



中华人民共和国国家标准

GB/T 1094.3—2017
代替 GB/T 1094.3—2003

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

Power transformers—Part 3: Insulation levels, dielectric tests and
external clearances in air

(IEC 60076-3:2013, MOD)

2017-12-29 发布

2018-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

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 总则	2
5 设备最高电压和额定绝缘水平	3
6 可改变绕组接线方式的变压器	4
7 绝缘试验	4
8 已投运变压器的绝缘试验	11
9 辅助接线的绝缘(AuxW)	11
10 外施耐压试验(AV)	11
11 感应电压试验(IVW 和 IVPD)	12
12 线端交流耐压试验(LTAC)	14
13 雷电冲击试验(LI、LIC、LIN、LIMT)	15
14 操作冲击试验(SI)	21
15 试验失败采取的措施	22
16 外绝缘空气间隙	22
附录 A (资料性附录) 本部分与 IEC 60076-3:2013 的技术性差异及其原因	25
附录 B (资料性附录) 确定绝缘试验、绝缘水平和绝缘间隙的基本原则	26
附录 C (资料性附录) 由高压绕组向低压绕组传递的过电压	29
附录 D (资料性附录) 询价和订货时需提供的有关变压器绝缘要求和绝缘试验的信息	31
附录 E (资料性附录) IEC 60076-3:2013 中的不同类别绕组的要求与试验、试验电压水平、 绕组中性点端子的 U_m 值的确定和试验电压、最小空气间隙、中性点绝缘电压水平计算	33
附录 F (资料性附录) 变压器局部放电测量应用导则	41
参考文献	45
图 1 带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)施加试验电压的时间顺序	13
图 C.1 过电压电容传递的等值电路	29
图 F.1 使用电容式套管试验抽头的局部放电测量校准电路	41
图 F.2 采用高压耦合电容器的局部放电测量线路	42
表 1 不同类别变压器的要求与试验	6
表 2 绕组的试验电压水平	7

表 3 分级绝缘变压器中性点端的试验电压水平	7
表 4 绕组线端的最小空气间隙	24
表 5 中性点套管带电部分对地的最小空气间隙	24
表 A.1 本部分与 IEC 60076-3:2013 的技术性差异及其原因	25
表 E.1 不同类别绕组的要求与试验	33
表 E.2 试验电压水平	34
表 E.3 特殊情况下的试验电压水平	35
表 E.4 最小空气间隙	37

前 言

GB/T 1094《电力变压器》分为以下部分:

- 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10.1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变压器的设计 and 应用;
- 第16部分:风力发电用变压器;
- 第18部分:频率响应测量。

本部分为 GB/T 1094 的第3部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 1094.3—2003《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》,与 GB/T 1094.3—2003 相比,主要技术变化如下:

- 对规范性引用文件进行了调整(见第2章,2003年版的第2章);
- 增加了绕组的额定电压的定义(见第3章,2003年版的第3章);
- 对绝缘水平标志进行了调整(见第5章,2003年版的第5章);
- 对绝缘试验顺序和试验项目进行了调整(见第7章,2003年版的第7章);
- 对 $U_m=126\text{ kV}$ 变压器要求进行操作冲击试验(见第7章,2003年版的第7章);
- 感应耐压(电压)试验调整为以 U_i 为基准,并调整了局部放电测量的预加电压、测量电压、测量时间和局部放电量限值(见第11章,2003年版的第12章);
- 增补了系统标称电压为 750 kV 和 $1\,000\text{ kV}$ 变压器的绕组绝缘水平和中性点绝缘水平及外绝缘空气间隙,并增补了相关的试验要求(见第7章和第16章,2003年版的第7章和第16章);
- 将绕组线端交流耐压试验作为单独的试验项目(见第7章和第12章,2003年版的第7章);
- 对雷电冲击试验和操作冲击试验的要求进行了调整(见第13章和第14章,2003年版的第13、14、15章);
- 对外绝缘的空气间隙进行了调整(见第16章,2003年版的第16章);
- 对附录进行了调整,删除了附录“ACSD 试验的试验电压”,新增了“询价和订货时需提供的有关变压器绝缘要求和绝缘试验的信息”和“确定绝缘试验、绝缘水平和绝缘间隙的基本原则”两个附录(见附录B和附录D,2003年版的附录D)。

本部分使用重新起草法修改采用 IEC 60076-3:2013《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》。

本部分与 IEC 60076-3:2013 相比存在技术性差异,这些差异所涉及的条款已通过在其外侧页边空

白处位置的垂直单线(⊥)进行了标识,附录 A 中给出了相应技术性差异及其原因的一览表。

本部分还做了下列编辑性修改:

- 全文示例中的电压均按我国的实际情况进行了调整;
- 删除了 IEC 60076-3:2013 中 3.6 的“注”的内容;
- 删除了 IEC 60076-3:2013 的 7.1 中对“线端雷电截波冲击试验”的注释;
- 在 7.3.2.1 中增加了试验时相间感应电压可能超过规定绝缘水平的提示性内容;
- 将 IEC 60076-3:2013 的 7.3.2.2 中的“雷电截波冲击试验(LIC)”和“中性点端子雷电全部冲击试验(LIN)”调整为型式试验,并作为本部分的 7.3.2.2 的内容,将 IEC 60076-3:2013 的 7.3.2.2 中的其他 3 个试验项目继续作为特殊试验,并作为本部分的 7.3.2.3 的内容;
- 将 IEC 60076-3:2013 的 7.3.3.1 中的“雷电截波冲击试验(LIC)”和 7.3.3.2 中的“中性点端子雷电全部冲击试验(LIN)”调整为型式试验,并作为本部分的 7.3.3.2 的内容,将 IEC 60076-3:2013 的 7.3.3.1 中的其他 3 个试验项目继续作为例行试验,并作为本部分的 7.3.3.1 的内容,将 IEC 60076-3:2013 的 7.3.3.2 中的其他 2 个试验项目继续作为特殊试验,并作为本部分的 7.3.3.3 的内容;
- 将 IEC 60076-3:2013 中表 1 的内容调整为本部分的 E.1 的内容;
- 将 IEC 60076-3:2013 中表 2 和表 3 的内容调整为本部分的 E.2 的内容;
- 将 IEC 60076-3:2013 中 7.4 的内容调整为本部分的 E.3 的内容;
- 在 13.4.1 中增加了对全绝缘的变压器,当中性点不引出时有关雷电全波冲击试验电压值及如何施加的相关说明;
- 删除了 IEC 60076-3:2013 中第 9 章的注和 16.1 的注 2;
- 将 IEC 60076-3:2013 中第 16 章中有关外绝缘最小空气间隙的确定原则和外绝缘最小空气间隙值调整为本部分的 E.4 的内容;
- 对附录的顺序进行了调整,本部分中增加了附录 A,将 IEC 60076-3:2013 中的附录 A 改为本部分的附录 F,附录 B 改为本部分的附录 C,附录 C 改为本部分的附录 D,附录 D 改为本部分的附录 E.5 的内容,附录 E 改为本部分的附录 B。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国变压器标准化技术委员会(SAC/TC 44)归口。

本部分起草单位:沈阳变压器研究院股份有限公司、保定天威保变电气股份有限公司、中国电力科学研究院、国家变压器质量监督检验中心、特变电工沈阳变压器集团有限公司、西安西电变压器有限责任公司、正泰电气股份有限公司、特变电工衡阳变压器有限公司、常州西电变压器有限责任公司、国网吉林省电力有限公司电力科学研究院、顺特电气设备有限公司、明珠电气股份有限公司、新华都特种电气股份有限公司、广东电网有限责任公司电力科学研究院、国网陕西省电力公司电力科学研究院、广东奥莱恩电力科技股份有限公司、广东中鹏电气有限公司、广州中车骏发电气有限公司、保定保菱变压器有限公司、保定天威集团特变电气有限公司、中广核工程有限公司。

本部分主要起草人:章忠国、张喜乐、张显忠、李洪秀、李世成、任晓红、李云龙、王健、帅远明、李锦彪、孙树波、聂三元、郭满生、敖明、刘燕、蔡定国、宗宝峰、林春耀、刘孝为、王文光、周月梅、樊建平、王维征、赵峰、曾令军。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB 1094.3—1971、GB 1094.3—1979、GB 1094.3—1985、GB/T 1094.3—2003。

引 言

本部分规定了指定绕组及其端子的绝缘要求和相应的绝缘试验。本部分还推荐了电力变压器外绝缘的空气间隙(第16章)。

本部分规定的绝缘水平和绝缘试验只适用于内绝缘。虽然将变压器内绝缘规定的额定耐受电压值作为外绝缘的基准是合理的,但这种做法可能不符合全部的实际情况。非自恢复性内绝缘出现的故障是灾难性的,通常会导致变压器长期退出运行,而当外部发生闪络时,可能只会使运行有短暂的中断而不会导致永久性的损坏。因此,为了提高安全性,用户可以规定变压器内绝缘的试验电压值比系统中其他设备的外绝缘要高一些。当存在这种差别时,变压器的外绝缘间隙宜调整到完全能承受内绝缘的试验要求。

附录B中提出了根据设备最高电压 U_m 来确定变压器的绝缘试验、绝缘水平和外绝缘空气间隙的基本原则。

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

1 范围

GB/T 1094的本部分规定了电力变压器所采用的有关绝缘试验和最低绝缘试验水平。当用户没有规定时,本部分推荐了变压器外部带电部件之间及它们对地的最小空气绝缘间隙。

本部分适用于GB/T 1094.1所规定的电力变压器。对于有各自标准的某些类型电力变压器和电抗器,本部分只有在被这些标准明确引用时才适用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 311.1 绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则(GB/T 311.1—2012,IEC 60071-1:2006,MOD)

GB/T 1094.1 电力变压器 第1部分:总则(GB/T 1094.1—2013,IEC 60076-1:2011,MOD)

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 4109 交流电压高于1 000 V的绝缘套管(GB/T 4109—2008,IEC 60137 Ed.6.0,MOD)

GB/T 7354 局部放电测量(GB/T 7354—2003,IEC 60270:2000,IDT)

GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术 第1部分:一般定义及试验要求(IEC 60060-1:2010,MOD)

GB/T 16927.2 高电压试验技术 第2部分:测量系统(GB/T 16927.2—2013,IEC 60060-2:2010,MOD)

3 术语和定义

GB/T 1094.1和GB/T 2900.95界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

适用于变压器绕组的设备最高电压 highest voltage for equipment applicable to a transformer winding

U_m

三相系统中相间最高电压的方均根值,变压器绕组绝缘是按此设计的。

3.2

绕组的额定电压 rated voltage of a winding

U_r

在处于主分接的带分接绕组的端子间或不带分接的绕组端子间指定施加的电压或空载时感应出的电压。对于三相绕组,是指线路端子间的电压。

注1:当施加在一个绕组上的电压为额定值时,在空载情况下,所有绕组同时出现各自的额定电压值。

注2:对于拟联结成星结三相组的单相变压器或接到一个三相系统的线路与中性点之间的单相变压器,用相-相电

压除以 $\sqrt{3}$ 来表示额定电压。例如 $500/\sqrt{3}$ kV。

注 3: 对于要接到网络相间的单相变压器,用相-相电压表示额定电压。

注 4: 对于三相串联变压器的串联绕组,如果该绕组设计为开路绕组,则按照绕组联结成星结来给出额定电压。

3.3

额定绝缘水平 rated insulation level

一组额定耐受电压,表示绝缘的介电强度特性。

3.4

额定耐受电压 rated withstand voltage

用于标准绝缘耐压试验指定的试验电压值,以证明绝缘满足指定的试验电压。

3.5

变压器绕组的全绝缘 uniform insulation of a transformer winding

与变压器绕组端子相连接的所有出线端都具有相同的规定的绝缘水平。

3.6

变压器绕组的分级绝缘 non-uniform insulation of a transformer winding

变压器绕组的中性点端子直接或间接接地时,其中性点端设计的绝缘水平低于线端所规定的绝缘水平。

4 总则

电力变压器的绝缘要求和相应的绝缘试验,是按指定绕组及其接线端子规定的。

对于液浸式变压器或充气式变压器,这些要求仅适用于内绝缘。外绝缘补充要求或试验应由制造方与用户商定。如果用户对变压器外绝缘空气间隙没有特别的要求,则按第 16 章的规定执行。如果用户在变压器上的接线可能减小变压器原有的间隙距离时,则应在询价时指明。

套管应按 GB/T 4109 单独进行型式试验和例行试验(包括满足特殊变压器试验水平的适当的套管试验水平),以验证其相对地的外绝缘和内绝缘。

当变压器需要在海拔超过 1 000 m 处运行时,则间隙距离应按其要求进行设计。同时也有必要选择比低海拔地区运行时的套管具有较高绝缘水平的套管,见本部分第 16 章和 GB/T 4109。

在进行绝缘试验时,如有必要,则制造方可以对套管端子采取屏蔽措施,但是与套管端子相邻的接地部分的任何屏蔽应视为运行时变压器的一部分(局部放电试验期间所需要的屏蔽除外)。

假定所用的套管和分接开关均是按有关标准设计和试验的,但仍需在装配完整的变压器上进行绝缘试验,以便对这些组件的使用和安装是否正确进行检查。如果分接开关在其制造厂内没有按照 GB/T 10230.1 进行绝缘例行试验,则按照本部分进行的试验可以视为该组件的唯一绝缘例行试验。

试验期间绝缘系统的温度应不低于 5 ℃,但允许高于 GB/T 1094.1 规定的试验温度。

变压器(包括可能影响其绝缘介电强度的各种部件在内)应如同运行时一样装配完整。正常情况下,绝缘气体或液体在变压器进行绝缘试验时不循环流动,因此冷却器不需要安装。在试验过程中,用于收集或检测绝缘故障产生游离气体的设备应安装并监测。如果在任一试验中检测到了故障气体,则应调查分析故障气体的种类和起因,并在制造方与用户的协商下采取进一步措施。

注 1: 试验时,外部过电压保护设备(如:避雷器)不需要安装,且宜拆除套管火花放电间隙或增大间隙以避免在试验中发生放电。

注 2: 大型电力变压器通常在绝缘试验前、后采集油样进行溶解气体分析。

液浸式变压器应采用与运行时同一类型(如:矿物油、酯、硅油等)和相同性能参数(影响试验的性能参数)的液体进行试验。

注3:一些用户会要求采用OD冷却方式的变压器在IVPD试验时保持油的循环流动,以便监测绝缘油的油流带电性能,但这是一个非常特殊的要求,不在本部分涵盖的范围之内。

采用电缆盒连接的变压器或直接接到SF₆全密封金属外壳电器装置的变压器,如果需要,可设计成用临时套管进行临时连接的结构,以便进行绝缘试验。同样地,也可根据协议,用合适的油/空气套管来代替油/SF₆套管,以便进行试验。这种情况下,替代套管在变压器内部的一端的设计,包括带电部分的位置和在变压器内部的绝缘距离均应与实际运行时的套管相同(应在套管尺寸制造偏差的正常范围内)。

当制造方需要在变压器或分接开关内部或外部装有非线性元件(如:避雷器或放电间隙),以限制传递的瞬变过电压时,应在投标阶段和订货时提请用户注意,并建议在变压器铭牌上的电路图中注明。

在带电运行时,如果变压器的任何端子设计成开路,则还应考虑在开路端子上会产生传递电压的可能性,参见附录C。在雷电冲击试验中所有非被试端子和中性点端子通常接地,见第13章。

