，声级测量的目的都是估计试品发射的声功率。

声功率是声强对围绕试品测量表面积的积分，因此测量声强能够直接估算声功率。声强是声压和速度的乘积，其测量需要复杂的测量技术。

另一种估算声功率方法是假设声压和速度同相且成正比，用较简单的技术测量声压。声压测量只能提供有限的信息，当假设条件不满足时该方法需要修正。

当声压与速度同相(自由场条件)时，声压 p 和声强 I 间存在唯一关系，见公式(7)：

$$| I | = \frac{p^2}{\rho c} \dots\dots\dots (7)$$

式中的 ρc 为介质的声阻抗，声音通过该介质传播。在空气中标准大气压和温度条件下， $\rho c = 412 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

使用公式(7)的法向声强，则法向声强级 L_I 与声压级 L_p 的关系见公式(8)：

$$L_I = 10 \times \lg \frac{| I |}{I_0} = 10 \times \lg \frac{p^2}{\rho c I_0} = 10 \times \lg \frac{p^2}{p_0^2} + 10 \times \lg \frac{p_0^2}{\rho c I_0} = L_p + 10 \times \lg \frac{p_0^2}{\rho c I_0} \dots\dots\dots (8)$$

对于给定的基准值 I_0 和 P_0 ($I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$ 、 $p_0 = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$)，大多数情况下项 $10 \times \lg \frac{p_0^2}{\rho c I_0}$ 与

L_p 相比很小(在空气中温度为 22 ℃、大气压为 1.013×10^{-5} Pa 的环境条件下该项的值为 0.13 dB)。

声压级测量和声强级测量都是在近场外进行,相当于是理想的自由场中,因此所测得的试品声功率数值相同。

6.3.2 声压法

声压是标量,没有方向信息。它用单个传声器进行测量,由于测量设备能够明显地对局部声场造成干扰,因此实际操作中应将传声器指向试品测量。

实际试验环境通常与理想自由场有明显区别。变压器声压测量通常受如下所述的负面影响。因此,试验测量需要基于 GB/T 1094.10—2022 中 11.2 描述的试验环境的声学特性进行修正。

离开试品发射表面的声压波将会从试验室的地板、墙面和其他物体反射回来。反射声波会对试品所发出的声波进行相长干涉。

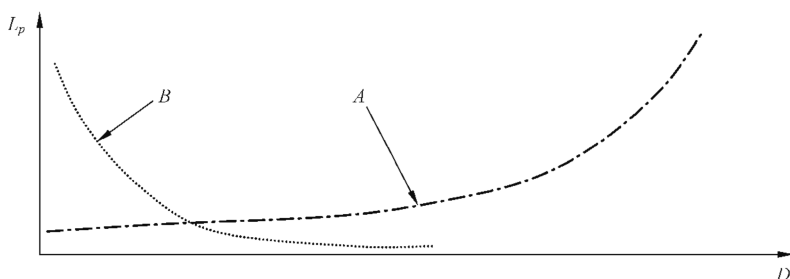
在有些情况下,可能会出现驻波。在驻波存在区域测量声压时会使声功率估计过高。因为无法校正这种影响的测量结果,因此宜通过适当放置试品位置以避免或减少驻波(见 6.2 和 GB/T 1094.10—2022 的 11.1.1)。

实际试验环境经常受诸如生产过程、试验发电机和励磁中的试验变压器等外来声源的影响。这将会使试品的声压级测量值增大。

声压测量无法区分有功声场和无功声场。近场效应往往会增加声压级测量值。

从图 10 可看出,上述干扰对声压的影响可最小化但不能完全消除。

GB/T 1094.10—2022 中第 8 章规定的标准测量距离是根据以往经验确定的折中值。



标引序号说明:

A —— 反射或外部声源压力干扰;

B —— 近场声源压力干扰;

L_p —— 声压级;

D —— 试品和传声器之间的距离。

图 10 试验环境中影响声压的干扰分布图

6.3.3 声强法

声强是矢量,它能指示声音传播的方向,因此可将进入或离开围绕试品测量表面的声功率区别开来。这一特性允许在非理想环境中进行测量而无需修正,声强幅值是声压和速度之积的时间平均值。

如前所述,单个传声器可测量声压,但测量速度是很复杂的。速度与声压梯度(相当于瞬时声压随距离的变化率)有关。

速度测量的原理是基于牛顿第二定律在空气中的应用。牛顿第二定律表示了某一物体的加速度与该物体的质量及该物体所受到的作用力之间的关系。如果力和质量已知,则加速度便可求解,然后将此加速度对时间进行积分,即可求出其速度。

在声波中,压力梯度使密度为 ρ 的空气获得加速度。

当压力梯度和空气密度已知,加速度可按照公式(9)计算:

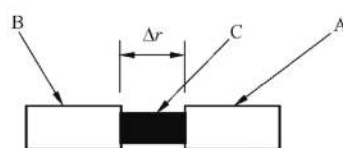
$$a = -\frac{1}{\rho} \times \frac{\delta p}{\delta r} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中的 a 是密度为 ρ 的空气压力变化 δp 通过距离 δr 引起的加速度。

对公式(9)积分,速度 u 由公式(10)给出:

$$u = -\int \left(\frac{1}{\rho} \times \frac{\delta p}{\delta r} \right) dt \quad \dots\dots\dots (10)$$

可使用两只相距较近的传声器 A 和 B 来测量此压力梯度。两只传声器用一块长度为 Δr 的定距柱隔离(见图 11)。参照公式(10)的有限差分近似值,当分别测得它们的压力值为 p_A 和 p_B 时,用它们之间的压力差除以距离 Δr 便可得到压力梯度。



标引序号说明:

A 和 B —— 传声器;

C —— 长度为 Δr 的定距柱。

图 11 传声器布置

将压力梯度信号积分,得到了如公式(11)所示的时间平均速度 u :

$$u = -\frac{1}{\rho} \int \left(\frac{p_A - p_B}{\Delta r} \right) dt \quad \dots\dots\dots (11)$$

声强等于传声器对中间的声压与时间平均速度之积,见公式(12):

$$I = -\frac{p_A + p_B}{2\rho} \int \left(\frac{p_A - p_B}{\Delta r} \right) dt \quad \dots\dots\dots (12)$$

这是声强测量设备中信号处理的基本原理。

声强法理论上能消除上述讨论的干扰,但在实际试验环境下其应用仍然有限制。

当两个传声器之间的压力差 $(p_A - p_B)$ 与声压幅值 $(p_A + p_B)/2$ 相比较小时,压力梯度的确定是不准确的。

这一影响的指标可通过来自试品的包含干扰的未修正的声压级与来自试品的声功率发射的声强级之差来得出,试验表明声强测量准确度与按公式(13)所计算的差值 ΔL 密切相关,此差值也被称为 P-I 指数:

$$\Delta L = \overline{L_{pA0}} - \overline{L_{IA0}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

所有类型的干扰对 P-I 指数都有影响,并且干扰越大,P-I 指数也越大。

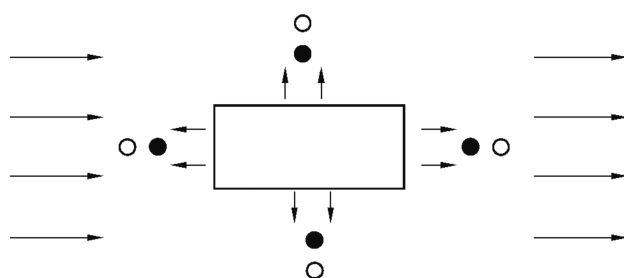
P-I 指数越大,低估声强级的趋势越高。因此,应限制 P-I 指数的最大允许值,以确保测量质量(见 GB/T 1094.10—2022 的 11.3.5)。同时也要注意在这种情况下声压是被高估了。

离开试品发射表面的声压波将会从试验室的地板、墙面和其他物体反射回来。由于声强探测器对声音传播方向很敏感,所以声强测量通常不受反射的负面影响。

注:在高度适合或完全扩散的声场(例如在隔音罩)中,声强接近零,且 P-I 指数很高,测量无效。

在试验室宜通过仔细调整试品的位置来避免或减少驻波的出现,见 7.2 和 GB/T 1094.10—2022 的 11.1.1。在驻波发生的位置,因为声压和速度不同相,测量设备测量的声强接近于零。因此相应的声强级将降低,这可由高的 P-I 指数体现出来。

实际试验环境经常受诸如生产过程、试验发电机及其他励磁的试验变压器等外来声源的影响。图 12 表示这样一种环境下,有一个稳定的背景噪声从左到右通过试品传播。



标引序号说明:

空心圆——传声器对中的传声器 A;

实心圆——传声器对中的传声器 B。

图 12 穿过试验区域的背景噪声和试品发射的噪声示意图

当试品没有通电时,在试品左侧测到的声强为负,在右侧测到的声强为正,在长边测不到声强。总的空间平均声强为零。当试品通电时,则在试品四个面发射额外的正声强。如上所述,由于背景噪声造成的声强的整体效果为零,因此对试品声强没有影响。要注意的是这些不适用于声压。

如果试品的背景噪声与试品噪声比相对较高,则上述理想情况是不适用的。此时,左边(短边)的声强很小,甚至是负值,而右边(短边)的声强增加。只要声压幅值 $(P_A + P_B)/2$ 不淹没压差 $(P_A - P_B)$ 就没有问题。在试品顶部或底部(长边)影响更为严重,因为两个传声器由于背景噪声而增加了相同的绝对声压。只有沿试品周围整个(封闭)测量路径进行空间平均测量导出的 P-I 指数才能说明这一点。

总之,声强测量方法仅能在一定程度容纳稳态背景噪声。随着稳态背景噪声的增加,测得的试品声强级下降,这是明显不能接受的。同时 P-I 指数值增加。在 GB/T 1094.10—2022 中 11.3.5 所述的 P-I 指数范围内进行试验,才能保证测量的有效。

因为声强测量可区分有功声场和无功声场,因此近场效应对声强级测量值没有负面影响。

按 GB/T 1094.10—2022 中 11.3.1 所述,声强法要求测量表面以及测量路径完全包围试品。虽然某点的声强和 P-I 指数对于识别有噪声发射问题的位置也是有价值的,但是为估算声功率和相应的 P-I 指数进行的测量,应由沿整个路径测量中得出。

6.3.4 适合的噪声测量方法的选择

声强法和声压法都可用于估算声功率,可分别对得到的结果进行比较。

声强法涉及的是声音的本质,这反映在无需修正的事实上。如果 P-I 指数(GB/T 1094.10—2022 的 11.3.5)在限值之内,则试验结果是有效的。4 dB 是一个基本的限值。它是对可能有影响的各种干扰进行仔细考虑和评估,并通过后续实践检验而得出。此经验也表明在该限值之内的基于声强测量的声功率估算代表了声功率的真实数值,比基于修正的声压测量估算的声功率更加准确。

如果 P-I 指数大于 4 dB 的基本限值,声强法则有低估声功率的趋势,而声压法则有高估声功率的趋势。在这种情况下,应按 GB/T 1094.10—2022 中 11.3.5 所述假定报告的声强级比测量的声压级低 4 dB。这种近似方法避免了低估声功率的风险。

GB/T 1094.10—2022 中 11.3.5 给出的 P-I 指数上限值 8 dB 可作为试验环境的最低质量要求。

如果上述条件都不能满足,例如 P-I 指数超过 8 dB,或应用声压级估算声功率较高,则可选择诸如采用窄带测量或时间同步测量等方法。

6.4 频带信息

标准中默认的带宽为 1/3 倍频程。工业应用通常使用这个带宽,声级计一般都有此功能。此带宽对于试品的评估一般可提供足够的细节,特别是对变压器音调。

注：倍频程的声级和总的声级可由 1/3 倍频程声级导出。

为了测量变压器单个基波和谐波噪声,有必要选择适当的窄带进行测量。当某个音调处于两个相邻频带中间时,那么这个音调的能量在这两个相邻频带上都有分配。

对于 50 Hz 系统,上限到 600 Hz 的音调都与 1/3 倍频程的频带符合得很好。对于 60 Hz 系统,情况就不同了。例如 60 Hz 系统的 3 次谐波位于 400 Hz 频段的下限,因此一部分音调的能量在 315 Hz 频带中。为了确定跨越两个相邻频带的音调的幅值,应将这两个频带的声级求和或采用较宽的频带。