5 设备最高电压和额定绝缘水平

每个绕组的线端和中性点端均标出其设备最高电压 U_m (见GB/T 1094.1)。

根据 U_m 值的不同,变压器绝缘试验的规则是不同的。当一台变压器中不同绕组的试验规则之间有矛盾时,则整台变压器应采用适合于最高 U_m 值绕组的试验规则。

不同 U_m 绕组的试验规则见表1。

当串联绕组(如:自耦变压器和移相变压器)的额定电压低于系统额定电压时,其 U_m 值应采用与绕组连接的系统最高电压对应的额定电压。

U_m 的标准值见表2,除非另有规定,变压器绕组所用的 U_m 值可以等于或略高于绕组额定电压值。

注1:对于拟组成星结三相组的单相变压器,用相间额定电压除以 $\sqrt{3}$ 说明,例如:500/ $\sqrt{3}$ kV。此时相间电压值便决定了 U_m 的选取,因而选 $U_m=550$ kV(也见GB/T 1094.1)。此原则同样适用于拟用于单相系统的单相变压器,为了确定试验电压,用最高相对地电压乘以 $\sqrt{3}$ 作为等值的 U_m 。

注2:对于具有两个相反的相对地电压的变压器(例如用于铁路供电系统的变压器)绕组,如无另行规定,则 U_m 与相与相之间的电压相关。

注3:可能出现所选取的某些分接电压略高于 U_m 标准值的情况,但绕组所连接系统的最高电压仍保持在这个标准值之内。由于绝缘要求要与实际的系统条件相配合,因此宜将此标准值作为变压器的 U_m 值,而不是选取与其最接近的更高值。

注4:在某些极特殊条件下的应用中,规定其他的耐受电压组合可能是合理的,此时,宜按GB/T 311.1的有关规定。

注5:在某些应用中,角结绕组是通过一个外部端子接地的。此时,对该绕组可要求按设备最高电压 U_m 值选取一个较高的耐受电压值,且宜由造方与用户协商确定。

设备最高电压及其额定绝缘水平(一组规定的额定耐受电压值)确定了变压器的绝缘特性。这些特性用一组绝缘试验来验证,见第7章。

变压器每个绕组上的设备最高电压值和额定绝缘水平应作为询价和签定合同的内容之一提出。如果有一个绕组为分级绝缘,则中性点端的设备最高电压值和其额定绝缘水平应按表3的规定。

绕组额定绝缘水平标志如下:

U_m /SI/LI/LIC/AC 连同每个绕组端子对应的相应值(见下例)。

如果绕组没有指定SI或LIC耐压水平,则标志中将SI或LIC省略,因此对于未指定操作冲击电压水平和截断雷电冲击电压水平的绕组线端和中性点端的额定绝缘水平标志如下:

U_m /LI/AC 连同每个绕组端子对应的相应值。

如果绕组中性点端与线端具有相同的额定绝缘水平,则中性点端的额定绝缘水平不需要单独标志。此处和以下示例中的字母缩写含义如下:

SI——具有最高 U_m 值的绕组线路端子上的额定操作冲击耐受电压;

LI——每个独立绕组端子的额定雷电冲击耐受电压；

LIC——进行截波雷电冲击试验时的每个独立绕组线路端子的额定雷电冲击耐受电压；

AC——每个绕组端子对地最高额定交流耐受电压。

注 6：变压器设计时遵循的 AC 值，通常是该变压器在试验中承受的最高交流电压。

HV——高压；

MV——中压；

LV——低压；

N——中性点。

所有绕组的额定耐受电压值均应标志在铭牌上。

标准标志原则如下例所示：

示例 1：

标称额定电压为 66/10.5 kV, U_m (HV) 为 72.5 kV, U_m (LV) 为 12 kV, 两个绕组均为全绝缘和 Y 联结。

铭牌标志：

HV	U_m /LI/AC	72.5/325/140 kV
LV	U_m /LI/AC	12/75/35 kV

示例 2：

U_m (HV) 线端为 252 kV (额定电压为 220 kV), 分级绝缘, Y 联结；

U_m (HV) 中性点端为 126 kV, 不直接接地；

U_m (MV) 线端为 126 kV, 分级绝缘, Y 联结；

U_m (MV) 中性点端为 52 kV, 不直接接地；

U_m (LV) 线端为 12 kV, D 联结。

铭牌标志：

HV	U_m /SI/LI/LIC/AC	252/750/950/1 050/395 kV
HVN	U_m /LI/AC	126/400/200 kV
MV	U_m /LI/LIC/AC	126/480/530/200 kV
MVN	U_m /LI/AC	52/250/95 kV
LV	U_m /LI/LIC/AC	12/75/85/35 kV

6 可改变绕组接线方式的变压器

如无另行规定, 对于运行中多于一种接线方式的变压器绕组, 则应在每种接线方式下都进行试验。

7 绝缘试验

7.1 总则

变压器的绝缘性能由绝缘试验来检验。以下是对不同试验的说明：

——线端雷电全波冲击试验(LI)按 13.2；

本试验用来验证设备在运行过程中耐受瞬态快速上升典型雷电冲击电压的能力。用来验证被试变压器的雷电冲击耐受强度, 冲击波施加于线端。该试验包含高频电压分量, 与交流电压试验不同, 在绕组中产生的冲击分布是不均匀的。

——线端雷电截波冲击试验(LIC)按 13.3；

与 LI 试验目的相同, 本试验用来验证设备在运行过程中耐受某些高频冲击的能力。该试验包括全波冲击和产生电压急剧变化的波尾截断冲击。截波冲击试验与全波冲击试验相比, 其电压峰值更高, 频率也更高。

- 中性点端子雷电冲击试验(LIN)按 13.4;
本试验用来验证中性点端子及它所连接的绕组对地及对其他绕组以及被试绕组纵绝缘的雷电冲击耐受强度。
- 线端操作冲击试验(SI)按第 14 章;
本试验用来验证设备在运行过程中耐受与开关操作相关的典型的上升时间缓慢瞬态电压的能力。本试验用来验证线端和它所连接的绕组对地及对其他绕组的操作冲击耐受强度,同时也验证相间和被试绕组纵绝缘的操作冲击耐受强度。此试验为单相试验,感应电压分布在变压器所有绕组上,在被试相线端施加电压,其他线端开路,被试相线端电压近似按匝比确定。被试相绕组电压分布与该绕组施加感应电压试验相似。
- 外施耐压试验(AV)按第 10 章;
本试验用来验证线端和中性点端子以及和它所连接的绕组对地及对其他绕组的交流电压耐受强度,试验电压施加在绕组所有的端子上,包括中性点端子,因此不存在匝间电压。
- 线端交流耐压试验(LTAC)按第 12 章;
本试验用来验证每个线端对地的交流电压耐受强度,试验时电压施加在一个或多个绕组线端,本试验允许分级绝缘变压器线端施加适合该线端的电压。
- 感应耐压试验(IVW)按 11.2;
本试验用来验证线端和它所连接的绕组对地及对其他绕组的交流耐受强度,同时也验证相间和被试绕组纵绝缘的交流电压耐受强度。试验接线按照变压器运行工况进行,试验中对称电压出现在线端和匝间,中性点没有电压。三相变压器采用三相电压进行试验。
- 带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)按 11.3;
本试验用来验证变压器在正常运行条件下不会发生有害的局部放电。以与运行同样的方式在变压器上施加试验电压。试验中对称电压出现在线端和匝间,中性点没有电压。三相变压器采用三相电压进行试验。
- 辅助接线的绝缘试验(AuxW)按第 9 章;
本试验用来验证不与变压器绕组连接的变压器辅助接线的绝缘。
- 在两个或更多端子同时进行的雷电冲击试验(LIMT)按 13.1.4.3。
本试验用来验证变压器耐受两个或更多端子同时遭受雷电冲击时内部电压上升的能力。该试验仅适用于一些具有串接绕组在运行中短接的特殊变压器(例如带有载旁通路的移相变压器)或者是在运行中存在两个或更多的端子同时遭受冲击的变压器。

注:该试验又被称为“双端雷电冲击试验”。

7.2 试验要求

7.2.1 概述

绝缘试验要求包括试验项目和试验电压水平两方面,此要求取决于被试变压器中最高电压绕组的 U_m 值。所要求的试验项目见表 1,具体要求见 7.3。

注:在两个或更多端子同时进行的雷电冲击试验是一项特殊试验,不考虑 U_m ,仅适用于一些特殊变压器,相关阐述不包括在该表中。

任何超出本部分要求所附加的绝缘试验及其试验电压水平应由用户在询价和订货阶段提出,因为这些参数可能会影响产品的设计(参见附录 D)。

试验的详细说明参见 GB/T 16927.1,本部分中没有给出的试验参数和试验值的偏差按 GB/T 16927.1。

表 1 不同类别变压器的要求与试验

设备最高电压范围	$U_m \leq 72.5 \text{ kV}$	$72.5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$		$U_m > 170 \text{ kV}$
绝缘类型	全绝缘	全绝缘	分级绝缘	全绝缘和分级绝缘
线端雷电全波冲击试验(LI)	型式(包括在 LIC 中)	例行	例行	例行
线端雷电截波冲击试验(LIC)	型式	型式	型式	型式
中性点端子雷电全波冲击试验(LIN)	型式 ^a	型式 ^a	型式	型式
线端操作冲击试验(SI)	不适用	特殊	特殊	例行
外施耐压试验(AV)	例行	例行	例行	例行
感应耐压试验(IVW)	例行	例行	例行	不适用
带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)	特殊 ^b	例行 ^b	例行 ^b	例行
线端交流耐压试验(LTAC)	不适用	特殊	例行 ^c	特殊
辅助接线的绝缘试验(AuxW)	例行	例行	例行	例行
注:如果用户另有要求,不同类别绕组的要求与试验也可参照 E.1 的有关规定,但需要在订货合同中注明。				
^a 对全绝缘的三相变压器,当中性点不引出时,中性点端子雷电全波冲击试验(LIN)为特殊试验。 ^b IVW 的试验要求包括在 IVPD 试验中,因此只需要一个试验。此外, $U_m = 72.5 \text{ kV}$ 且额定容量为 10 000 kVA 及以上变压器的 IVPD 试验为例行试验。 ^c 经用户与制造方协商一致,该类型变压器的 LTAC 试验可由 SI 试验代替。				

7.2.2 试验电压水平

由绕组的设备最高电压 U_m 确定的标准试验电压水平见表 2。表中不同标准试验电压水平的选取,与系统中预期过电压条件的严重性及特定装置的重要程度有关,相关导则见 GB/T 311.1。

所有试验电压均为相电压。

如无另行规定,则绝缘试验水平应取表 2 中给出的 U_m 所对应的最低值。一般情况下,表 2 中每行给定的值是配合使用的。如果只规定雷电冲击电压水平,那么与该雷电冲击电压水平位于同一行的其他试验电压值将被采用。对于每一种试验,用户可以规定高于 U_m 所对应的最低值的任何值,应优先选用标准值以便绝缘配合,但不必选择表 2 中同一行的数值。如果规定更高的电压水平,则应在询价和订货时说明。

注:某些安装条件下,特别是变压器经由远方电缆或长距离架空线路供电时,会承受频繁的和重复性的严重过电压。在这种情况下,用户与制造方可以协商确定设备采用较高的雷电冲击、操作冲击以及其他试验电压。例如对于 $U_m \leq 1.1 \text{ kV}$ 的绕组可以按 $U_m = 3.6 \text{ kV}$ 绕组对应的电压进行试验。为确保设备的安全运行,在确定试验类型和试验电压水平时,要重点考虑过电压特定的伏秒特性。

特殊情况下,有报告称 $U_m \leq 36 \text{ kV}$ 的变压器通过真空断路器从电缆的远方合闸或断电时,会由于存在谐波而导致(重合闸)再点燃和重复暂态过电压。在某些情况下,提高绝缘水平可能不足以确保设备的安全可靠性,所以可能需要考虑采取诸如安装缓冲电路装置等措施,详细信息参见 IEEE C57.142—2010 和 CIGRE-report12-14。

表 3 中给出了分级绝缘变压器中性点端的标准试验电压水平。

表 2 绕组的试验电压水平

单位为千伏

系统标称电压 (方均根值)	设备最高电压 U_m (方均根值)	雷电全波冲击(LI) (峰值)	雷电截 波冲击(LIC) (峰值)	操作冲击 (SI) (峰值,相对地)	外施耐压或线 端交流耐压 (AV)或(LTAC) (方均根值)
—	≤ 1.1	—	—	—	5
3	3.6	40	45		18
6	7.2	60	65		25
10	12	75	85		35
15	18	105	115		45
20	24	125	140		55
35	40.5	200	220		85
66	72.5	325	360		140
110	126	480	530	395	200
220	252	850	950	650	360
		950	1 050	750	395
330	363	1 050	1 175	850	460
		1 175	1 300	950	510
500	550	1 425	1 550	1 050	630
		1 550	1 675	1 175	680
750	800	1 950	2 100	1 550	900
1 000	1 100	2 250	2 400	1 800	1 100
注 1: 对于系统标称电压为 750 kV 和 1 000 kV 级的产品,制造方与用户也可结合具体工程的实际情况,协商确定表中规定值以外的其他试验电压水平。 注 2: 如果用户另有要求,则试验电压水平也可按 E.2 的有关规定选取,但需要在订货合同中注明。					

表 3 分级绝缘变压器中性点端的试验电压水平

单位为千伏

系统标称电压 (方均根值)	中性点端的设备 最高电压 U_m (方均根值)	中性点接地方式	雷电全波冲击 (LI) (峰值)	外施耐压 (AV) (方均根值)
110	52	不直接接地	250	95
	72.5		325	140
220	40.5	直接接地	185	85
	126	不直接接地	400	200
330	40.5	直接接地	185	85
	145	不直接接地	550	230

表 3 (续)

单位为千伏

系统标称电压 (方均根值)	中性点端的设备 最高电压 U_m (方均根值)	中性点接地方式	雷电全波冲击 (LI) (峰值)	外施耐压 (AV) (方均根值)
500	40,5	直接接地	185	85
	72,5	经小电抗接地	325	140
750	40,5	直接接地	185	85
1 000	40,5	直接接地	185	85
	72,5		325	140

注 1: 表中 $U_m=52$ 和 $U_m=145$ 是参照 E.2 的有关规定确定的。用户也可另行确定中性点端的设备最高电压及相应的试验电压水平,但需要在订货合同中注明。

注 2: 其他中性点端 U_m 的标准值可由用户规定(可参考附录 E 的有关规定通过计算来确定)。

7.2.3 试验顺序

试验按以下顺序进行:

- 雷电冲击试验(LI、LIC、LIN、LIMT);
- 操作冲击试验(SI);
- 外施耐压试验(AV);
- 线端交流耐压试验(LTAC);
- 感应耐压试验(IVW);
- 带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)。

注: 这是一个综合性的试验内容,对于特定变压器而言,并非所有试验都适用。

经制造方与用户协商同意,操作冲击试验可以在雷电冲击试验之前进行。

如果要求 IVPD 试验,则在确认 IVPD 试验作为最后的绝缘试验的前提下,经制造方与用户协商同意,可以调整其他试验项目的顺序。

7.3 不同 U_m 变压器的试验要求

7.3.1 $U_m \leq 72.5$ kV 变压器的试验

7.3.1.1 例行试验

例行试验如下:

- 外施耐压试验(AV)

应按照第 10 章给定的方法在变压器每个独立的绕组上进行外施耐压试验,试验电压见表 2。

注: 为满足试验的需要, $U_m \leq 72.5$ kV 的变压器绕组通常按全绝缘设计。

- 感应耐压试验(IVW)

应按照 11.2 给定的方法进行感应耐压试验,相对地试验电压为 $(2 \times U_r)/\sqrt{3}$ 。如果用户同意,则该试验可由 IVPD 试验代替,其增强电压为 $(2 \times U_r)/\sqrt{3}$,见 7.3.1.3a)。

7.3.1.2 型式试验

型式试验如下:

- a) 雷电全波冲击试验(LI)
应按照 13.1 和 13.2 给定的方法在线端进行雷电全波冲击试验,试验电压见表 2。
- b) 雷电截波冲击试验(LIC)
应按照 13.1 和 13.3 给定的方法在线端进行雷电截波冲击试验,试验电压见表 2。
- c) 中性点端子雷电全波冲击试验(LIN)
应按照 13.1 和 13.4 给定的方法在中性点端子进行雷电全波冲击试验,试验电压见表 3。

7.3.1.3 特殊试验

特殊试验如下:

- a) 带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)
如果用户要求,则试验应按照 11.3 的方法进行,增强电压(相对地)为 $(1.8 \times U_r)/\sqrt{3}$,局部放电测量电压为 $(1.58 \times U_r)/\sqrt{3}$ 。如果用户要求,则可采用较高的电压水平,此时,增强电压(相对地)按 $(\sqrt{3} \times U_m)/\sqrt{3}$,局部放电测量电压按 $(1.5 \times U_m)/\sqrt{3}$ 。
如果增强电压采用 $(2 \times U_r)/\sqrt{3}$,则该试验可代替例行感应耐压试验。
经用户与制造方协商,PD 测量电压可持续较短的时间,推荐时间为 5 min。
- b) 在两个或更多端子同时进行的雷电冲击试验(LIMT)
如果用户要求,则应按照 13.1 的方法和 13.1.4.3 的接线方式,在两个或更多连接在一起的端子进行附加的雷电冲击试验。如果没有特别指出,则该试验类型为 LI。

7.3.2 $72.5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$ 变压器的试验

7.3.2.1 例行试验

例行试验如下:

- a) 雷电全波冲击试验(LI)
应按照第 13 章给定的方法在线端进行雷电全波冲击试验,试验电压见表 2。
- b) 外施耐压试验(AV)
应按照第 10 章给定的方法在变压器每个独立的绕组上进行外施耐压试验。对于全绝缘变压器,试验电压见表 2。对于分级绝缘变压器,其中性点端的试验电压见表 3。
- c) 感应耐压试验(IVW)
应按照 11.2 给定的方法进行感应耐压试验,相对地试验电压为 $(2 \times U_r)/\sqrt{3}$ 。如果用户同意,则该试验可由 IVPD 试验代替,其增强电压为 $(2 \times U_r)/\sqrt{3}$,见下述 e) 项。
注:对于 $U_m = 126 \text{ kV}$ 绕组,试验时的相间感应电压可能会超过表 2 的规定值,制造方在设计时宜注意。
- d) 分级绝缘变压器线端交流耐压试验(LTAC)
对于分级绝缘变压器的绕组,应按照第 12 章给定的方法和表 2 中的外施电压值对其线端进行交流耐压试验。经用户与制造方协商,若进行操作冲击试验则可不进行该试验。
- e) 带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)
试验应按照 11.3 的方法进行,增强电压(相对地)为 $(1.8 \times U_r)/\sqrt{3}$,局部放电测量电压为 $(1.58 \times U_r)/U_m$ 。如果用户要求,则可采用较高的电压水平,此时,增强电压(相对地)按 $(\sqrt{3} \times U_m)/\sqrt{3}$,局部放电测量电压按 $(1.5 \times U_m)/\sqrt{3}$ 。
如果增强电压采用 $(2 \times U_r)/\sqrt{3}$,则该试验可代替例行感应耐压试验。

7.3.2.2 型式试验

型式试验如下:

a) 雷电截波冲击试验(LIC)

应按照 13.1 和 13.3 给定的方法在线端进行雷电截波冲击试验,试验电压见表 2。

b) 中性点端子雷电全波冲击试验(LIN)

应按照 13.1 和 13.4 给定的方法在中性点端子进行雷电全波冲击试验,试验电压见表 3。

7.3.2.3 特殊试验

特殊试验如下:

a) 操作冲击试验(SI)

如果用户要求,则应按照第 14 章给定的方法在线端进行操作冲击试验,试验电压见表 2。如果用户同意,则在进行了该试验后,可不进行线端交流耐压(LTAC)试验。

b) 全绝缘变压器线端交流耐压试验(LTAC)

如果用户要求,则对于全绝缘变压器的绕组,应按照第 12 章给定的方法和表 2 中的外施电压值对其线端进行交流耐压试验。

c) 在两个或更多端子同时进行的雷电冲击试验(LIMT)

如果用户要求,则应按照 13.1 的方法和 13.1.4.3 的接线方式,在两个或更多连接在一起的端子进行附加的雷电冲击试验。如果没有特别指出,则该试验类型为 LI。

7.3.3 $U_m > 170 \text{ kV}$ 变压器的试验

7.3.3.1 例行试验

例行试验如下:

a) 雷电全波冲击试验(LI)

应按照第 13 章给定的方法在线端进行雷电全波冲击试验,试验电压见表 2。

b) 操作冲击试验(SI)

应按照第 14 章给定的方法在线端进行操作冲击试验,试验电压见表 2。

c) 外施耐压试验(AV)

应按照第 10 章给定的方法在变压器每个独立的绕组上进行外施耐压试验。对于全绝缘变压器,试验电压见表 2。对于分级绝缘变压器,其中性点端的试验电压见表 3。

d) 带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)

试验应按照 11.3 的方法进行,增强电压(相对地)为 $(1.8 \times U_r)/\sqrt{3}$,局部放电测量电压为 $(1.58 \times U_r)/\sqrt{3}$ 。如果用户要求,则可采用较高的电压水平,此时,增强电压(相对地)按 $(\sqrt{3} \times U_m)/\sqrt{3}$,局部放电测量电压按 $(1.5 \times U_m)/\sqrt{3}$ 。

注:对三相变压器而言,IVPD 试验时相间电压水平可能比表 2 中给出的相对地 AC 耐受电压水平高。

7.3.3.2 型式试验

型式试验如下:

a) 雷电截波冲击试验(LIC)

应按照第 13 章给定的方法在线端进行雷电截波冲击试验,试验电压见表 2。

b) 中性点端子雷电全波冲击试验(LIN)

应按照 13.1 和 13.4 给定的方法在中性点端子进行雷电全波冲击试验,试验电压见表 3。

7.3.3.3 特殊试验

特殊试验如下:

a) 分级绝缘绕组线端交流耐压试验(LTAC)

如果用户要求,则应按照第 12 章给定的方法和表 2 中的外施电压值对分级绝缘绕组线端进行交流耐压试验。

b) 在两个或更多端子同时进行的雷电冲击试验(LIMT)

如果用户要求,则应按照 13.1 的方法和 13.1.4.3 的接线方式,在两个或更多连接在一起的端子进行附加的雷电冲击试验。如果没有特别指出,则该试验类型为 LIC。

8 已投运变压器的绝缘试验

符合本部分的翻新的变压器(例如经过质保修理或绕组完全重新绕制、重新装配达到一个全新变压器的状态)要求在完成修理和装配以后应在 100% 试验电压水平下进行所有例行试验。

经修理后功能恢复并且依然被视为符合本部分的变压器(例如运行多年击穿后),需要进行本部分规定的试验,试验电压为原出厂规定试验电压的 80%~100%,以检验修理的效果。一般的原则是经修理更换后的新部件应在 100% 试验电压水平下进行试验,而未经修理的原有部件应在 80% 试验电压下进行试验,以验证其是否能继续使用。在新老部件并存的部位同时进行试验的电压应由制造方与用户协商确定。IVPD 试验应在原出厂规定试验电压的 100% 电压水平下进行。局部放电量的判据需要根据试验情况进行调整并与协议一致。

9 辅助接线的绝缘(AuxW)

辅助电源和控制线路的接线应承受 2 kV(方均根值)、1 min 对地交流外施耐压试验。如果试验电压不出现突然下降或没有击穿特征,则表明通过了试验。该试验应在变压器制造单位进行,除非现场组装的变压器可用现场试验代替厂内试验。在工厂内已通过 2 kV 试验的接线因运输需要拆卸或尚未连接时,这些接线在变压器运行现场恢复后,要复试 2 kV(方均根值)、1 min 交流外施耐压试验,或进行 1 kV 直流绝缘电阻的测量,阻值不应小于 1 M Ω 。

电流互感器二次绕组接线应进行 2.5 kV、1 min 对地交流外施耐压试验,试验应在制造单位进行。如果互感器的拐点电压超过交流 2 kV,则试验应在交流 4 kV 下进行。如果试验电压不出现突然下降或没有击穿特征,则表明通过了试验。

辅助设备用的电机和其他二次元件的绝缘要求应符合相关的标准(此类标准的要求通常低于单独对辅助接线规定的电压值,为了对辅助接线线路进行试验,有时需临时将辅助设备用的电机及其他二次元件断开)。所有固态的、基于微处理器的设备将不连接在试验线路中。所有三相低压继电器和可拆卸设备应从试验线路中拆除。

10 外施耐压试验(AV)

试验应依次在变压器的每个独立绕组进行。

全电压试验值应施加于被试绕组的所有连接在一起的端子与地之间,加压时间 60 s。试验时,其余绕组的所有端子、铁心、夹件、油箱等连在一起接地。

外施交流耐受电压试验应采用不低于 80% 额定频率,波形尽可能接近正弦波的单相交流电压进行。应测量电压的峰值,试验电压值应是测量电压的峰值除以 $\sqrt{2}$ 。

注:接近正弦即电压峰值除以 $\sqrt{2}$ 与波形的方均根值的偏差不超过 5%(见 GB/T 16927.1),较大的偏差也可以接受。

试验应从不大于规定试验值的 1/3 的电压值开始,并与测量相配合尽快地增加到试验值。试验结束,应将电压迅速地降低到试验值的 1/3 以下,然后切断电源。

如果试验电压不出现突然下降,则试验合格。

对于分级绝缘的绕组,本试验是按中性点端的规定试验电压进行。

对于有不同 U_m 值的绕组在变压器内部连接在一起的(通常为自耦变压器)变压器端子,试验电压由公共中性点绝缘与其规定的 U_m 决定。

11 感应电压试验(IVW 和 IVPD)

11.1 概述

本试验通常是在中性点和其他正常运行情况下处于地电位的端子接地的情况下进行。三相变压器应使用三相对称电压加压。任何不与试验电源相连的线端端子应开路。

注:当没有中性点连接的绕组有感应电压时,则该绕组每个端子对地的电压取决于其对地和其他绕组的电容。试验期间该绕组的一个端子对地的任何闪络都能导致其他端子出现超过其本身所承受的电压水平的电压。宜采取措施防止出现这种情况。

试验过程中,产生于绕组线端的电压应与绕组相适应,没有电压波动,以便匝间试验电压与匝间额定电压之比和试验电压与额定电压之比相等。电压应在最高电压端子上测量,如果不可行则应在与电源相连的端子上测量。

带分接的变压器,除非特别规定或经用户同意,一般应在主分接下进行。

如果用户要求低压绕组施加高于本章规定的特殊试验电压,则应在询价和订货阶段清楚地注明,并对试验方法和可能出现在高压绕组上的超过规定值的试验电压达成协议。

试验应在如同变压器运行条件下进行。为完成试验,电压可由任何绕组感应产生,也可通过特殊绕组或调节分接而感应产生。

应在变压器一个绕组的端子上施加一交流电压,其波形应尽可能接近正弦波。为了防止试验时励磁电流过大,试验时的频率应适当地比额定频率高。

按 GB/T 16927.1 定义的感应试验电压的峰值和感应试验电压方均根值均应进行测量,取峰值除以 $\sqrt{2}$ 后的值与方均根值两者间的较小值作为试验电压值。

11.2 感应耐压试验(IVW)

除非另有规定,当试验电压频率等于或小于 2 倍额定频率时,其全电压下的试验时间应为 60 s。当试验频率超过两倍额定频率时,试验时间应为:

$$120 \times \frac{\text{额定频率}}{\text{试验频率}} (\text{s}), \text{但不少于 } 15 \text{ s}$$

试验应在不大于规定试验电压的 1/3 电压下接通电源,并应与测量配合尽快升至试验电压值。施加电压达到规定的时间后,应将电压迅速降至试验电压的 1/3 以下,然后切断电源。

如果试验电压不出现突然下降,则试验合格。

11.3 带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)

11.3.1 概述

当用户指定的套管的局部放电水平会影响变压器局部放电测量的准确性时,允许在试验中用无局部放电的替代套管进行试验。

11.3.2 试验持续时间和频率

除非另有规定,当试验电压频率等于或小于 2 倍额定频率时,对于 $U_m \leq 800 \text{ kV}$ 的变压器,其增强电压下的试验时间应为 60 s,对于 $U_m > 800 \text{ kV}$ 的变压器,其增强电压下的试验时间应为 300 s。当试验频率超过两倍额定频率时,试验时间应为:

$$120 \times \frac{\text{额定频率}}{\text{试验频率}} (\text{s}), \text{但不少于 } 15 \text{ s} (U_m \leq 800 \text{ kV})$$

或

$$600 \times \frac{\text{额定频率}}{\text{试验频率}} (\text{s}), \text{但不少于 } 75 \text{ s} (U_m > 800 \text{ kV})$$

除了增强电压水平下的试验持续时间外,其他试验时间与频率无关。

11.3.3 试验顺序

试验顺序如下:

- 在不大于 $(0.4 \times U_r) / \sqrt{3}$ 的电压下接通电源;
- 试验电压升高至 $(0.4 \times U_r) / \sqrt{3}$, 进行背景 PD 测量并记录;
- 试验电压升高至 $(1.2 \times U_r) / \sqrt{3}$, 保持至少 1 min 以进行稳定的 PD 测量;
- 测量并记录 PD 水平;
- 试验电压升高至 1 h 的 PD 测量电压, 保持至少 5 min 以进行稳定的 PD 测量;
- 测量并记录 PD 水平;
- 电压上升至增强电压, 保持时间按 11.3.2;
- 之后立刻不间断地将电压降至 1 h 的 PD 测量电压;
- 测量并记录 PD 水平;
- 保持 1 h 的 PD 测量电压至少 1 h, 并进行 PD 测量;
- 在 1 h 内每隔 5 min 测量并记录 PD 水平;
- 1 h 的 PD 测量最后一次完毕后, 降低电压至 $(1.2 \times U_r) / \sqrt{3}$, 保持至少 1 min 以进行稳定的 PD 测量;
- 测量并记录 PD 水平;
- 试验电压降至 $(0.4 \times U_r) / \sqrt{3}$, 进行背景 PD 测量并记录;
- 试验电压降至 $(0.4 \times U_r) / \sqrt{3}$ 以下;
- 切断电源。

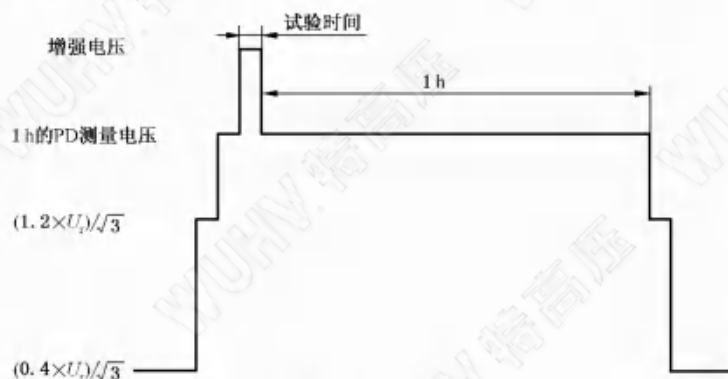
整个测量时间内至少应能在一个测量通道连续观测到局部放电水平。

在试验期间应记录任何明显的 PD 起始电压和熄灭电压, 以利于在不满足试验要求的情况下评估试验结果。

注: 记录任何明显的 PD 表征参数(相角、视在放电电荷和数量)有助于对试验结果的评判。

不同 U_m 的变压器的增强电压水平和 1 h 的 PD 测量电压见 7.3.1.3、7.3.2.1 和 7.3.3.1。

试验顺序的主要特征见图 1:



注: 增强电压水平和 1 h 的 PD 测量电压见 7.3.1.3、7.3.2.1 和 7.3.3.1。

图 1 带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)施加试验电压的时间顺序

11.3.4 局部放电(PD)测量

局部放电按照 GB/T 7354 规定的方法进行测量。

包括相关套管和电容耦合器在内的每个 PD 测量通道均应按照 GB/T 7354 给定的视在电荷法(pC)校正。

PD 测量结果用 pC 给出,应参考测量仪器指示的最高稳态重复脉冲而得出。

偶然出现的高幅值局部放电脉冲可以不计入。

试验期间,对于所有 $U_m \geq 72.5$ kV 的套管出线端子,试验顺序中的每个 PD 测量步骤均要进行局部放电测量并记录。除非另有规定,当超过 6 个这样的出线端子时,仅需测量并记录 6 个出线端子(依最高电压线端排序)的局部放电量。

注:按照 GB/T 4109, $U_m \geq 72.5$ kV 的套管均要带用于局部放电测量的试验抽头,但对于 $U_m < 72.5$ kV 的变压器,如果规定了该试验为特殊试验,则测量方法需要用户与制造方协商一致。

11.3.5 试验合格判据

如果试验开始和结束时测得的背景 PD 水平均没有超过 50 pC,则试验方为有效。对于并联电抗器,背景 PD 水平在 100 pC 也可以接受。

注:并联电抗器的背景 PD 水平之所以规定的较高是因为试验时需要高电压和大电流,对于试验电源的过滤是不可能的。

如果满足下列所有判据,则试验合格。

- a) 试验电压不产生突然下降;
- b) 在 1 h 局部放电试验期间,没有超过 250 pC 的局部放电量记录;
- c) 在 1 h 局部放电试验期间,局部放电水平无上升的趋势;在最后 20 min 局部放电水平无突然持续增加;
- d) 在 1 h 局部放电试验期间,局部放电水平的增加量不超过 50 pC;
- e) 在 1 h 局部放电测量后电压降至 $(1.2 \times U_r)/\sqrt{3}$ 时测量的局部放电水平不超过 100 pC。

如果 c) 项或 d) 项的判据不满足,则可以延长 1 h 周期测量时间,如果在后续连续 1 h 周期内满足了上述条件,则可认为试验合格。

只要不产生击穿并且不出现长时间的特别高的局部放电,则试验是非破坏性的。当局部放电不能满足验收判断准则时,用户不应简单地断然拒绝验收,而应与制造方就下一步的研究工作进行协商。有关程序的建议在附录 F 中给出。

12 线端交流耐压试验(LTAC)

试验时,应使线端与地之间出现规定的试验电压。被试绕组各相端子依次进行试验,试验时间、试验频率和加压方式按感应耐压试验给出,见 11.2。

对于带分接且具有较低电压绕组为分级绝缘的变压器,应选择合适的分接,以使最高电压绕组产生所要求的电压,较低电压绕组端子出现的电压应尽可能接近于所要求的试验电压值。对于带分接且具有较低电压绕组为全绝缘(需要进行外施耐压试验)的变压器,分接位置由制造方确定。

如果试验电压不出现突然下降,则试验合格。

注:对于分级绝缘变压器,本试验仅是对每个线端对地进行耐压试验,不是以验证相间或匝间绝缘为目的,因此试验布置以方便为原则,例如为了降低匝间电压,通常采用对中性点进行支撑的单相试验。正常情况下,操作冲击试验完全覆盖了本试验的内容。如果用户要求,则局部放电测量可在此试验中进行。

13 雷电冲击试验(LI、LIC、LIN、LIMT)

13.1 对所有雷电冲击试验的要求

13.1.1 概述

有关冲击试验术语的一般定义及对试验线路的要求见 GB/T 16927.1。对认可测量系统的性能试验和例行检查的一般要求见 GB/T 16927.2。更详细的资料在 GB/T 1094.4 中给出。

液浸式变压器的试验电压通常是负极性,以减少试验线路中出现异常的外部闪络危险。用户也可以规定一个、多个或所有脉冲为正极性。如果由用户规定为正脉冲,则需要在订货或询价时注明。如果脉冲极性是混合的,则需要额外的说明,而且试验顺序由用户与制造方协商确定。

在反极性脉冲施加前,应有足够的时间使剩余电荷消散。

13.1.2 分接位置

如果分接范围不超过 $\pm 5\%$ 且变压器的额定容量不大于 2 500 kVA,则雷电冲击试验应在变压器的主分接进行。

如果分接范围超过 $\pm 5\%$ 或变压器的额定容量大于 2 500 kVA,则除非经过同意,否则雷电冲击试验应在变压器的两个极限分接和主分接进行,在三相变压器的每相或三相组变压器的每台单相变压器上各使用其中的一个分接进行试验。

如果用户规定,或在特殊情况下(例如:单相变压器、采用多个分接开关或分接范围不对称时),则应在产生最高内部电压的分接位置(由计算确定或由低电压脉冲测量决定)进行冲击试验。如果不同的分接位置在绝缘的不同部分产生最高内部电压,则应根据协议在三相变压器的每相各使用其中的一个分接进行试验。

注:特别需要注意的是对于正反调分接绕组或粗细调分接绕组,选择器在转换升高(+)和降低(-)分接位置所产生的内部电压不同的差异。

对于粗细调分接绕组,如果分接转换器带有非线性元件或消弧间隙,变压器在特殊分接位置试验时这些装置将会动作,则这时候可以选择不同分接位置进行试验。有关原则见 GB/T 1094.4。

13.1.3 试验记录

按照 GB/T 16927.2,所施加的试验电压应使用测量系统记录。记录应能清楚地表明所施加电压的冲击波形(波前时间、半峰值时间和峰值)。

试验记录应能够显示电压曲线和该曲线的极限值(按照 GB/T 16927.1 中的定义)。

试验电压(经过滤波或对过冲进行修正后, U_1 见 GB/T 16927.1)的数值应能够显示在试验记录中。

至少应使用两个及以上的测量通道。在大多数情况下,记录被试绕组流向地的电流的示波图(中性点电流)或电容电流,即传递到非被试短路绕组的电流,将具有最好的示伤灵敏度。记录从油箱流向地的电流或非被试绕组中的传递电压,也是一种可供选择的合适的测量记录。所选择的检测方法应由制造方与用户协商确定。

有关示伤判断、合适的扫描时间值等在 GB/T 1094.4 中给出。

13.1.4 试验接线

13.1.4.1 线端雷电冲击试验接线

冲击试验是将冲击波按试验顺序连续施加到被试绕组的每一个线端上。变压器的其他线端应直接接地,或为了获得所需要的波形通过一个阻抗接地,该阻抗不应超过线路波阻抗(如果该值由用户提供)

或 $400\ \Omega$ 两者中的一个较低者。任何情况下,在其他端子上产生的电压不应大于其额定雷电冲击耐受电压的 75%(对星结绕组)或 50%(对角结绕组)。每个端子均应采用尽可能小的附加阻抗值来获得所需的波形。

如果绕组有中性点端子,则该中性点端子应直接接地或通过一个低阻抗(如测量电流用的分流器)接地。油箱也应接地。如果只有在中性点与地之间连接电阻才能获得所需要的波形,则需要施加额外的完整的冲击试验顺序。在这种情况下,先进行一次不加电阻的全电压冲击试验,可能达不到需要的波形,要再进行一次增加电阻后的试验以获得所需要的波形。截波(如有要求)可不重复第二次。

当变压器内部安装了用来限制内部部件上的冲击过电压的非线性元件(如:避雷器)时,按 13.2.3。设备在运行中带的任何内部非线性元件要随设备一起进行试验。外部非线性元件和其他外部电压控制元件(如:电容器)在试验期间应断开。

应保持校准时与全电压试验时的冲击线路及测量接线不变。

除上述主要程序外,其他有关情况见 13.3.2 和 13.3.3。

注:如果用户要求 $U_n \leq 1.1\ \text{kV}$ 的低压绕组做冲击试验,则正常情况下将所有的低压端子(包括低压中性点端子)连接在一起,电压较高的端子接地。

13.1.4.2 中性点雷电冲击试验接线

所有其他端子接地,雷电冲击直接施加在中性点端子上。

当变压器内部安装了用来限制内部部件上的冲击过电压的非线性元件时,按 13.2.3。设备在运行中带的任何内部非线性元件要随设备一起进行试验。外部非线性元件和其他外部电压控制元件在试验期间应断开。

对于绕组中性点端子附近带分接绕组的变压器,如果用户无特殊要求,则进行冲击试验时,分接绕组应在最大分接位置。

应保持校准时与全电压试验时的冲击线路及测量接线不变。

13.1.4.3 多端子同时进行雷电冲击试验接线(LIMIT)

用户应规定要连接在一起试验的端子。

雷电冲击应同时施加在连接在一起的线路端子上,其他端子接地。试验水平和试验布置的细节应经过协商确定。试验应逐相进行。

注:在该试验中,绕组内部的电压可能会大大超出线端的电压。

13.2 雷电全波冲击试验(LI)

13.2.1 波形、试验电压值和偏差的确定

试验冲击波应是标准雷电冲击全波: $1.2\ \mu\text{s} \pm 30\% / 50\ \mu\text{s} \pm 20\%$ 。

试验电压值应按 GB/T 16927.1 的定义(运用试验电压函数后)。如果最大相对过冲幅值为 5% 或更小,则试验电压值可认为是 GB/T 16927.1 中定义的极值。

试验电压值的偏差为 $\pm 3\%$ 。

在投标阶段,为使波形符合偏差要求,制造方结合变压器产品对试验设备的适用性进行评估和合理预期是很重要的。有些情况下,由于变压器本身特点,如果制造方认为不可能满足波形并需要采用下列章节中允许的波形偏差,则应在投标阶段明确地提出来。用户需要的情况下,应提供冲击发生器有效功率的数值。

注 1: 运用式(1)可估计满足变压器冲击试验半峰值时间 $50\ \mu\text{s}$ 的冲击发生器的最小功率(该公式仅是一个指导原则,可能低估了所需的功率。之前的相似变压器试验经验可做为有价值的参考)。

$$E_{\min} = \frac{100 \times 2\pi \times f \times (t_z)^2}{z \times U^2} \left[\frac{U_{Li}}{\eta} \right]^2 \times S_r \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$E_{\min}$ ——冲击发生器所需最小功率,单位为焦耳(J);

f ——变压器额定频率,单位为赫兹(Hz);

t_z ——半峰值时间,单位为秒(s); $t_z = 50 \times 10^{-6}$ s;

z ——以百分数表示的短路阻抗,从施加冲击的端子一侧看进去,见 GB/T 1094.1;

U ——绕组相间额定电压,单位为伏(V);

U_{Li} ——试验绕组全波雷电冲击电压,单位为伏(V);

η ——每套冲击发生器的效率; $\eta = 1.0$;

S_r ——三相额定功率,阻抗 z 以此为基准,单位为伏安(VA)。

如果由于绕组电感较小或对地电容较高而使变压器不能达到标准冲击波形,并使冲击波形产生振荡以致冲击相对过冲幅值超过 5%,则对于要进行雷电截波冲击试验的绕组,可以增加波前时间以减小过冲。对于 $U_m \leq 800$ kV 的变压器,波前时间不应超过 2.5 μ s。如果全波冲击试验水平相对过冲幅值超过 5%,则应当按照 GB/T 16927.1 采用试验电压函数来确定试验电压值。允许忽略过冲值而按照 GB/T 16927.1—2011 中附录 B 的要求来估计雷电冲击的参数。

注 2: 本章给出了处理过冲幅值超过 5% 的两种方法。增加波前时间,但如超过 1.2 μ s + 30%,则需要进行截波高频试验。此外如果过冲幅值超过 5%,且按照 GB/T 16927.1 采用试验电压函数的波形振荡频率超过 100 kHz,则需要增加冲击峰值电压(记录曲线的最大值)。

对于 $U_m > 800$ kV 的变压器,由于较高的对地电容无法使波前时间小于 2.5 μ s,在这种情况下,经制造方与用户协商,可以接受较长的波前时间。

如果采用 13.1.4.1 所述的方法满足不了最短半峰值时间的要求,则经制造方与用户协商,可以接受更短的半峰值时间,但半峰值时间比 40 μ s 每小 2 μ s,则试验电压增加 1%。最小的半峰值时间不能小于 20 μ s。在升压发电机变压器低压绕组的布置使变压器在运行中不会直接承受雷电冲击的情况下,对于波形的要求可经协商确定。

进一步的导则见 GB/T 1094.4。

13.2.2 不带非线性元件变压器的雷电冲击试验

13.2.2.1 试验顺序

试验顺序包括:

- a) 一次 50%~70% 全电压的参考冲击;
- b) 随后三次 100% 全电压的冲击。

如果在任何一次冲击下,在线路中或在套管间隙处产生了外部闪络,或者在任何规定测量通道上的示波记录图失效,则这一次冲击不应计入,并需重新施加一次。

注: 可以使用不大于 50% 全电压的多次冲击,且不必在试验报告中说明。

13.2.2.2 试验判据

如果在降低电压下所记录的电压和电流瞬变波形图与在全电压下所记录的相应的瞬变波形图无明显差异,则试验合格。

注: 详细地解释试验记录,并区分开边缘区域差异与故障显示,需要熟练的技能和丰富的经验。详细的资料在 GB/T 1094.4 中给出。

如果电压发生降落或偏离,在制造方与用户协商一致的情况下可以不立即判断试验失败,按试验顺序完成试验,然后参考原来降低的冲击电压波形重复全试验顺序,如果发生进一步的电压降落或偏离,

则判定试验不合格。

试验期间额外的现象(如异常噪声等)可用于对记录的解释,但它们本身不构成依据。

13.2.3 带非线性元件变压器的雷电冲击试验

13.2.3.1 试验顺序

当变压器内部安装了限制传递瞬变过电压的非线性元件或避雷器时,这些保护装置在试验过程中可能发生动作,在不同电压的冲击记录之间造成差别。在电压的某一阈值,非线性元件造成的差别开始出现,试验顺序至少包括该阈值以下的一次记录。

试验顺序包括:

- a) 一次 50%~60%全电压的参考冲击;
- b) 一次 60%~75%全电压的参考冲击;
- c) 一次 75%~90%全电压的参考冲击;
- d) 三次连续 100%全电压的冲击;
- e) 一次尽可能接近上述 c) 项所试冲击电压的比较试验电压的冲击;
- f) 一次尽可能接近上述 b) 项所试冲击电压的比较试验电压的冲击;
- g) 一次尽可能接近上述 a) 项所试冲击电压的比较试验电压的冲击。

参考冲击电压之间应至少互差 10%(以 100%全电压为准)。

如果 100%全电压下的冲击电压记录与最低电压下的冲击电压记录间没有差别,则可省略上面的 e) 项、f) 项和 g) 项。

注:可以使用不大于 50%全电压的多次冲击,且不必在试验报告中说明。

如果在任何一次冲击下,在线路中或在套管间隙处产生了外部闪络,或者在任何规定测量通道上的示波记录图失效,则这一次冲击不应计入,并需重新施加一次。

13.2.3.2 试验判据

如果在降低电压下所记录的电压和电流瞬变波形图与在全电压下所记录的相应的瞬变波形图无明显差异,则试验合格。

否则,应对下列步骤中电压和电流的记录进行比较:

- a) 项与 g) 项;
- b) 项与 f) 项;
- c) 项与 e) 项;
- 所有 100%全电压冲击记录。

如果所比较的记录没有明显的差别(不包括能够得到合理解释的试验电压的微小差别),且连续记录之间的任何变化趋于光滑,与非线性元件的适当动作保持一致,则认为试验是合格的。