图 13 描述了关注的音调及相应的 1/3 倍频程和 1/1 倍频程。

对多数变压器和电抗器而言,主要音调通常不超过 6 次谐波。

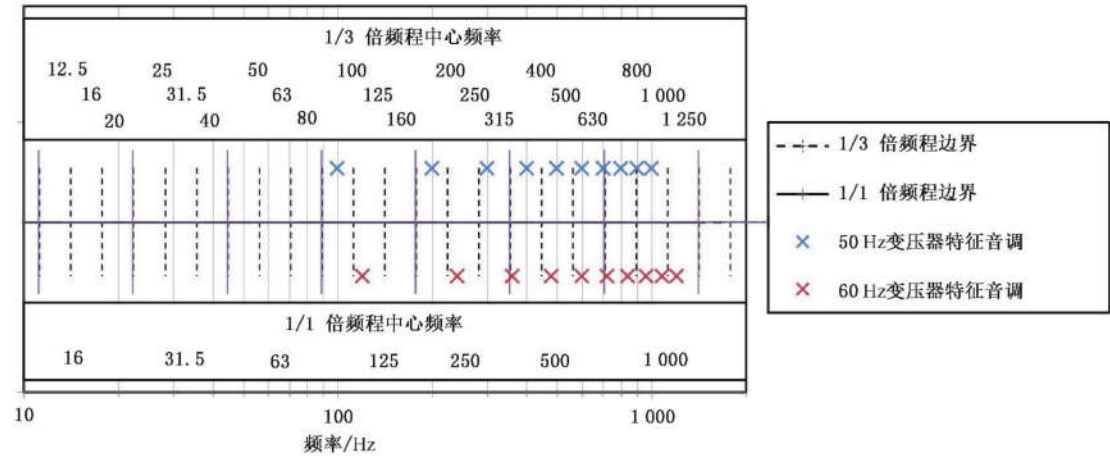


图 13 50 Hz 和 60 Hz 系统中 1/1 倍频程和 1/3 倍频程的变压器音调

强迫风冷设备和油泵的噪声具有宽频特性,有时存在某些音调成分,用 1/3 倍频程测量通常是适合的。

还有频率分辨率更高的测量系统,例如 1/12 倍频程系统已经出现,其将每个 1/3 倍频程再分为四个小倍频程,一般称为窄带测量。窄带测量与 1/3 倍频程测量相比对音调分量测量的选择性更强,能排除背景噪声中不希望出现的噪声信号。对于声功率评估,可只考虑有试品特征音调的频带。这一方法同样适用于声压和声强测量,并用于确定声功率级。

使用窄带测量的风险是噪声能量可能会在相邻两个频带上。因此当评估窄带测量的结果时,宜考虑来自相邻频带的影响。

使用窄带测量的另一个后果是需要增加采样时间,特别是对低频。为了避免不正确的测量,采样时间要按照测量设备说明书进行。

窄带测量通常采用两种技术。

- 采用数字滤波器技术作为并行实时滤波器。其中 1/*n* 倍频程测量使用恒定百分数带宽(cpb)的对数刻度的频谱,例如 1/3 倍频程带宽对应于 23% 频带中心频率,1/12 倍频程带宽对应于 6% 的频带中心频率。
- 快速傅立叶变换(FFT)技术使用恒定带宽的线性刻度的频谱。建议测量带宽选为 10 Hz 或更低,并且使用仪器的“平顶(flat-top)”时间窗。使用该时间窗后,测量音调的幅值对于落入的频带不敏感,但纯音调还是会在临近频带显示高的数值。这种所谓的“泄漏”是一种假象,它不影响音调落入的频带的测量值。如果特征音调只包含在个别频段中,则这种现象是明显无影响的。然而当连续的频带都增加了特征音调时,如在冷却设备运行的情况下进行测量时,宜考虑其影响。连续频带的总和包含了“泄漏”,并且比实际水平超出一个与滤波窗有关的特定值。现代设备给出的总声级要对此作出处理。

6.5 测量表面信息

声功率估算基于 GB/T 3768—2017 的包络法。应用条件是没有声功率通过反射面发射,声源放置在其上,并且所有的声功率均通过包围声源的表面发射。因为噪声测量沿该表面进行,因此该表面又称为测量表面。声源的声功率理论上由法向声强通过对整个测量表面的积分导出。在实际应用中,该表面可分成几个局部表面以便于测量。如果局部表面的面积相等,则可得到这些局部表面测量的平均法向声强,将此值乘以整个表面面积以得到声功率。这也解释了为什么需要从反射面开始计算测量表面的高度,而且反射面和测量对象之间的任何支撑结构也应包括在内的原因。见 GB/T 3768—2017。

对于变压器而言,声级测量通常无法在接近油箱箱盖时进行。因此,在定义测量表面时要考虑这种情况,传统上是将测量高度加大。过去常采用两种方法:

——第一种方法: $S = 1.25hl_m$;

——第二种方法: $S = (h + x)l_m$ 。

第一种方法应用在短距离测量,实际上只应用在 0.3 m,它包括的表面面积乘以系数 1.25。如果测量距离增加,则所包括的表面面积将大幅低估,不符合包络原理。第二种方法解决了这个问题,与包络原理一致。在定义边界的测量距离为 30 m 时,它也与远场半球方法(见 GB/T 1094.10—2022 的 10.2)一致。

就测量距离 0.3 m 而言,对于表面测量,两种方法中公式的偏差小于 1 dB,第二种方法中的公式对所有其他相关测量距离保持了包络原理,因此 GB/T 1094.10—2022 中只采用了第二种方法中的公式。

6.6 测量距离的信息

对配电变压器,标准测量距离规定为 0.3 m;对其他所有变压器,标准测量距离规定为 1 m;对运行中带有强迫风冷却设备的变压器和干式空心电抗器,标准测量距离规定为 2 m(见 GB/T 1094.10—2022 的第 8 章),这些是由下列原因而确定的最佳值。

- a) 信噪比:传声器离试品越近信噪比越高,这是一个理想状态,但与下列描述的其他要求有冲突。对于配电变压器和低噪声变压器,满意的信噪比常常是一个主要挑战。采用 0.3 m 测量距离考虑了这个要求。
- b) 近场效应最小化:如 4.6.4 所述,近场效应随测量距离呈指数衰减,采用 1 m 或更大的测量距离,即使对于关注的最低频率,其对声压法的影响也可接受。对于除了配电变压器以外的大多数变压器,1 m 测量距离处的信噪比可接受,就此得出使用声压法标准测量距离为 1 m 这一结论。
- c) P-I 指数的最小化:有两种因素影响 P-I 指数,如果距试品近,则高的无功声场分量使 P-I 指数增加,在试验环境边界附近处测量也如此。结合多数变压器可接受 1 m 处的信噪比,据此得出声强法标准测量距离为 1 m 这一结论。
- d) 传声器湍流影响最小化:传声器对湍流很敏感。由于湍流的出现,声场本身也会受到干扰。两种因素决定了对于运行中的强迫风冷却设备采用 2 m 的测量距离。更多关于湍流影响声场的信息参见 GB/T 16404.1—1996 的附录 C 和 GB/T 16404.2—1999 的附录 C。可在测量中采用传声器防风罩来减少湍流对传声器的影响。
- e) 安全方面:考虑暴露的高压部件造成的安全因素,应超过上述提到的推荐测量距离。特别注意空心电抗器试验时的安全问题,测量距离通常采用 2 m。
- f) 试验室的限制:尽可能采用规定的测量距离。但由于试验室条件的限制,因此可能不得不采用更小的测量距离。

注:在极端情况下,如果试验时无法按照 GB/T 1094.10—2022 在试验室进行可靠的声级测量,则宜用现场测量代替。

6.7 测量方式信息(步行测量和逐点测量)

本文件肯定了步行测量和逐点测量两种方式是等效的,两种方式都提供了在正常公差范围内的可重现的声级。

要注意的是步行测量通常测量时间较短,当需要在不同运行条件下进行多次测量时,这种方式是很有用的。对数据做进一步处理的工作量也最小化了。

GB/ T 1094.10—2022 的第 9 章将步行测量最大速度设定为 1 m/s。操作者可将速度设定为 0.5 m/s。这个速度更容易维持恒定,支架更容易,脚步噪声可减少。