注:详细的资料在 GB/T 1094.4 中给出。

如果电压发生降落或偏离,在制造方与用户协商一致的情况下可以不立即判断试验失败,按试验顺序完成试验,然后参考原来降低的冲击电压波形重复全试验顺序,如果发生进一步的电压降落或偏离,则判定试验不合格。

试验期间额外的现象(如异常噪声等)可用于对记录的解释,但它们本身不构成依据。

13.3 雷电截波冲击试验(LIC)

13.3.1 波形

全波冲击波形已在 13.2.1 中给出。雷电冲击截波的截断时间在 $3\ \mu\text{s}$ ~ $6\ \mu\text{s}$,从截断瞬间到电压首

次为零的时间应尽可能短。试验应在截波电路没有预加额外阻抗的条件下进行,如果在降低电压下观察到电压过冲超过截波冲击峰值的 30%,则需要在截波电路里增加最小阻抗,以使电压过冲维持在 30% 以下。

截断前已达到雷电冲击峰值时,经协商一致,截断时间可以在 $2\ \mu\text{s}\sim 3\ \mu\text{s}$ 。

注:正常情况下,变压器设计能耐受雷电冲击截波试验反极性过冲幅值 30%。如果变压器试验由第三方进行,则过冲值要限制在 30% 之内。

通常情况下,截波试验时冲击电压发生器和测量设备与全波试验时相同,只是增加一个截断间隙。

可以用不同的时间基点记录截波雷电冲击。

推荐使用可以调节时间的触发式截断间隙,也允许使用简单的棒对棒间隙。

截波雷电冲击峰值由表 2 给出。

13.3.2 不带非线性元件变压器雷电截波冲击试验

13.3.2.1 试验顺序

如无另行规定,截波冲击试验与全波冲击试验合并成一个单一的试验顺序,各种冲击波的施加顺序如下:

- 一次 50%~70% 全电压的全波参考冲击;
- 一次 100% 全电压的全波冲击;
- 两次截波雷电冲击试验电压的截波冲击;
- 两次 100% 全电压的全波冲击。

试验中所采用的测量通道及示波图记录与全波冲击试验相同。

注:可以使用不大于 50% 全电压的多次冲击(全波或截波),且不必在试验报告中说明。

如果在任何一次冲击下,在线路中或在套管间隙处产生了外部闪络,或者在任何规定测量通道上的示波记录图失效,则这一次冲击应不计入,并需重新施加一次。

各次截波雷电冲击应尽可能采用相同的截断时间。

13.3.2.2 试验判据

如果在降低电压下所记录的电压和电流瞬变波形图与在全电压下所记录的相应的瞬变波形图(包括直到截断时刻的部分)无明显差异,则试验合格。如果截断时刻后的波形有差别,则可能是由于截断球隙微小的时延变化所引起的。

注:详细地解释试验记录,并区分开边缘区域差异与故障显示,需要熟练的技能和丰富的经验。详细的资料在 GB/T 1094.4 中给出。

如果电压发生降落或偏离,在制造方与用户协商一致的情况下可以不立即判断试验失败,按试验顺序完成试验,然后参考原来降低的冲击电压波形重复全试验顺序,如果发生进一步的电压降落或偏离,则判定试验不合格。

试验期间额外的现象(如异常噪声等)可用于对记录的解释,但它们本身不构成依据。

13.3.3 带非线性元件变压器的截波雷电冲击试验

13.3.3.1 试验顺序

截波冲击试验与全波冲击试验合并成一个单一的试验顺序。

当变压器内部安装了限制传递瞬变过电压的非线性元件或避雷器时,这些保护装置在试验过程中可能发生动作,在不同电压的冲击记录之间造成差别,在电压的某一阈值,非线性元件造成的差别开始出现,试验顺序至少包括该阈值以下的一次记录。

试验顺序包括:

- a) 一次 50%~60% 全电压的全波参考冲击;
- b) 一次 60%~75% 全电压的全波参考冲击;
- c) 一次 75%~90% 全电压的全波参考冲击;
- d) 一次 100% 全电压的全波冲击;
- e) 两次截波雷电冲击试验电压的截波冲击;
- f) 两次 100% 全电压的全波冲击;
- g) 一次尽可能接近上述 c) 项所试冲击电压的比较试验电压的冲击;
- h) 一次尽可能接近上述 b) 项所试冲击电压的比较试验电压的冲击;
- i) 一次尽可能接近上述 a) 项所试冲击电压的比较试验电压的冲击。

参考电压之间应至少互差 10% (以 100% 全电压为准)。

如果 100% 全电压下的冲击电压记录与最低电压下的冲击电压记录间没有差别,则可省略上面的 g) 项、h) 项和 i) 项。

最后一次施加截波冲击与截波冲击后首次施加 100% 全波冲击的时间间隔应尽可能短。

注: 可以使用不大于 75% 全电压的多次冲击 (全波或截波), 且不必在试验报告中说明。

如果在任何一次冲击下, 在线路中或在套管间隙处产生了外部闪络, 或者在任何规定测量通道上的示波记录图失效, 则这一次冲击应不计入, 并需重新施加一次。

试验中所采用的测量通道及示波图记录与全波冲击试验相同。

各次截波雷电冲击应尽可能采用相同的截断时间。

13.3.3.2 试验判据

如果在降低电压下所记录的电压和电流瞬变波形图与在全电压下所记录的相应的瞬变波形图 (包括直到截断时刻的部分) 无明显差异, 则试验合格。如果截断时刻后的波形有差别, 则可能是由于截断球隙微小的时延变化所引起的。

否则, 应对下列步骤中电压和电流的记录进行比较:

- a) 项与 i) 项;
- b) 项与 h) 项;
- c) 项与 g) 项;
- 所有 100% 全电压冲击记录;
- 两次截波冲击记录。

如果所比较的记录没有明显的差别 (不包括能够得到合理解释的试验电压的微小差别), 且连续记录之间的任何变化趋于光滑, 与非线性元件的适当动作保持一致, 则认为试验是合格的。

注 1: 详细的资料在 GB/T 1094.4 中给出。

如果电压发生降落或偏离, 在制造方与用户协商一致的情况下可以不立即判断试验失败, 按试验顺序完成试验, 然后参考原来降低的冲击电压波形重复全试验顺序, 如果发生进一步的电压降落或偏离, 则判定试验不合格。

试验期间额外的现象 (如异常噪声等) 可用于对记录的解释, 但它们本身不构成依据。

注 2: GB/T 1094.4 中给出的关于波形估计的信息基于对示波图记录的视觉观察。在某些情况下, 它适合于估计非标波形的参数, 有时人工解释波形偏差的变化比完全依赖软件工具更有效。

13.4 中性点端子的雷电全波冲击试验 (LIN)

13.4.1 概述

所有其他端子接地, 在中性点端子直接施加规定的雷电冲击全波电压。

注：对全绝缘的三相变压器，当中性点不引出时，全波冲击试验电压可施加于并联连接的三个线端上，其电压值建议为该线端额定冲击耐受电压值的70%，但对电压等级为20 kV及以下的变压器，加到线端上的电压值建议为该线端额定冲击耐受电压值减去1/2额定电压。

13.4.2 波形

除波前时间允许最大达到13 μ s外，中性点端子的全波冲击波形见13.2.1。

13.4.3 试验顺序

不带非线性元件的变压器按照13.2.2.1，带非线性元件的变压器按照13.2.3.1。

13.4.4 试验判据

不带非线性元件的变压器按照13.2.2.2，带非线性元件的变压器按照13.2.3.2。

14 操作冲击试验(SI)

14.1 概述

在操作冲击试验期间，变压器各个绕组两端产生的电压大约与它们的匝数成正比。

操作冲击试验电压由具有最高 U_m 值的绕组来确定。

如果绕组间的变比可以通过分接来调整，则分接位置的选择应尽可能使较低 U_m 的绕组承受与表2相应的试验电压。较低 U_m 绕组可能承受不到全电压，这也是可以接受的。如果较低电压绕组在表2中没有给出操作冲击水平，则除用户另有规定外，制造方可以根据试验选择分接位置。

在一台三相变压器中，试验时线端之间产生的电压应近似为线端与中性点端子之间电压的1.5倍。

14.2 试验接线

冲击波既可以由冲击电压发生器直接施加到被试最高电压绕组线路端子上，也可以施加到较低电压的绕组上，通过感应将试验电压传递到最高电压绕组上。在最高电压绕组线路端子和地之间出现的电压值应为规定的试验电压值。应在最高电压绕组线路端子测量电压。

三相变压器应逐相地进行试验。

中性点引出的星结绕组中性点端子直接接地或通过电流测量分流器等低阻抗接地。可连接在一起但不接地的另两个非被试端子上将出现极性相反，幅值约为一半被试端子电压的冲击电压。为了将该电压限制为约50%被试端子电压，允许非被试端子通过高阻值阻尼电阻器(5 k Ω ~20 k Ω)接地。

对角结绕组，相应于该被试相末端的线端在试验时直接接地或通过小阻抗接地，其余端子开路。三相变压器试验应合理安排，以便在每相试验时三角形不同的端子接地。引出端子多于三个的角结绕组在试验时应接成角结。

对于一个或多个绕组运行中两端都连接于一条线路的单相变压器，如果要求进行操作冲击试验，则操作冲击电压应同时施加在绕组的两个端子上。

对于中性点没有引出并且在变压器内部也没有接地的星结绕组，通过一个或多个线端接地获得适当的试验电压通常是不可行的，在此情况下，试验接线应由制造方与用户协定确定。

试验中为防止出现火花放电，应拆除套管放电间隙或增大该放电间隙。

14.3 波形

试验电压通常是负极性，以减小试验线路中出现异常外部闪络的风险。

冲击电压波形从视在原点到峰值(视在波前时间 T_p 按GB/T 16927.1中的定义)至少为100 μ s，超

过 90% 规定峰值的时间(T_0 按 GB/T 16927.1 中的定义)至少为 200 μs , 从视在原点到第一个过零点的全部时间(T_2 按 GB/T 16927.1 中的定义)至少为 1 000 μs 。

注 1: 这个冲击波形是有意选择的, 它与 GB/T 16927.1 所推荐的 250 μs /2 500 μs 标准波形不同, 因为 GB/T 16927.1 适用于具有不饱和磁路的设备。波前时间选择的足够长, 目的是使沿绕组的电压基本呈线性分布。

试验期间, 每次全电压冲击前, 通过向铁心引入反极性剩磁可以增加从视在原点到第一个过零点的全部时间。一般情况下可以通过施加波形类似但极性相反的冲击电压来完成, 但电压幅值不应超过全电压的 70%, 也可以使用其他方法来实现。如果实际中铁心达到反极性全饱和, 则从视在原点到第一个过零点的全部时间小于 1 000 μs 也是允许的。

注 2: 试验期间在磁路中会产生可观的磁通, 冲击电压能够持续到铁心达到饱和并且变压器的励磁阻抗急剧降低的瞬间。

对于没有磁芯或带气隙式铁心的试品, 允许从视在原点到第一个过零点的全部时间小于 1 000 μs , 见 GB/T 1094.4。

14.4 试验顺序

试验应包括一次 50%~70% 全电压下的冲击和三次连续的全电压下的冲击。在每次全电压冲击前应进行足够的反极性磁冲击, 以确保铁心的磁化状态是相似的, 从而尽可能使从视在原点到第一个过零点的全部时间保持一致。

注: 在全电压试验时, 如果铁心没有饱和, 则可不进行反极性去磁。

示波图应记录被试线路端子上的冲击波形和被试绕组与地之间的电流波形。如果在任何一次冲击下, 在线路中或在套管间隙处发生了外部闪络, 或者在任何规定测量通道上的示波记录图失效, 则这一次冲击应不计入, 并需重新施加一次。

14.5 试验判据

如果示波图记录仪中没有指示出电压的突然下降或电压、电流的中断, 则试验合格。

试验期间的辅助观察(如异常的声音)可用来验证示波图记录, 但它们本身不构成依据。

注: 试验期间, 由于磁饱和的影响, 不同电压冲击下的示波图可能会有差异。

15 试验失败采取的措施

如果变压器有任何一种绝缘试验失败, 则修理完毕后, 变压器应重复进行所有的全电压绝缘试验。对于已经承受过试验的不在试验失败或修理范围内的变压器部件, 可不必再进行试验。特别需要考虑的是污染或暂态过程中损坏内部其他部件的可能性。

如果变压器不能满足试验要求的原因是由套管引起的, 而且用户认可变压器没有受到任何影响, 则允许更换套管后继续完成试验。

如果由于外在闪络造成变压器试验失败, 则需要重复特定的试验, 如果试验成功, 则可按试验顺序完成试验, 而前面完成的合格的试验不需要重复进行。

16 外绝缘空气间隙

16.1 概述

本章适用于用户没有规定外绝缘空气间隙的情况。在规定空气间隙的情况下, 如果试验需要, 则制造方可使用更高的数值。

外绝缘空气间隙是指套管端子金属部件之间及其与变压器部件之间的不穿过套管绝缘子的最短直

线距离。

本部分不适用于套管自身部分之间的空气间隙,套管的长度应大于给定的空气间隙以满足套管试验的需要。

本部分不考虑鸟类或其他动物带来的使其距离减小的影响。

本部分假定导线夹持件与其屏蔽罩形状相适应,不会降低原有的闪络电压;还假定进线布置也不会使变压器原有的有效空气间隙减小。应设计合适的导体与套管端子连接,不违背本章中给出的空气间隙。

如果用户打算采用特定的连接,可能减小变压器原有的有效空气间隙时,则应在询价时提出。

通常,在较高的系统电压,特别是在单台容量小或安装空间有限制的情况下,欲规定有足够裕度的空气间隙值可能有一定的技术难度。本部分采用的原则是:提供一个最小的、无危险的间隙,不必再用论证或试验的方法来检验它们在各种系统条件下和不同气候条件下是否有足够的安全。根据以往经验和现行实践而采用的其他间隙值,应由用户与制造方协商确定是否合适。

除非在询价和订货时另有规定,本部分所推荐的空气间隙均是按变压器内绝缘的额定耐受电压值制定的。当变压器的外绝缘空气间隙不低于本部分的规定值,且套管已按 GB/T 4109 的要求选择时,则不需进行变压器的外绝缘试验,即认为其空气间隙已满足外绝缘的要求。

注 1: 外绝缘的冲击耐受强度与电压极性有关,而内绝缘则相反。规定的变压器内绝缘试验,一般不能自动地证明其外绝缘也满足技术要求。本部分所推荐的空气间隙是按更严格的正极性确定的。

注 2: 如果空气间隙按合同采用了比上述空气间隙还要小时,则可能需要根据本部分的第 10 章~第 14 章给定的通用方法,在变压器本体上进行型式试验,或按照另外适合变电站连接设备的标准(如 GB/T 11022),在模拟实际空气间隙布置的外绝缘模型上进行型式试验。

如果规定了变压器是在海拔高于 1 000 m 的地区运行,则其所需的空气间隙,应按每增加 100 m (对 1 000 m 海拔而言),加大 1% 的正常海拔下的空气间隙值。

本部分给出了下述空气间隙的要求:

- 相对地和相对中性点的空气间隙;
- 同一绕组的相间空气间隙;
- 高压绕组线端与较低电压绕组线端之间的空气间隙;
- 中性点套管带电部分对地的空气间隙。

按上述要求所推荐的空气间隙实际上是最小值。设计的空气间隙应在变压器外形图标出。它们是有正常制造公差的标准值,应选择这些值以使实际空气间隙至少等于规定值。

这些规定应作为变压器符合本部分的推荐值的证明,否则变压器应符合合同所规定的修改值。

16.2 间隙要求

表 4 给出了每个 U_m 值对应的不同雷电冲击电压和操作冲击电压下的空气间隙要求。

相对相的空气间隙只适用于同一绕组的线端之间,相对地的空气间隙适用于所有其他空气间隙(包括对其他绕组的线端和中性点端子)。

注: 如果用户另有需要,则最小空气间隙也可按 E.4 的有关规定,但需要在订货合同中注明。

表 5 中列出了系统标称电压为 110 kV~1 000 kV 变压器的中性点套管带电部分对地的空气间隙要求。

表4 绕组线端的最小空气间隙

系统标称电压 (方均根值) kV	设备最高 电压 U_m (方均根值) kV	全波雷电冲击电压 (峰值) kV	操作冲击电压 (峰值) kV	最小空气间隙	
				相对地 mm	相对相 mm
—	≤ 1.1	—	—	—	—
3	3.6	40	—	60 ^a	60 ^a
6	7.2	60	—	90	90
10	12	75	—	125	125
15	18	105	—	180	180
20	24	125	—	225	225
35	40.5	200	—	340 ^a	340 ^a
66	72.5	325	—	630	630
110	126	480	395	950	950
220	252	850	650	1 600	1 800
		950	750	1 900	2 250
330	362	1 050	850	2 300	2 650
		1 175	950	2 700	3 100
500	550	1 425	1 050	3 100	3 500
		1 550	1 175	3 700	4 200
750	800	1 950	1 550	5 800	6 700
1 000	1 100	2 250	1 800	7 200	— ^b

^a 若用户在订货时提出要求,则 60 mm 可加大至 80 mm,340 mm 可加大至 365 mm。

^b 该额定绝缘水平通常是单相变压器,因此没有规定相间空气间隙。

表5 中性点套管带电部分对地的最小空气间隙

系统标称电压 (方均根值) kV	中性点端设备 最高电压 (方均根值) kV	中性点接地方式	中性点雷电全波 冲击电压(峰值) kV	中性点外施电压 (方均根值) kV	最小空气间隙 mm
110	52	不直接接地	250	95	450
	72.5		325	140	630
220	40.5	直接接地	185	85	340
	126	不直接接地	400	200	760
330	40.5	直接接地	185	85	340
	145	不直接接地	550	230	1 050
500	40.5	直接接地	185	85	340
	72.5	经小电抗接地	325	140	630
750	40.5	直接接地	185	85	340
	40.5	直接接地	185	85	340
1 000	72.5		325	140	630

附 录 A
(资料性附录)

本部分与 IEC 60076-3:2013 的技术性差异及其原因

表 A.1 给出了本部分与 IEC 60076-3:2013 的技术性差异及其原因。

表 A.1 本部分与 IEC 60076-3:2013 的技术性差异及其原因

本部分章条编号	技术性差异	原因
2	关于规范性引用文件,本部分做了具有技术性差异的调整,调整的情况集中反映在第2章“规范性引用文件”中,具体调整如下: a) 用修改采用国际标准的 GB/T 311.1 代替了 IEC 60071-1,GB/T 1094.1 代替了 IEC 60076-1,GB/T 4109 代替了 IEC 60137,GB/T 16927.1—2011 代替了 IEC 60060-1,GB/T 16927.2 代替了 IEC 60060-2; b) 用非等效采用国际标准的 GB/T 2900.95 代替了 IEC 60050-421	符合我国实际情况
4	IEC 标准中规定试验期间绝缘系统的温度应“不低于 10℃”,本标准将其改为“不低于 5℃”	符合我国实际情况
5	IEC 标准中规定中性点的绝缘水平由用户规定,本标准中直接按照 GB/T 311.1 给出了中性点的绝缘水平	符合我国实际情况
7.2.1 中的表 1 7.3.1 7.3.2 7.3.3 B.2.1 B.2.2 B.2.3	对于 $U_m \leq 170$ kV 的绕组,IEC 标准规定线端雷电截波冲击试验(LIC)为特殊试验,而本标准则规定为型式试验。 对于 $U_m > 170$ kV 的绕组,IEC 标准规定线端雷电全波冲击试验(LI)为不适用,而本标准则规定为例行试验。 对于 $U_m > 170$ kV 的绕组,IEC 标准规定线端雷电截波冲击试验(LIC)为例行试验,而本标准则规定为型式试验。 IEC 标准规定中性点端子雷电全波冲击试验(LIN)为特殊试验,而本标准则规定为型式试验。并补充规定,对全绝缘的三相变压器,当中性点不引出时,中性点端子雷电全波冲击试验(LIN)为特殊试验。 IEC 标准规定 $U_m = 72.5$ kV 的绕组的局部放电测量为特殊试验,而本标准则规定 $U_m = 72.5$ kV 且额定容量为 10 000 kVA 及以上变压器的局部放电测量为例行试验	符合我国实际情况
7.2.2 中的表 2 和表 3	用我国的试验电压水平代替 IEC 标准的试验电压水平,并增补了分级绝缘变压器中性点端子的试验电压水平	符合我国实际情况
16.1 16.2	删除了 IEC 标准中外绝缘空气间隙数值的确定规则。 绕组线端的最小空气间隙按我国的实际情况进行了调整,并增补了中性点套管带电部分对地的最小空气间隙值(表 5)	符合我国实际情况
B.3	对试验电压的确定原则按我国的实际情况进行了更改	符合我国实际情况
B.4	对绝缘间隙的确定原则按我国的实际情况进行了更改	符合我国实际情况

附录 B

(资料性附录)

确定绝缘试验、绝缘水平和绝缘间隙的基本原则

B.1 概述

本部分的目的是通过合适的试验来验证变压器线端对地、中性点对地、相间和匝间的绝缘性能。

依据电压等级和变压器的类型,选择不同的试验来达到验证的目的。表 2 和表 3 给出了相互配合的试验电压。

本附录总结了本部分修订的原则,修订原则旨在没有增加或降低整体试验水平的情况下简化试验和阐明相关的要求,这些试验水平已考虑了多年来产品的良好运行经验。

B.2 绝缘试验

B.2.1 $U_m \leq 72.5$ kV 变压器的绝缘试验

包括配电变压器在内的此类变压器,通常采用一种设计来生产大批量的产品。此类变压器的试验时间周期短,费用也适当。

U_m 为 72.5 kV 及以下的所有变压器和绕组采用全绝缘结构,因此,线端对地和中性点对地绝缘均通过外施耐压试验(AV)来验证。

感应耐压试验(IVW)仅需要验证匝间绝缘,前一版本中所采用的两倍正常运行电压的试验已经提供了足够的裕度。

相间和相对地绝缘的设计可由雷电全波冲击试验(LI)来验证,但是为了限制此类变压器对试验设备的需求,雷电冲击试验保留为型式试验而非例行试验。

为了验证新结构变压器在运行过程中耐受某些高频冲击的能力,本部分继续沿用前一版本的规定,将雷电截波冲击试验(LIC)规定为型式试验。

对于 $U_m < 72.5$ kV 的变压器和 $U_m = 72.5$ kV 且容量小于 10 000 kVA 的变压器,带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)被认为耗时长且费用高,而且其验证的内容可以被 IVW 和 AV 试验所覆盖。因此,该试验被规定为特殊试验。当变压器运行于特殊条件,用户提出要求且缩短试验周期的情况下可进行该试验。但对于 $U_m = 72.5$ kV 且额定容量为 10 000 kVA 及以上的此类变压器,为了加强对产品质量的考核,将带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)作为例行试验,而非特殊试验。

B.2.2 $72.5 \text{ kV} < U_m \leq 170$ kV 变压器的绝缘试验

处于中等电压水平的此类变压器通常是按照订单生产的。产品具有更高的传输容量,试验中也包括了更高的质量检验要求。因为要验证全绝缘和分级绝缘两种绝缘结构,所以产品试验列表中分别给出了相应的试验要求。

中性点对地绝缘和全绝缘变压器的线端对地绝缘用外施耐压试验(AV)来验证。对于分级绝缘变压器,由于受中性点绝缘试验水平的限制,外施耐压试验(AV)不足以验证线端对地绝缘。因此,分级绝缘变压器线端交流耐压试验(LTAC)是例行试验,但在协商一致的情况下,该试验可由操作冲击试验(SI)代替,所以此类变压器可采用与更高电压等级的变压器类似的方式进行试验。

相间绝缘和相对地绝缘也可由作为例行试验的雷电全波冲击试验(LI)来验证。为了验证新结构变压器在运行过程中耐受某些高频冲击的能力,将雷电截波冲击试验(LIC)规定为型式试验。

为了验证匝间绝缘和相间绝缘,两倍额定电压的感应耐压试验(IVW)和带局部放电测量的感应电

压试验(IVPD)被规定为例行试验。为了缩短试验时间而不是重复两次同一类型的绝缘试验,可以将 IVW 试验电压作为 IVPD 试验的增强电压进行试验,从而将这两种试验合并为一种试验,这也与变压器的运行条件相近。

B.2.3 $U_m > 170$ kV 变压器的绝缘试验

此类变压器覆盖了最大容量输变电变压器和发电机变压器。对于这些数量有限的大型和重要的产品,有必要按下列试验进行质量检验。

为了检验对地绝缘,外施耐压试验要求为例行试验。

IVPD 试验用于验证变压器运行条件下匝间绝缘、线端对地绝缘和相间绝缘的质量。操作冲击试验(SI)用于验证相间绝缘和线端对地绝缘的耐受能力。因此单独的感应耐压试验是不必要的,但如果需要,IVPD 试验时增强电压可增加到两倍额定电压。

对于此类变压器,因为验证其耐受雷电全波冲击能力是很重要的,因此将雷电全波冲击试验规定为例行试验。而雷电截波冲击试验(LIC)只是为了验证新结构变压器是否能耐受某些高频冲击的能力,故将雷电截波冲击试验(LIC)规定为型式试验。

对于希望进一步检验线端对地绝缘的用户,单相线端交流耐压试验(LTAC)可指定为特殊试验。该试验来自于前面的感应耐压试验。

B.3 试验电压

表 2 和表 3 中的试验电压主要是基于 GB/T 311.1 确定的(其中,仅 U_m 为 800 kV 和 U_m 为 1 100 kV 电压等级对应的操作冲击电压与 GB/T 311.1 不同,采用了 IEC 60076-3:2013 的数值)。GB/T 311.1 中给出的低于可接受限值的数值都不包括在表中。对应每一个 U_m ,表中还给出了可能的试验电压值的范围,使得变压器的规格与特殊系统的要求相匹配,同时提供了最小标准值。

操作冲击耐受水平(SI)和雷电冲击耐受水平(LI)均来自于 GB/T 311.1,操作冲击耐受水平(SI)通常介于雷电冲击耐受水平(LI)的 0.76 倍到 0.82 倍之间(IEC 60076-3:2013 为 0.8 倍到 0.85 倍之间)。

表 2 和表 3 中的数值在不引入过度偏差的原则下进行了取整处理。

考虑到基准由 U_m 改为 U_r ,故局部放电测量电压值采用 $1.58 \times U_r / \sqrt{3}$ (相当于 $1.5 \times U_r / \sqrt{3}$ 加上 5%)和 $1.8 \times U_r / \sqrt{3}$ (相当于 $1.7 \times U_r / \sqrt{3}$ 加上 5%)。这与 IEC 60076-3:2013 和 IEEE C57.12.00—2010 保持一致。

B.4 绝缘间隙

通常情况下,表 4 中的相对地一栏给出的最小空气间隙数值应该取 GB/T 311.1 中与雷电冲击或操作冲击水平对应的数值中的最大值,其中棒与构架的间隙数值适用于雷电冲击水平小于 850 kV 者,导线与构架的间隙数值适用于 850 kV 及以上者。然而,考虑到 U_m 为 126 kV 变压器的 IVW 试验要用三相法进行,且还需进行 SI 特殊试验,故将其外绝缘空气间隙由原来的 880 mm 加大到 950 mm。此外,由于本部分前一版本中, U_m 为 252 kV~ U_m 为 550 kV 电压等级的相对地最小空气间隙数值均比按上述原则确定的数值大,为安全起见,对于这些电压等级的最小空气间隙数值,本部分继续沿用前一版本的规定。而对于 U_m 为 800 kV 和 U_m 为 1 100 kV 电压等级,相对地最小空气间隙则按国内现有产品的实际情况规定。表中没有给出的数据可用线性插值法来得到,并将数值调整到以 10 mm 或 100 mm 结尾。

表 4 中的相间间隙数值是基于 GB/T 311.1 中以相间操作冲击电压为基础的导线电极之间的距

离,与 IEC 60076-3:2013 对应的相间间隙数值相当,是相间与相对地操作冲击电压的比值为 1.5 时对应的相间间隙数值。表中没有出现的数据可通过三阶多项式回归法,在基于相间与相对地操作冲击电压的比值为 1.5 的关系下,通过插值再处理得到。例如,对于相对地操作冲击为 1 425 kV、比值为 1.7 的变压器,与相对地操作冲击为 1 615 kV、比值 1.5 的变压器具有相同的最小相间间隙 7 200 mm。这是因为两者具有相同的相间操作冲击电压值($1\,425\text{ kV} \times 1.7 = 1\,615\text{ kV} \times 1.5 = 2\,422.5\text{ kV}$)。

附录 C

(资料性附录)

由高压绕组向低压绕组传递的过电压

C.1 概述

GB/T 311.2 从系统的观点阐述了过电压传递的问题。下面给出的资料仅涉及到在特定使用条件下与变压器本身有关的问题。所考虑的传递过电压,或者是瞬变冲击波,或者是工频过电压。

注:用户的责任是对低压绕组的负载给出一些规定,如果不能给出相关的资料,制造方可以提供当低压端子开路时所预期的传递电压的资料,并且给出能保持在可接受的电压限值内的所需要的电阻值或电容值。

C.2 冲击电压的传递

C.2.1 概述

关于传递的冲击过电压问题的研究,一般只是在电压比大的具有大的匝数比的发电机变压器和具有低电压的第三绕组的高电压系统用的大容量变压器上进行。

由于单相自耦变压器单独试验,因此需要考虑三台单相变压器组成三相组时,传递电压出现在第三绕组上的情况。

为确保传递电压不超过特定的水平或确认不需要冲击避雷器,传递电压测量可采用低电压循环冲击发生器或在冲击试验期间降低电压进行。

可以很方便地区分两种冲击波的传递机理,即电容传递和感应传递。

C.2.2 电容传递

传至低压绕组的过电压的电容传递可近似地看作是一种电容分压的方式。从低压绕组看,这个最简单的等值电路是由一个电动势和一个传递电容 C_1 串联组成,见图 C.1。

等值电动势是高压侧输入冲击波的一个分数值 s 。 C_1 大约为 10^{-9} F, s 和 C_1 的数值都不好确定,但它与冲击波的波前形状有关,这些值均可通过示波器测量确定。预先的计算是不可靠的。

二次线端上的负载将使传递的过电压峰值降低,与端子相连接的开关、短电缆或附加的电容器(几 nF)便是这样的负载,它们可看成是(甚至在头一个微秒期间内)直接接到二次线端的集中电容 C_s 。至于长电缆或母线,则要用其波阻抗来表示。在二次绕组上产生的过电压波形与输入冲击波波前相对应,具有短时间(微秒数量级)尖峰的特性。

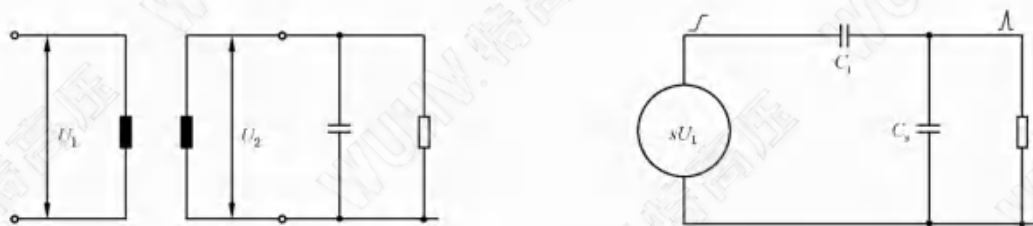


图 C.1 过电压电容传递的等值电路

C.2.3 感应传递

冲击电压的感应传递与流过高压绕组中的冲击电流有关。

如果二次绕组上不带有外部负载,则电压的瞬变过程波形通常叠加了一个阻尼振荡波,其频率由漏电感和绕组电容来确定。

降低感应传递过电压分量的有效方法,可用避雷器的起阻尼作用的电阻,也可用能改变其振荡的负荷电容。假如使用电容器,其电容值常为 $0.1 \mu\text{F}$ 数量级(只要电路电感值低,它们便会自动地消除其电容性的传递分量)。