如果脚步噪声接近或超过测量信号时建议不要使用步行测量方式。详细见 7.3。

如 5.5 所述,声级沿测量路径变化。对于大型变压器而言声压级变化通常在 5 dB 以内,极端情况下也可能发生过 1 m 之内声压级变化达到 16 dB 的情况,特别是负载电流(见图 14)下的声级测量。对于小型设备(如配电变压器),声压级变化不太明显。

步行测量提供的是空间平均测量值,处理了上述提到的变化。逐点测量通过规定传声器间隔为 1 m 和对于小型设备规定传声器位置的最小数量来减少上述提到的这些变化。

图 14 描绘了一个实际的声压步行测量方式,显示了当传声器沿测量路径移动时声压随时间/距离的变化。试品和试验设备参数如下:

- 试品: 3 相、40 MVA、ONAN
- 试验名称: 额定电流下的声级测量
- 测量高度: 1/3 油箱高度和 2/3 油箱高度
- 测量距离: 0.3 m
- 测量路径长度: 25.7m
- 测量时间: 70 s
- 移动速度: $2 \times 25.7 \text{ m} / 70 \text{ s} = 0.73 \text{ m/s}$
- 分辨率: 每隔 100 ms 记录测量值

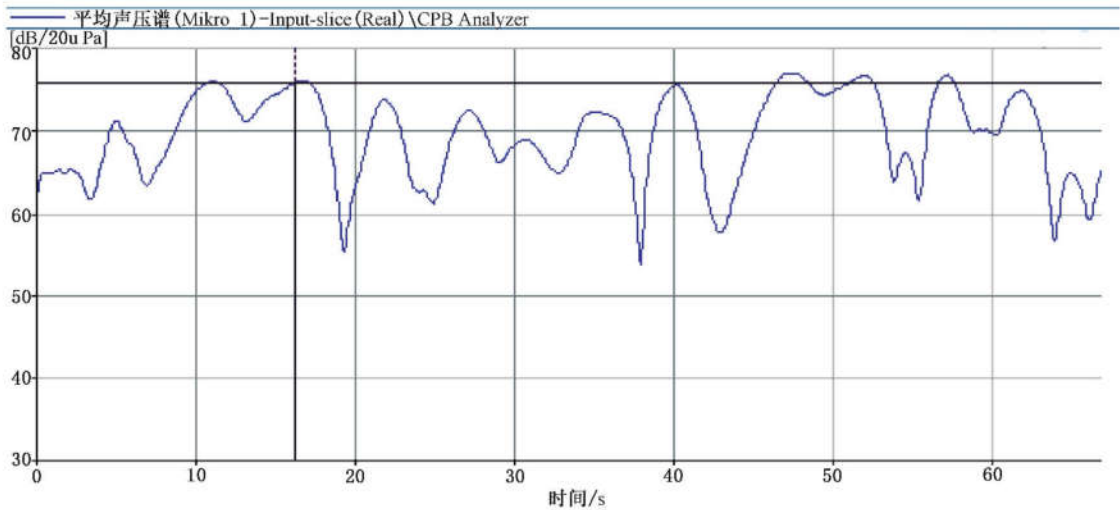


图 14 声压沿测量路径的空间变化记录

注：对于声强测量,因为声强的方向在某些位置有可能变为负值,因此记录的信号将更加复杂。

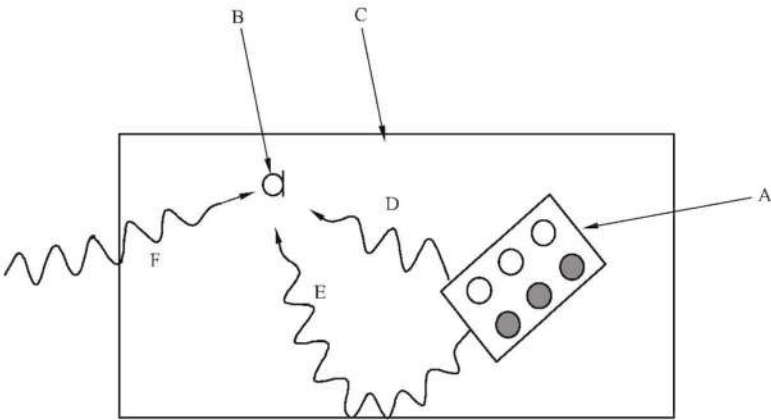
7 声级测量的注意事项

7.1 概述

本章提供了进行高质量、重复性好的声压和声强测量的实用建议。

7.2 避免驻波影响的试品放置

当试品放置时其箱壁与试验环境的反射墙平行时可能导致大量的驻波,见 4.6.6。在驻波区域进行声压测量时,驻波会导致声功率的高估。而在驻波区域进行声强测量时又会导致声功率的低估。因此建议试品应按图 15 放置。



标引序号说明:

- A —— 试品;
- B —— 传声器位置;
- C —— 试验室的反射面;
- D —— 直射声波;
- E —— 反射声波;
- F —— 背景噪声。

图 15 试验环境

7.3 良好声学测量的设备操作

进行声级测量时,通常需要将传声器安装在支架上。不管是否使用支架,操作者都有责任确保相同的测量性能。

如果采用手持方式而不使用支架,则操作者要避免身体的反射。通常是通过不将测量设备布置在试品与操作者身体之间来实现。

采用声强法时,传声器定距柱要与传声器紧密接触。

泡沫防风罩在清洁环境中的正常寿命一般在五年左右,但是大气环境的污染可能将其寿命大幅缩短为数月。为避免对声级测量的影响,老化的防风罩应更换。老化的迹象是失去弹性和脆性。肮脏和发粘的防风罩也应更换。

拍打传声器电缆对声级测量有不利影响。频率在 500 Hz~1 250 Hz 范围内波动的声级分量是典型的由对电缆拍打造成的。测量时是否采用较长的支架也有可能影响测量。将传声器电缆固定在支架上或更理想的将其固定到支架内可减轻影响。

当测量的声压级低于 40 dB(A)时,操作者的脚步噪声可能会对步行测量的结果有影响。因此此噪

声源应尽可能降低。如果不能降低该噪声的影响,则宜考虑采用逐点测量。另外可将测量路径分成几个更小的路径段,以便在这些路径段中以固定的速度移动传声器而无需迈步。得到各段的测量结果后再合成最终结果。这通常适用于小型变压器。

应理解校准程序并认真执行:

- 声校准器本身需要按照质量保证(QA)程序进行严格的试验室校准;
- 声校准器应与传声器正确地匹配;
- 传声器/声强计探头的校准应按照制造商的要求进行;
- 校准时应带有延长电缆(只要是试验时用到的)。