涉及感应的冲击传递的变压器参数比较好确定,与电容传递相比,它与波上升速率(或频率)的关系较小。其进一步的说明见有关文献。

C.3 工频过电压的传递

如果与高压绕组紧邻的低压绕组并不接地或者只是通过高阻抗接地,则当高压绕组励磁时,此低压绕组将由于电容分压的作用而存在着工频过电压的风险。

对于单相绕组而言,这种危险是明显的。但对于三相绕组而言,如果一次绕组电压是不对称的,例如产生接地故障时,则这种危险亦存在。在某些特殊情况下,有可能出现共振状态。

大型变压器的第三绕组和稳定绕组也会遭受同样的风险。用户有责任防止第三绕组偶然出现通过太高的阻抗接地。通常,稳定绕组是作成内部或外部的永久性接地(接箱壳)。

过电压是由各绕组之间以及各绕组对地之间的电容来确定的。这种电容可以在低频下从变压器的不同组合的端子上进行测量,同时也可以用来计算方法来确定,其计算的准确度是足够的。

附录 D

(资料性附录)

询价和订货时需提供的有关变压器绝缘要求和绝缘试验的信息

D.1 概述

根据绕组的 U_m 值的不同,在变压器询价和订货时宜提供每个绕组的如下信息。

注:尽管可以规定变压器低压绕组的 SI 和 IVW,但试验期间该值很可能由于变压器变比的因素而达不到。

建议在订货时或在设计审查阶段中,对试验的接线和试验程序进行协商,特别是对高压绕组为分级绝缘的结构复杂的变压器进行感应耐压试验时的接线,以及对大容量变压器的低压绕组和中性点端子进行冲击试验时所采用的方法。装入变压器内的非线性保护装置,宜在订货和询价阶段时给出有关说明,并应在铭牌上标明其连接图。

D.2 对于 $U_m \leq 72.5$ kV 的变压器和绕组

所有情况下:

- U_m 值;
- U_i 值;
- 外施耐压水平;
- 雷电全波冲击试验水平。

特殊情况下:

- 是否需要局部放电测量,是否与感应电压试验一起进行或单独进行,是否仅在一台产品(型式试验产品)进行还是在所有产品上进行;局部放电测量电压时间小于 1 h 时的试验时间;
- 是否在订单提供的某一产品还是所有产品上进行雷电全波冲击试验,而不是仅在相同型号的首台产品上进行;
- 是否进行雷电截波冲击试验,是否仅在首台产品上试验还是在所有产品上试验;
- 是否进行中性点端子雷电全波冲击试验,是否仅在首台产品上试验还是在所有产品上试验;
- 是否多端子同时进行雷电冲击试验,是否仅在首台产品上试验还是在所有产品上试验;
- 不同于第 16 章给出的空气间隙值的要求。

U_m 、LI 和 AV 的数值宜优先从表 2 中的同一行选取,因为同一行的值是互相配合的一组值,但允许选用对应同一 U_m 值不同行的绝缘水平或对应于较高一级 U_m 的绝缘水平,以便与已有系统的绝缘配合。如果规定,则 LIC 应当选用表 2 中与 LI 对应的同一行的数值。选用不同行的绝缘水平,可能会导致一些参数的设计裕度过大。

D.3 对于 72.5 kV $< U_m \leq 170$ kV 的变压器和绕组

所有情况下:

- U_m 值;
- U_i 值;
- 外施耐压水平;
- 雷电全波冲击试验水平。

对分级绝缘变压器增加：

——选择线端交流试验水平还是选择操作冲击试验水平(如果规定可选其一)。

特殊情况下：

——带局部放电测量的感应电压试验是否选用较高电压水平进行试验,能否与 IVW 合并进行；

——是否进行雷电截波冲击试验,是否仅在首台产品上试验还是在所有产品上试验；

——是否进行中性点端子雷电全波冲击试验,是否仅在首台产品上试验还是在所有产品上试验；

——感应耐压试验的电压是否不同于两倍额定电压；

——是否进行操作冲击试验,是否仅在首台产品上试验还是在所有产品上试验；操作冲击试验(SI)是否代替 LTAC 试验；

——是否多端子同时进行雷电冲击试验,是否仅在首台产品上试验还是在所有产品上试验；

——是否对绕组为分级绝缘的变压器进行线端交流耐压试验,如果进行,则给出试验电压要求值；

——不同于第 16 章给出的空气间隙值的要求。

U_m 、LI、AV 和规定的 LTAC、SI 的数值宜优先从表 2 中的同一行选取,因为同一行的值是互相配合的一组值,但允许选用对应同一 U_m 值不同行的绝缘水平或较高一级 U_m 的绝缘水平,以便与已有系统的绝缘配合。如果规定,则 LIC 应当选用表 2 中与 LI 对应的同一行的数值。选用不同行绝缘水平,可能会导致一些参数的设计裕度过大。

D.4 对于 $U_m > 170$ kV 的变压器和绕组

所有情况下：

—— U_m 值；

—— U_i 值；

——雷电冲击试验水平；

——操作冲击试验水平；

——外施耐压水平；

特殊情况下：

——带局部放电测量的感应电压试验是否选用较高电压水平进行试验；

——是否进行中性点端子雷电全波冲击试验,是否仅在首台产品上试验还是在所有产品上试验；

——是否多端子同时进行雷电冲击试验,是否仅在首台产品上试验还是在所有产品上试验；

——是否对绕组为分级绝缘的变压器进行线端交流耐压试验,如果进行,则给出试验电压要求值；

——不同于第 16 章给出的空气间隙值的要求。

U_m 、SI、LI、AV 和规定的 LTAC 的数值应优先从表 2 中的同一行选取,因为同一行的值是互相配合的一组值,但允许选用对应同一 U_m 值不同行的绝缘水平或对应于较高一级 U_m 的绝缘水平,以便与已有系统的绝缘配合。如果规定,则 LIC 应当选用表 2 中与 LI 对应的同一行的数值。选用不同行绝缘水平,可能会导致一些参数的设计裕度过大。

附录 E
(资料性附录)

IEC 60076-3:2013 中的不同类别绕组的要求与试验、试验电压水平、绕组中性点端子的 U_m 值的确定和试验电压、最小空气间隙、中性点绝缘电压水平计算

E.1 不同电压等级绕组的要求与试验

绝缘试验要求包括试验项目和试验电压水平两方面,此要求取决于被试变压器中最高电压绕组的 U_m 值。所要求的试验项目见表 E.1。

注:在两个或更多端子同时进行的雷电冲击试验是一项特殊试验,不考虑 U_m ,仅适用于一些特殊变压器,相关阐述不包括在该表中。

表 E.1 不同类别绕组的要求与试验

设备最高电压范围	$U_m \leq 72.5 \text{ kV}$	$72.5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$		$U_m > 170 \text{ kV}$
绝缘类型	全绝缘	全绝缘	分级绝缘	全绝缘和分级绝缘
线端雷电全波冲击试验(LI)	型式	例行	例行	不适用(包括在 LIC 中)
线端雷电截波冲击试验(LIC)	特殊	特殊	特殊	例行
中性点端子雷电冲击试验(LIN)	特殊	特殊	特殊	特殊
线端操作冲击试验(SI)	不适用	特殊	特殊	例行
外施耐压试验(AV)	例行	例行	例行	例行
感应耐压试验(IVW)	例行	例行	例行	不适用
带有局部放电测量的感应电压试验(IVPD)	特殊 ^a	例行 ^a	例行 ^a	例行
线端交流耐压试验(LTAC)	不适用	特殊	例行 ^b	特殊
辅助接线的绝缘试验(AuxW)	例行	例行	例行	例行
^a IVW 的试验要求包括在 IVPD 试验中,因此只需要一个试验。				
^b 经用户与制造方协商一致,该类型变压器的 LTAC 试验可由 SI 试验代替。				

E.2 试验电压水平

由绕组的设备最高电压 U_m 确定的标准试验电压水平见表 E.2。表中不同标准试验电压水平的选取,与系统中预期过的电压条件的严重性及特定装置的重要程度有关,相关导则见 IEC 60071-1。

所有试验电压均为相电压。

如无另行规定,则绝缘试验水平应取表 E.2 中给出的 U_m 所对应的最小值。一般情况下,表 E.2 中每行给定的值是配合使用的。如果只规定雷电冲击电压水平,那么与该雷电冲击电压水平位于同一行的其他试验电压值将被采用。对于每一种试验,用户可以规定高于 U_m 所对应的最低值的任何值,应优先选用标准值以便绝缘配合,但不必选择表 E.2 中同一行的数值。如果规定更高的电压水平,则应在询价和订货时说明。

特殊情况下,如果用户认为表 E.2 中给定的最小值太高,则可以选用表 E.3 中的数值。只有在采取

特殊的预防措施,避免过电压超出变压器的承受能力的情况下,或者已经进行了深入的研究,或者该数值已经被已安装设备的实践应用,才可以选用表 E.3 中的数值。

表 E.2 试验电压水平

绕组设备最高电压 U_m kV	雷电冲击全波(LD) kV	雷电冲击截波(LIC) kV	操作冲击(SD) kV	外施耐压或线端交流 耐压(AV)或(LTAC) kV
<1.1	—	—	—	3
3.6	20	22		10
	40	44		10
7.2	60	66		20
	75 ^a	83 ^a		20
12	75	83		28
	95	105		28
	110 ^a	121 ^a		34 ^a
17.5	95	105		38
	125 ^a	138 ^a		38
24	125	138		50
	145	160		50
	150 ^a	165 ^a		50
36	170	187		70
	200 ^a	220 ^a		70
52	250	275		95
72.5	325	358		140
	350 ^a	385 ^a		140
100	450	495	375 ^a	185
123	550	605	460 ^a	230
145	550	605	460 ^a	230
	650	715	540 ^a	275
170	650	715	540 ^a	275
	750	825	620 ^a	325
245	850	935	700 ^a	360
	950	1 045	750 ^a	395
	1 050	1 155	850 ^a	460
300	950	1 045	750	395
	1 050	1 155	850	460
362	1 050	1 155	850	460
	1 175	1 290	950	510

表 E.2 (续)

绕组设备最高电压 U_m kV	雷电冲击全波(LI) kV	雷电冲击截波(LIC) kV	操作冲击(SI) kV	外施耐压或线端交流 耐压(AV)或(LTAC) kV
420	1 175	1 290	950	510
	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175 ^a	630
550	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175	630
	1 550	1 705	1 300 ^a	680
	1 675 ^a	1 845 ^a	1 390 ^a	—
800	1 800	1 980	1 425	—
	1 950	2 145	1 550	—
	2 050 ^a	2 255 ^a	1 700 ^a	—
	2 100	2 310	1 675 ^a	—
1 100	1 950	2 145	1 425	—
	2 250	2 475	1 800	—
1 200	2 250	2 475	1 800	—
^a 对于特定的 U_m , 这些电压值没有在 IEC 60071-1:2011 中给出, 但因在世界一些地方普遍采用或是作为与特殊的雷电冲击电压水平相配合的操作冲击电压水平, 故在此列出。				

表 E.3 特殊情况下的试验电压水平

绕组设备最高电压 U_m kV	雷电全波冲击(LI) kV	雷电截波冲击(LIC) kV	操作冲击(SI) kV	外施耐压或线端交流 耐压(AV)或(LTAC) kV
7.2	40	44	—	20
12	60	66	—	28
17.5	75	83	—	38
24	95	105	—	50
36	145	160	—	70
60 ^a	280 ^a	308 ^a	230 ^a	115 ^a
123 ^b	450 ^b	495 ^b	375 ^a	185 ^b
170 ^b	550 ^b	605 ^b	460 ^a	230 ^b
245	650 ^b	715 ^b	550 ^a	275 ^b
	750 ^b	825 ^b	620 ^a	325 ^b
300	850	935	750	395

表 E.3 (续)

绕组设备最高电压 U_m kV	雷电全波冲击(LI) kV	雷电截波冲击(LIC) kV	操作冲击(SI) kV	外施耐压或线端交流 耐压(AV)或(LTAC) kV
362	950	1 045	850	395
420	1 050	1 155	850	460
550	1 175	1 290	950	510
^a 对于特定的 U_m , 这些电压值没有在 IEC 60071-1:2011 中给出, 但因在世界一些地方普遍采用或是作为与特殊的雷电冲击电压水平相配合的操作冲击电压水平, 故在此列出。 ^b 这些值需要特殊考虑, 参考 IEC 60071-1:2011。				

E.3 绕组中性点端子的 U_m 值的确定和试验电压

E.3.1 $U_m \leq 72.5$ kV 的变压器

中性点端子应经受与线端一样的外施电压水平。如果要进行雷电冲击试验, 则要在询价和订单阶段提出。

注: $U_m \leq 72.5$ kV 的变压器需要进行全绝缘绕组设计, 以满足试验需要。

E.3.2 $U_m > 72.5$ kV 的变压器

E.3.2.1 直接接地的中性点端子

如果中性点端子直接或通过一台电流互感器牢固地接地而无任何有意接入的阻抗, 则外施交流耐受电压至少应为 45(38) kV ($U_m \geq 17.5$ kV)。可以规定更高的电压水平。

不推荐在中性点端子上进行冲击试验, 但可以规定。

E.3.2.2 不直接接地的中性点端子

中性点端子的 U_m 和试验电压应在询价和订单阶段提出。中性点端子的 U_m 取决于其是否设计成开路状态还是通过一个阻抗接地(见 E.5)。中性点端子的 U_m 和试验电压优先从表 E.2 中选择。 U_m 不应低于 17.5 kV。

如果规定在中性点端子上进行雷电冲击试验, 则其试验电压水平应在询价和订单阶段提出, 其额定冲击耐受电压可通过试验验证。截波冲击试验不适用于中性点端子。

E.4 最小空气间隙

IEC 60076-3:2013 中给定的线端对地直线距离间隙数据基于 IEC 60071-1 中雷电冲击水平小于 850 kV 的棒与构架电极间的布置, 以及更高冲击水平的导线与构架电极的间隙。使用由操作冲击或雷电冲击决定的最大空气间隙。相对相之间的空气间隙基于 GB/T 311.1 中以相间操作冲击电压为基础的导线电极结构之间的距离, 相间操作冲击电压等于相对地操作冲击电压的 1.5 倍。当雷电冲击电压水平为 850 kV 及以上时, 通常认为套管末端及连接部位是一个圆形电极。

IEC 60076-3:2013 中给出了下述空气间隙的要求:

- 相对地和相对中性点的空气间隙；
- 同一绕组的相间空气间隙；
- 高压绕组线端与较低电压绕组线端之间的空气间隙。

表 E.4 给出了每个 U_m 值对应的不同雷电冲击电压和操作冲击电压下的空气间隙要求。

相间空气间隙只适用于同一绕组的线端间，相对地的空气间隙适用于所有其他空气间隙(包括对其他绕组的线端和中性点端子)。

表 E.4 最小空气间隙

设备最高电压 (方均根值) kV	全波雷电冲击 电压(峰值) kV	操作冲击电压 (峰值) kV	最小空气间隙	
			相对地 mm	相对相 mm
≤1.1	—	—		
3.6	20	—	60	60
	40	—	60	60
7.2	60	—	90	90
	75 ^a	—	120	120
12	75	—	120	120
	95	—	160	160
	110 ^a	—	200 ^a	200 ^a
	17.5	—	160	160
17.5	95	—	160	160
	125 ^a	—	220	220
24	125	—	220	220
	145	—	270	270
	150 ^a	—	280 ^a	280 ^a
36	170	—	320	320
	200 ^a	—	380	380
52	250	—	480	480
72.5	325	—	630	630
	350 ^a	—	630	630
100	450	375 ^a	900	900
123	550	460 ^a	1 100	1 100
145	550	460 ^a	1 100	1 100
	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
170	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
	750	620 ^a	1 500	1 700 ^a
245	850	700 ^a	1 600	2 100 ^a
	950	750 ^a	1 700	2 300
	1 050	850 ^a	1 900	2 600