7.4 声强法传声器定距柱的选择

当采用声强法时,选择一个适合测量频率范围的定距柱(见图 11)是必要的。声强测量理论所做的假设规定了准确测量的上限频率——定距柱越小,可测量的频率越高。而分析系统的相位失配则产生了一个频率下限值——定距柱越大,可准确测量的频率越低。

操作者应参考测量设备制造商的产品手册,为每次测量确定合适的定距柱长度。原则上,50 mm 长的定距柱典型用于变压器和电抗器低频(约 63 Hz~1 250 Hz)声级的测量,12 mm 长的定距柱用于冷却设备高频(约 250 Hz~5 000 Hz)声级的测量。然而,通常在一个试验室中一般只用一个长度的定距柱测量变压器的所有声级,如果声强校准程序能证明在所关注的频率范围内有足够的测量准确度,则这样是可接受的。

7.5 装有挡声板时的测量

当变压器油箱只有部分区域(通常是除油箱顶部以外)装有挡声板时,不能再假定声能均等地沿各个方向辐射。因此近似公式 $S = (h + x)l_m$ 对于标准测量距离 1 m 将会是无效的,并会低估发射到远场的声能。

对于挡声板完全覆盖油箱壁(挡声板与油箱之间的间隙封闭)但箱盖裸露的油箱,使用声强法评估发射声功率的一个方法是按照 GB/T 1094.10—2022 进行两次测量,一次安装挡声板的测量和一次不安装挡声板的测量。不安装挡声板的测量代表没有覆盖挡声板的区域,而安装挡声板的测量则代表覆盖挡声板的区域。在适当的测量距离下计算相关区域的部分声功率。总的声功率级最终由部分声功率级的对数相加得出。

当油箱壁仅被部分覆盖时,按本文件应用声强法是不适合的,因为在传声器位置测量的声强级不能代表完整的变压器表面。按本文件在不小于 1 m 的测量距离处,采用声压法通过一次测量就可很好的估计声功率级。该方法也可用于油箱壁被完全覆盖但箱盖裸露的情况。

第一种情况(挡声板完全覆盖油箱壁)利用了声强探头的方向灵敏度,而第二种情况(挡声板部分覆盖油箱壁)方向灵敏度将会导致误差。

其他方法(如声强测绘)除非征得用户同意,否则一般不采用。

7.6 电抗器试验

电抗器试验需要向电抗器提供满容量电源。特别是电压常导致电源变压器发出较高的声级,从而干扰电抗器声级的测量。应用声强法能够降低这一影响,可避免进行两次独立测量,其中一次为测量电源变压器的声功率级。

由于试验室容量的限制,可能会出现无法向大型电抗器供给额定电压的情况。在这种情况下,则有可能需要在现场进行声级测量。这应在合同里注明或者由制造方与用户协商确定。或者对于具有磁回路(即五柱式)的三相电抗器,可分别在三个单相满载的情况下测量其声级,然后将结果对数相加。由于是假设三个声源是不相关的而得到的总声级近似值,因此这可能与三相同时运行的情况不符。采用该

近似方法应在投标阶段予以确认。

8 工厂试验与现场声级测量的差异

8.1 概述

为保证试验的可重复性,工厂测量都是在声级测量标准规定的受控条件下进行。而在现场测量时,由于试品运行条件可能与工厂测量时不一致,因此其声级测量值与工厂测量值有一定的偏差。这些运行条件包括变压器的方向和位置、安装方法,像防火墙、边界墙或建筑等反射物,运行频率的变化,电压和电流谐波,电网电压的不对称,其他设备距离较近,变电站及架空线电晕等。气象条件虽不能控制,但也宜进行记录。

上述及其他因素的影响见 8.2~8.9 的详细描述,用户在规定变压器声级以及需要对现场所测出的声级进行解释时,要考虑这些因素的影响。

当变压器在现场合闸投运时,其声级可能因直流偏磁暂时增加。这种影响可能持续几分钟、几小时,对于设计磁密(磁感应强度)低的大型变压器可能持续几天(见 8.7)。

8.2 运行电压

在实际运行情况下,电网电压变化可能达到 $\pm 10\%$,因此铁芯磁密和声功率级也会发生变化。根据变压器设计,预期的声功率级与工厂试验结果的偏差可高达 5 dB,甚至高达 10 dB。

8.3 负载电流

运行中的负载电流在空载与过载状态之间变化。在这两种极端情况之间,由负载电流导致的声功率级将按照 GB/T 1094.10—2022 的公式(7)发生变化。

该公式未考虑负载电流引起的磁屏蔽(如油箱磁分路)中出现的漏磁饱和的影响。这种情况可能出现在过负载条件下。

对于将空载声功率级设计得较低的变压器而言,负载情况对总的声功率级有明显的影响。此外负载电流还会改变变压器阻抗的内部电压降(见 8.4)。这将影响铁芯的磁感应,并引起变压器铁芯声功率级的变化。

在测量运行中变压器的声级时,应记录每个绕组的电流、电压和分接位置(如果可能),以便了解铁芯各部分的励磁水平和绕组的负载情况。

某些变压器在其内部装有与第三绕组连接的限流电抗器,当第三绕组带有负载时,电抗器也将产生噪声,其噪声会随负载水平发生极大变化,并影响负载条件下的声功率级。在这种情况下,测量得到的由于负载电流引起的声功率级与验收试验报告中的数值有所区别。可能需要与用户协商在第三绕组开路的情况下单独进行声功率级测量。

8.4 负载功率因数和功率流向

在工厂内,空载声功率级和负载声功率级的测量是分别进行的。通过对这两种声级的相加来预测试品总的声功率级。这是通过假设铁芯和线圈的振动不相关得到的。

变压器在运行条件下,受负载功率因数和功率流向的影响,铁芯中的部分磁通可能因绕组杂散磁通的叠加而改变。电压和负载电流之间的相角会导致现场测得的声功率与工厂内预测的声功率有很小的差异,一般在 ± 1 dB 左右。逆向潮流有时会明显加强这种影响。并联的无功负载也可能使这种影响效果更明显,从而使声功率级减小或增大。典型的例子如静态无功补偿(SVC)变压器。

8.5 运行温度

对大多数变压器,当运行温度变化时,其声级实际上没有变化。但对于某些变压器,其声级是有变化的,从冷态启动到达到稳定的正常运行条件其变化增加值能达到 3 dB。

8.6 电压和负载电流中的谐波

工厂验收试验中,标准要求电压和电流都是正弦波,声功率就是在这种条件下测得的。

变压器在运行条件下,由于谐波的出现,其声功率级可能会增加。

由于电网在恒定的电压运行,并且谐波干扰被限制在一定水平,将在很大程度上保持正弦电压波形,从而对变压器的空载声级仅有很小的影响。这也适用于连接变流器的变压器。

但是,当电力电子设备向变压器和电抗器绕组注入谐波电流时,将导致负载声功率级增加。由于这些高频下通过 A 计权的衰减比 100 Hz 或 120 Hz 基频要少,因而对总的声功率级的影响可能是很明显的。

见 5.2.5 和附录 A。

联络变压器、发电机升压变压器和降压变压器通常不会遭受谐波电流干扰的影响。

当电力电子变流器的额定值接近变压器的额定值时,谐波电流干扰变得越发明显。这适用于下列应用:高压直流输电(HVDC)变压器、整流变压器、用于 SVC 和柔性直流输电(VSC)的变压器、基于变流器的铁路供电设备、牵引变压器和驱动变压器。

8.7 直流偏磁

即使是如 5.2.1 所述的中等程度直流偏磁的变压器铁芯也会导致变压器声级明显的增加。变压器铁芯通常有很低的空载电流,当受到直流偏磁电流时,可能产生比工厂试验值高 30 dB 的声级(见图 6)。

传统上,交通运输系统中的直流供电设备就是变压器内部出现直流磁场的来源。然而,随着大功率电子设备在电力系统和工业系统中的大量使用,导致直流偏磁的来源可能持续增加。例如高压直流输电系统单极运行时接地极回路产生的直流电流进入变压器中性点并扩散至周围的交流电网。

另一个引起直流或准直流的来源是包括阴极保护系统等的电化学设备。

中等程度的直流电流也可能通过与 VSC 换流器相连的变压器的非对称切换而产生。

如果交流和直流线路并行(由同一个杆塔支撑),则结果是会有小部分杂散直流电流流入交流线路。

对于与较长输电线路连接的变压器,地磁暴可能引起所谓的地磁感应电流(GIC),也能够导致严重的直流偏磁。单相变压器、三相五柱变压器和所有壳式变压器对此都特别敏感。

直流隔断装置能够减轻直流电流对特定变压器的影响,但这又会将问题转移到电网中别的地方。

8.8 剩磁效应

剩磁对空载声级的影响和直流偏磁电流相类似。在工厂进行声级测量试验前,要特别注意确保来自冲击试验(主要是操作冲击)或电阻测量后所产生的剩磁已消除。

在现场,变压器励磁、断电或电网的开关操作都会产生剩磁,并因此增加变压器的声级。这些剩磁将随着时间的推移而衰减,可能需要几分钟、几小时,对于设计磁密(磁感应强度)低的大型变压器可能需要几天。

8.9 由反射引起的声级附加值

工厂声级测量使用声强法或修正的声压法,以消除反射的影响。

现场通常存在反射物体,如防火墙、边界墙和建筑等。在这样的环境中自由场条件是不存在的,这

些反射将会对测量产生不利影响。在反射面(特别是在变压器与大的反射面之间)前面的位置进行测量将会得到较高的声压级。有效的声级测量是不可能的。

如果是在全封闭的环境中或在室内,则可按照 GB/T 1094.10—2022 的 11.2.5 中的环境修正系数 K 对声压级的附加值进行评估。在这种情况下 K 超过 7 dB 的限值也是可接受的。

8.10 带有饱和电抗器的变流变压器

通常在工厂对带有饱和电抗器的变流变压器,无法对电抗器按运行的情况(如施加额定直流电流时)进行声级测量。工厂试验期间施加的交流电流会使饱和电抗器在两个方向上都经历强烈的饱和。这种饱和会产生特定的可听噪声,该噪声通常会大大超过变压器本身的声级保证值。

铁芯作为饱和电抗器的主要运行部件,它是噪声源。当变压器施加交流电流时,电抗器铁芯进入饱和状态,饱和电抗器铁芯中伴随的磁通会严重畸变,并导致较高谐波频率的振动分量占主导地位,该振动分量主导了所测量的变流变压器的声级。因此,在这种条件下测得的变流变压器的声级明显高于同容量的普通变压器的声级。

带有饱和电抗器的变流变压器由于负载电流而产生的运行声级通常由变流器产生的电流谐波决定(见附录 A)。但是在正常运行条件下,饱和电抗器还是会产生较高频率的声音分量。目前没有可靠的方法来计算饱和电抗器的声级。

注:关于变流变压器声级的讨论见 IEC TS 61973:2012、IEC 61378-3:2015、CIGRE Technical Brochure No.202:2002 和 CIGRE 文件“Sound contribution of saturable reactors in rectifier transformers during FAT”。

附录 A

(资料性)

因绕组中谐波电流引起的声级

A.1 谐波电流引起的绕组电动力的理论推导

电流 $i(t)$ 由基波分量(1 次)和谐波分量(n 次)组成,见公式(A.1):

$$i(t) = \hat{i}_1 \sin(\omega t) + \hat{i}_n \sin(n(\omega t) + \varphi_n)$$
$$i(t) = \sqrt{2} i_1 \sin(\omega t) + \sqrt{2} i_n \sin(n(\omega t) + \varphi_n) \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- $\omega = 2\pi f$ ——基波角频率;
- f ——基波频率(例如 50 Hz);
- t ——时间;
- φ_n ——与 n 次谐波电流对应的相位角。

绕组中的力 F 引起振动并最终导致发出声音,它与电流的平方成正比,见公式(A.2):

$$F \sim i(t)^2 = 2 [i_1^2 \sin^2(\omega t) + i_n^2 \sin^2(n(\omega t) + \varphi_n) + 2i_1 i_n \sin(\omega t) \sin(n(\omega t) + \varphi_n)] \dots\dots\dots (A.2)$$

用下列变换:

$$\sin^2(x) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2x)]$$
$$\sin(x) \times \sin(y) = \frac{1}{2} [\cos(x - y) - \cos(x + y)]$$

公式(A.2)变为:

$$F \sim i(t)^2 = (i_1^2 + i_n^2) - [i_1^2 \cos(2\omega t) + i_n^2 \cos(2n(\omega t) + 2\varphi_n)]$$
$$+ 2i_1 i_n [\cos((n - 1) \times (\omega t) + \varphi_n) - \cos((n + 1) \times (\omega t) + \varphi_n)] \dots\dots\dots (A.3)$$

公式(A.3)中的第一项与时间无关,描述了一个静态力,不会引起绕组振动和声功率。

表 A.1 描述了公式(A.3)中引起绕组振动和相应声功率的力的分量。

表 A.1 谐波电流引起的绕组电动力的分量

声频率	幅值 r.m.s.	相位角	引起振动的原因
$2f$	i_1^2	180°	基波电流
$(n - 1)f$	$2i_1 i_n$	φ_n	基波电流与谐波电流(低次间谐波)共同作用
$(n + 1)f$	$2i_1 i_n$	$180^\circ + \varphi_n$	基波电流与谐波电流(高次间谐波)共同作用
$2nf$	i_n^2	$180^\circ + 2\varphi_n$	n 次谐波电流

声频率的最后一个分量(两倍 n 次谐波频率)对声级增加的影响较小。这是由于与基波电流相比,谐波电流幅值实际上较小。

当电流频谱除了基波电流外还包括不止一个谐波(如:5 次、7 次、11 次和 13 次谐波)时,实际上仅考虑涉及基波电流在内的力的分量就足够了。

A.2 B6 换流桥引起的典型电流频谱中的力的分量

例如在高压直流输电等方案中广泛应用的 B6 换流桥,其电流频谱的幅值和相位已众所周知。对于角结和星结绕组幅值是相同的,但相位角是不一样的。两种情况的数据见表 A.2 所示,其中也包括了假设相位关系未知的第三种情况。表 A.2 中给出的星结和角结绕组的电流频谱的电流波形见图 A.1。

表 A.2 B6 换流桥引起的电流频谱

谐波电流		角结绕组		星结绕组		未知相位关系	
次数	频率	电流幅值 p.u.	电流相位角	电流幅值 p.u.	电流相位角	电流幅值 p.u.	电流相位角
1 次	50Hz	1.000	0°	1.000	0°	1.000	未知
5 次	250Hz	0.200	0°	0.200	180°	0.200	未知
7 次	350Hz	0.143	0°	0.143	0°	0.143	未知
11 次	550Hz	0.091	0°	0.091	180°	0.091	未知
13 次	650Hz	0.077	0°	0.077	0°	0.077	未知
17 次	850Hz	0.059	0°	0.059	180°	0.059	未知
19 次	950Hz	0.053	0°	0.053	0°	0.053	未知

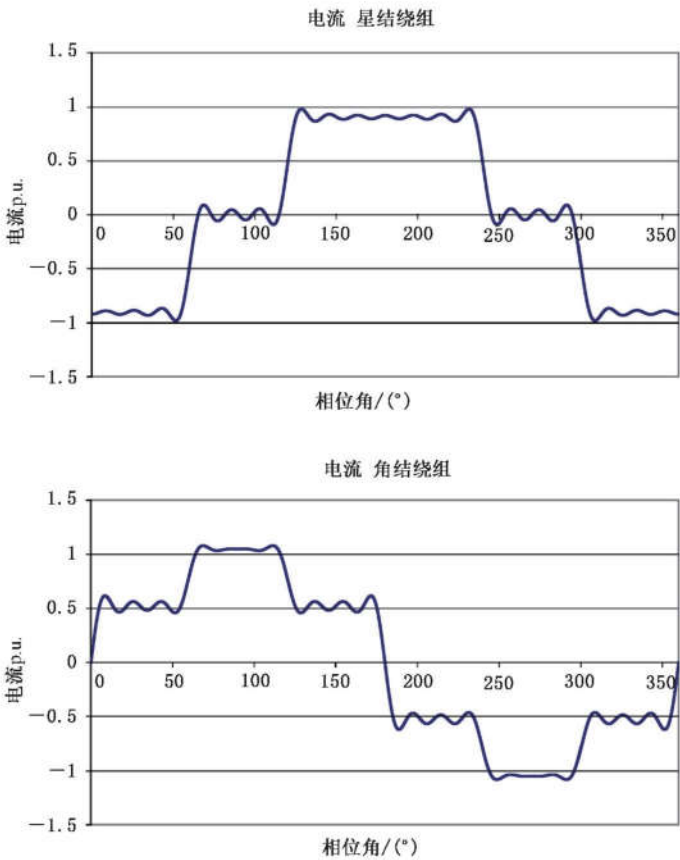


图 A.1 表 A.2 中给出的星结和角结绕组的电流频谱的电流波形

对表 A.2 的电流频谱应用 A.1 所揭示的理论可估算每个声频引起的绕组力。从这些数值中可导出一系列等效试验电流。这些试验电流与提供的电流频谱产生的绕组力相同,因此在测量每个频率的声级时需要注入这些电流,如 5.2.5.2 所描述。

表 A.3 展示了包括了基波电流的所有分量的力和试验电流的计算结果,这些分量对于声级的增加有显著影响。用户可能会要求通过将计算延伸到谐波和谐波对来证实其重要性。表中的电流频谱以 p.u. 给出,力和试验电流也是如此。

表 A.3 试验电流和力分量计算

噪声谐波频率 Hz	谐波电流次数 次	谐波力幅值 p.u.	相位角、力、试验电流、试验频率 电动力按照 SRSS 计算: $F_n = [(2I_n I_1)^2 + (2I_m I_1)^2]^{1/2}$ 试验电流: $i_{nT} = F_n^{1/2}$		
			角结绕组	星结绕组	未知相位关系
100	1	1.000	$F_1 = 1.000, i_{1T} = 1.000, 50 \text{ Hz}$		
200	5-1	$2 \times 0.200 \times 1.000 = 0.400$	$F_2 = 0.400, i_{2T} = 0.632, 100 \text{ Hz}$		
300	5+1 7-1	$2 \times 0.200 \times 1.000 = 0.400$ $2 \times 0.143 \times 1.000 = 0.286$	$\varphi_5 = 0^\circ$ $\varphi_7 = 0^\circ$ 差 $F_3 = 0.114,$ $i_{3T} = 0.338,$ 150 Hz	$\varphi_5 = 180^\circ$ $\varphi_7 = 0^\circ$ 和 $F_3 = 0.686,$ $i_{3T} = 0.828,$ 150 Hz	SRSS $F_3 = 0.492,$ $i_{3T} = 0.701,$ 150 Hz
400	7+1	$2 \times 0.143 \times 1.000 = 0.286$	$F_4 = 0.286, i_{4T} = 0.535, 200 \text{ Hz}$		
500	11-1	$2 \times 0.091 \times 1.000 = 0.182$	$F_5 = 0.182, i_{5T} = 0.427, 250 \text{ Hz}$		
600	11+1 13-1	$2 \times 0.091 \times 1.000 = 0.182$ $2 \times 0.077 \times 1.000 = 0.154$	$\varphi_{11} = 0^\circ$ $\varphi_{13} = 0^\circ$ 差 $F_6 = 0.028,$ $i_{6T} = 0.167,$ 300 Hz	$\varphi_{11} = 180^\circ$ $\varphi_{13} = 0^\circ$ 和 $F_6 = 0.336,$ $i_{6T} = 0.580,$ 300 Hz	SRSS $F_6 = 0.238,$ $i_{6T} = 0.488,$ 300 Hz
700	13+1	$2 \times 0.077 \times 1.000 = 0.154$	$F_7 = 0.154, i_{7T} = 0.392, 350 \text{ Hz}$		
800	17-1	$2 \times 0.059 \times 1.000 = 0.118$	$F_8 = 0.118, i_{8T} = 0.344, 400 \text{ Hz}$		
900	17+1 19-1	$2 \times 0.059 \times 1.000 = 0.118$ $2 \times 0.053 \times 1.000 = 0.106$	$\varphi_{17} = 0^\circ$ $\varphi_{19} = 0^\circ$ 差 $F_9 = 0.012,$ $i_{9T} = 0.110,$ 450 Hz	$\varphi_{17} = 180^\circ$ $\varphi_{19} = 0^\circ$ 和 $F_9 = 0.224,$ $i_{9T} = 0.473,$ 450 Hz	SRSS $F_9 = 0.159,$ $i_{9T} = 0.398,$ 450 Hz
1 000	19+1	$2 \times 0.053 \times 1.000 = 0.106$	$F_{10} = 0.106, i_{10T} = 0.326, 500 \text{ Hz}$		

由表 A.3 给出的结果汇总见表 A.4。

表 A.4 谐波力及试验电流汇总

噪声谐波频率 Hz	试验电流频率 Hz	角结绕组		星结绕组		未知相位关系	
		力 p.u.	试验电流 p.u.	力 p.u.	试验电流 p.u.	力 p.u.	试验电流 p.u.
100	50	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
200	100	0,400	0,632	0,400	0,632	0,400	0,632
300	150	0,114	0,338	0,686	0,828	0,492	0,701
400	200	0,286	0,535	0,286	0,535	0,286	0,535
500	250	0,182	0,427	0,182	0,427	0,182	0,427
600	300	0,028	0,167	0,336	0,580	0,238	0,488
700	350	0,154	0,392	0,154	0,392	0,154	0,392
800	400	0,118	0,344	0,118	0,344	0,118	0,344
900	450	0,012	0,110	0,224	0,473	0,159	0,398
1 000	500	0,106	0,326	0,106	0,326	0,106	0,326

表 A.4 初步揭示了谐波电流相位角对绕组力和谐波噪声的影响。对于 B6 换流电桥的电流频谱引起的声级增加,星结绕组大于角结绕组。由于谐波电流的相位关系一般不提供,所以应用 SRSS 方法(见 5.2.5.3)可能是获得该数值的唯一方法。可看出,这种方法得到的力的数值介于星结绕组与角结绕组之间,更接近于较高的星接绕组。因此 SRSS 在相位关系未提供的情况下对解决该问题是一种合理的方法。

表 A.4 进一步说明了当计算或测量由于谐波电流引起的声级增加时,需要考虑的噪声频率达到 1 000 Hz 或更高。通常的做法是通过注入最高频率为 1 000 Hz 的谐波电流来测量滤波电抗器的声级。

A.3 由谐波电流引起的声级增加的计算评估

A.3.1 概述

在不可能对变压器和电抗器进行高频励磁的情况下,采用计算评估可能是预测谐波电流所引起的声级的唯一可行方法。根据试验室试验设备的使用情况,这种状况通常应用于大型电力变压器,也可用于其他电力设备。

公式(5)给出的振动表面发射的声功率为 $W = \rho_0 c S \sigma \omega^2 x^2$ 。

由于已知基于基波电流的变压器和电抗器的声功率,因此,只要绕组位移 x 和作为噪声频率函数的发射效率 σ 是已知的,其他谐波电流和频率下的声功率就可相对计算。计算顺序和步骤见 5.2.5.3,其中从 a) ~ c) 的步骤见 A.1 和 A.2,从 d) ~ i) 的步骤简介见 A.3.2 ~ A.3.6。

A.3.2 应用对数方法计算绕组位移对力的动态响应[5.2.5.3 中的 d) 和 e)]

绕组位移 x 与力 F 成正比,但也与声频率有关。力与位移的关系由转换函数 $R(f)$ 表示的动态响应给出。可写为公式(A.4)的形式:

$$x(f) \sim R(f) \times F \quad \text{或者} \quad x^2(f) \sim R^2(f) \times F^2 \dots\dots\dots (A.4)$$

用对数方法将相对于基本声频率 f_0 (例如 100 Hz) 的声级变化表示为公式(A.5)的形式:

$$\Delta x(f) = 20 \times \lg [R(f)/R(f_0)] + 20 \times \lg [F(f)/F(f_0)] \quad \cdots \cdots \cdots (A.5)$$

尽管谐波力分量的推导在 A.2 中进行了描述,但是确定动态响应函数 $R(f)$ 仍需要研究专门的方法。

A.3.3 角频率转换为对数形式[5.2.5.3 中的 f]

按式(4),将角频率的平方转换为相对于基本声频率 f_0 的量表示为公式(A.6)的形式:

$$\Delta \omega = 20 \times \lg [f/f_0] \quad \cdots \cdots \cdots (A.6)$$

A.3.4 发射效率 σ 取对数[5.2.5.3 中的 g]

绕组和油箱的声发射效率取决于频率(见 5.4),这将体现为声频率 f 相对于基本声频率 f_0 引起声级的变化。由公式(A.7)给出:

$$\Delta \sigma(f) = 10 \times \lg [\sigma(f)/\sigma(f_0)] \quad \cdots \cdots \cdots (A.7)$$

A.3.5 A 计权应用[5.2.5.3 中的 h]

因为声级应以 A 计权的形式提供(见 6.2),因此宜考虑相应声级的变化。见公式(A.8):

$$\Delta A(f) = A(f) - A(f_0) \quad \cdots \cdots \cdots (A.8)$$

A.3.6 各分量求和[5.2.5.3 中的 $d) \sim h)$]

用 dB(A)表示的与有关声频 f 相关的等值谐波电流相对于与基频 f_0 相关的电流引起的总的声级增加 $\Delta L(f)$ 是根据公式(A.5)~公式(A.8)的结果之和来计算的。见公式(A.9):

$$\Delta L(f) = \Delta x(f) + \Delta \omega + \Delta \sigma(f) + \Delta A(f) \quad \cdots \cdots \cdots (A.9)$$

对于某些大型电力变压器,采用表 A.4 给出的力的数值、特定的绕组动态响应函数、特定的发射效率函数,按照全部步骤,得到的声级增加值介于角结绕组谐波频谱的 9 dB(A)与星结绕组谐波频谱的 15 dB(A)之间。

注:换流变压器的现场测量已经表明声级增加为 20 dB(A)或更多。

参 考 文 献

- [1] GB/T 1094.6 电力变压器 第6部分:电抗器
 - [2] GB/T 3785.1 电声学 声级计 第1部分:规范
 - [3] GB/T 16404.1—1996 声学 声强法测定噪声源的声功率级 第1部分:离散点上的测量
 - [4] GB/T 16404.2—1999 声学 声强法测定噪声源的声功率级 第2部分:扫描测量
 - [5] IEC 61378-3:2015 Converter transformers—Part 3:Application guide
 - [6] IEC TS 61973:2012 High voltage direct current (HVDC) substation audible noise
 - [7] CIGRE Technical Brochure No.202:2002 HVDC station audible noise
 - [8] Pyrog,S.、Benzmüller,F.、Greve,G.、Ploetner,C.Sound contribution of saturable reactors in rectifier transformers during FAT,CIGRE SC A2 Colloquium,Cracow,Poland 2017.
-