E.4 (续)

设备最高电压 (方均根值) kV	全波雷电冲击 电压(峰值) kV	操作冲击电压 (峰值) kV	最小空气间隙	
			相对地 mm	相对相 mm
300	950	750	1 700	2 300
	1 050	850	1 900	2 600
362	1 050	850	1 900	2 600
	1 175	950	2 200	3 100
420	1 175	950	2 200	3 100
	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175 ^a	3 100	4 200
550	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175	3 100	4 200
	1 550	1 300 ^a	3 600	5 000 ^a
	1 675 ^a	1 390 ^a	4 000 ^a	5 600 ^a
800	1 800	1 425	4 200	5 800 ^a
	1 950	1 550	4 900	6 700 ^a
	2 050 ^a	1 700 ^a	5 800 ^a	7 900 ^a
	2 100	1 675 ^a	5 600	7 700 ^a
1 100	1 950	1 425	b	b
	2 250	1 800	6 300	c
1 200	2 250	1 800	6 300	c

^a 对特定的 U_m 值,这些值没有在 IEC 60071-1:2011 中给出,此处列出一方面是因为它们在世界上一部分地区得到普遍应用,另一方面与特定的雷电冲击电压水平配合给出了操作冲击电压水平和空气间隙。

^b 对这些额定绝缘水平没有给出空气间隙,是因为按照 IEC 60071-1 不适用于空气绝缘。

^c 该额定绝缘水平通常是单相变压器,因此没有规定相间空气间隙。

E.5 中性点绝缘电压水平计算

E.5.1 概述

IEC 60076-3:2013 推荐了分级绝缘变压器不直接接地的中性点端子允许的最小电压水平的确定。为了控制故障水平或其他原因,中性点端子可以通过一个较大的阻抗(如消弧电抗器、接地电抗器或电阻)接地。

与独立的中性点末端调压变压器连接使用的变压器,其中性点端子电压水平的确定不包括在内。

当中性点端子不直接接地时,为了限制瞬态过电压,在中性点端子和地之间需要安装过电压保护装置。用户负责选择过电压保护装置,确定过电压保护装置的冲击保护水平,以及规定变压器中性点端子相应的冲击耐受电压水平。

注：对于分级绝缘变压器，由于要进行线端耐受电压试验（特殊试验），制造方可以将绕组的中性点绝缘水平设计得高于规定的中性点绝缘水平。

交流耐压水平要高于系统故障条件下产生的最大过电压水平。中性点端子的冲击电压水平和保护装置的动作电压之间要有足够的裕度，这二者均要高于系统故障条件下产生的最大电压水平。以下公式给出了发生在通过阻抗接地的中性点端子上最大电压的计算导则。

E.5.2 中性点故障电流计算

双绕组三相变压器（星结绕组发生单相接地故障时）最大中性点故障电流 I_{fault} 可按下列公式计算：

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times E}{(Z_{1s} + Z_{1t} + Z_{2s} + Z_{2t} + Z_{0s} + Z_{0t}) + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{\text{fault}}}$$

式中：

E —— 相对地电压，等于 $U_m/\sqrt{3}$ ，单位为伏(V)；

Z_{1s} —— 网络的正序阻抗，单位为欧姆(Ω)；

Z_{2s} —— 网络的负序阻抗，单位为欧姆(Ω)；

Z_{0s} —— 网络的零序阻抗，单位为欧姆(Ω)；

Z_{1t} —— 变压器的正序阻抗，单位为欧姆(Ω)；

Z_{2t} —— 变压器的负序阻抗，单位为欧姆(Ω)；

Z_{0t} —— 变压器的零序阻抗（包括任何第三绕组或稳定绕组），单位为欧姆(Ω)；

Z_N —— 中性点与地之间的阻抗，单位为欧姆(Ω)；

Z_{fault} —— 故障阻抗，单位为欧姆(Ω)，设为 0。

注：作为导则，按照常规考虑最坏的情况，常使用下列数据：

$$E = U_m/\sqrt{3}$$

$$Z_{1s} = 0$$

$$Z_{2s} = 0$$

$$Z_{0s} = 0$$

$$Z_{\text{fault}} = 0$$

E.5.3 最小绝缘水平

E.5.3.1 外施电压最小绝缘水平

中性点最小外施电压水平应从表 E.2 中选择，其值要大于 $U_{\text{ACneutral}}$ 。其中：

$$U_{\text{ACneutral}} = I_{\text{fault}} \times Z_N$$

E.5.3.2 最小冲击水平

中性点冲击电压水平的选择应使其高于保护装置动作电压值，并有一定裕度，保护装置的选择应使其在系统短路故障条件下不动作。在此条件下最高非对称峰值电压由下式给出：

$$U_{\text{neutral max}} = U_{\text{ACneutral}} \times K_V \times \sqrt{2}$$

式中：

K_V —— 非对称电压系数。

在 Z_N 为纯电阻情况下， K_V 与 IEC 60076-5 中定义的电流非对称系数 k 相同，但当 Z_N 为电感时， K_V 由于电流的直流分量而减小。当变压器的 X/R 很高且 Z_N 为一较小的电阻时是最坏情况，此时， K_V 取 2，但实际情况下 K_V 是小于 2 的。在 Z_N 为纯电感情况下，变压器的 X/R 约为 7 代表了最坏的情况， K_V 取 1.05。建议 $U_{\text{neutral max}}$ 采用系统模型来计算。

E.5.4 示例

一台变压器,绕组联结组为 YNd11,高压额定电压为 155 kV(相当于 U_m 为 170 kV),额定容量为 100 MVA,基于该容量的正序阻抗为 12%,零序阻抗为 10.8%,高压中性点通过 39 Ω 的电抗器接地,当高压线对地发生故障时,考虑到系统的短路容量为无穷大,流经高压中性点的故障电流为:

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times E}{(Z_{1t} + Z_{1s} + Z_{2t} + Z_{2s} + Z_{0t} + Z_{0s}) + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{\text{fault}}}$$

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times 170\,000 / \sqrt{3}}{(28.83 + 0 + 28.83 + 0 + 25.95 + 0) + 3 \times 39 + 0} \text{ A}$$

$$I_{\text{fault}} = 1\,468 \text{ A}$$

得到的电压为:

$$U_{\text{ACneutral}} = I_{\text{fault}} \times Z_N$$

$$U_{\text{ACneutral}} = 1\,468 \times 39 \text{ V}$$

$$U_{\text{ACneutral}} = 57\,243 \text{ V}$$

因此从表 E.2 中得到最小的 AV 电压为 70 kV。

假设中性点通过电抗接地,取 $K_V = 1.05$,系统故障条件下中性点最高电压为:

$$U_{\text{neutral max}} = 57\,243 \times 1.05 \times \sqrt{2} \text{ V}$$

$$U_{\text{neutral max}} = 85.0 \text{ kV}$$

因为保护装置在 85 kV 的峰值电压下不应动作,因此它的最高连续 AC 电压水平不应小于 85 kV/ $\sqrt{2} = 60.1 \text{ kV}$ 。对此电压(持续 10 秒)合适的避雷器的保护水平为 140 kV、10 kA,考虑一个裕度,中性点雷电冲击水平可取 170 kV。

170 kV 的雷电冲击水平相应于 U_m 为 36 kV,设为中性点电压水平。

附录 F

(资料性附录)

变压器局部放电测量应用导则

F.1 概述

本附录特别适用于 11.3 中带局部放电测量感应电压试验 (IVPD) 中的局部放电测量。但也可用于任何其他局部放电测量。

局部放电 (PD) 是指引起导体之间的场强高处的绝缘只发生局部桥接的一种放电。在一台变压器中, 这种局部放电能使每一个引出的绕组端子对地电压发生瞬时的变化。

测量用阻抗通常是通过套管的电容抽头, 或通过一个独立的耦合电容器有效地连接在端子与接地油箱之间, 如 F.2 所述。

在局部放电处出现的实际放电电荷是不能直接进行测量的, 而代之以测定其视在电荷 q , 其定义见 GB/T 7354。任一测量端子上的视在电荷 q , 可用适当的校准方法来确定, 见 F.2。

一个特定的局部放电, 能使变压器不同端子上的视在电荷值有所不同。将这些不同端子上同时得到的显示值进行比较, 可以得到有关变压器局部放电源位置的信息, 见 F.5。

本部分 11.3 中规定的验收试验程序, 是要求测量绕组线路端子上的视在电荷量。

F.2 测量线路和校准线路的接线——校准程序

测量技术和仪器的描述见 GB/T 7354。

测量的原理就是确定注入校正电荷后在端子上引起的电压变化。用一只串联耦合电容 (通常为一只电容性套管) 和一只测量阻抗来测量电压的变化。变压器试验时通常是将测量阻抗直接连在套管试验端子上。

测量仪器用匹配的同轴电缆接至测量阻抗, 电缆阻抗和与之匹配的测量仪器的输入阻抗组成了测量阻抗的一部分。一些系统中测量阻抗和记录仪器之间采用光缆连接。正常情况下, 测量阻抗、电缆和测量仪器一起供给可使测量系统的整体性能得到优化。

对绕组的线路端子与接地油箱之间进行局部放电测量时, 一般将测量阻抗 Z_m 有效地接到电容套管的电容抽头与接地法兰之间, 见图 F.1。如果无电容抽头, 则也可以将套管法兰与油箱绝缘, 并将该法兰作为测量端子。中心导杆与测量端子之间以及测量端子与地之间的等效电容, 对局部放电信号起电容分压器的作用。因此需要在套管的顶部端子与地之间进行校准。校准期间, 考虑到额外的电容和任何滤波电路, 应尽可能采用无源试验电路连接到端子。

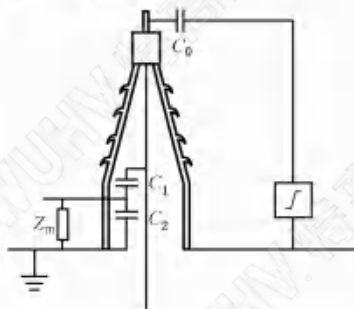


图 F.1 使用电容式套管试验抽头的局部放电测量校准电路

如果需要在没有任何可以利用的电容式套管的电容抽头(或绝缘的法兰)的情况下,对端子进行 PD 测量时,可以使用高压耦合电容器的方法。这要求采用一个无局部放电的电容器,其电容与校准发生器的电容 C_0 (见 GB/T 7354) 相比应足够大,测量阻抗(带有保护间隙)连接在电容器的低压端子与地之间,见图 F.2。

整个测量系统的校准是在两个校准端子之间输入已知的电荷来进行的。按照 GB/T 7354,校准装置包括一台上升时间短的方波电压脉冲发生器和一个小的已知电容值为 C_0 的串联电容器。 C_0 应小于 C_1 (见 GB/T 7354 关于上升时间和 C_0 选择的特殊要求)。当这个发生器接到变压器端子和地之间时,脉冲发生器输入的电荷将是:

$$q_0 = U_0 \times C_0$$

式中:

q_0 ——校准视在电荷;

U_0 ——产生 q_0 所需的方波电压值;

C_0 ——串联电容值。

校准电荷 q_0 应当代表特定的放电电荷水平限值(通常为 50%~200%)。用不同的校准值 q_0 进行额外的测量对检查测量仪器的运行状态是有益的。

如果校准装置发生器具有与工频同步的重复频率,则可以方便地用与工频同步的仪器观察放电脉冲。

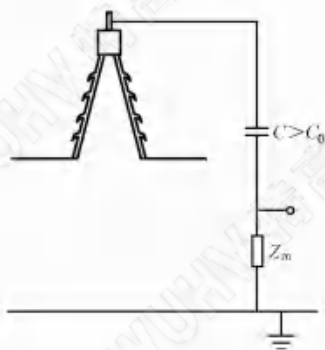


图 F.2 采用高压耦合电容器的局部放电测量线路

为了避免偏差,接线端子与校准脉冲发生器的连接引线以及校准脉冲发生器与地(套管法兰附近)之间的连接引线应尽可能短。校准脉冲发生器最好由电池供电,而且外形尺寸尽量小,以方便用于变压器端子。

校准提供了变压器端子测量视在放电量的方法,这是本附录的基础,由于放电部位和端子间的传输路径没有包含在校准范围内,因此远离端子发生的实际局部放电的数值无法给出。

F.3 仪器、频率范围

测量仪器的特性应与 GB/T 7354 的规定相符。

试验时的示波器监视通常是有用的,特别是因为它有可能区别变压器内部真实的局部放电与某些形式的外部干扰。这种区别是以重复率、脉冲在电压波形上的位置和极性不同等为基础的。

局部放电水平观测或是在整个试验期间连续进行,或是每隔一定时间进行,不强制规定信号记录连续进行。

局部放电的测量系统分为窄频带和宽频带系统。窄频带系统有大约 10 kHz 或更小的带宽,且是在某一调谐频率(例如:无线电噪声计)下工作。宽频带系统使用的频带上限与下限之比较大,例如

50 kHz~800 kHz。

当采用窄频带系统时,对频带的中心频率进行适当地调节,就可避免来自于当地广播电台的干扰,但应证明,在靠近测量频率时的绕组共振对测量结果影响不大。窄频带仪器应在不大于 500 kHz,最好是在小于 300 kHz 的频率下工作。这有两个原因:第一,放电脉冲的传输使较高频率分量产生大的衰减。第二,当将校准脉冲波施加于线路端子时,该脉冲波容易在此端子或靠近此端子处引起局部振荡,当采用的频带中心频率大于 500 kHz 时,将使校准变得复杂。

就不同的脉冲波形的衰减和响应而言,宽频带系统受到的限制较少,但在没有静电屏蔽的试验场所处,它更容易受到干扰。可用带阻滤波器或其他类型的滤波器来减少来自诸如无线电波等外部的影响。

测量频带宽度的选择不会影响局部放电脉冲的特征和局部放电的统计特性,后者常用于区分放电源。

总之,由于能够检测出局部放电的机会更多,宽频带测量系统是用于局部放电检测的首选,其检测频率不应小于 100 kHz。窄频带测量系统在某些条件下用于消除干扰。宜更多地关注测量中心频率的选择,以确保对变压器局部放电合理的灵敏度。

F.4 试验不合格后的处理程序

11.3.5 中已经给出了局部放电水平能够接受的判据。如果试验电压并不发生突降,只是由于局部放电读数太高,则试验虽然不合格但仍属非破坏性的。不应以这个结果而马上拒绝该试品,而应对其作进一步的研究,对局部放电源进行区分和定位。

还有一个重要的考虑,即在试验电压下所触发的局部放电,在低于运行电压时,是否会持续下去。因为这样的局部放电很可能对投运的变压器是有害的。

首先应对试验环境进行研究,以便找到与局部放电无关的任何外界干扰信号。此时,应由制造方与用户进行协商,确定再进行补充试验或采取其他措施,以判明变压器确实出现了严重的局部放电,或者,变压器并不存在严重的局部放电,它仍能满足运行的要求。

下面的一些建议,对采用上述措施时可能有用:

- 研究测量指示值是否真正与试验顺序有关,还是碰巧测到外来的与局部放电无关的指示值。试验时采用示波器监视,往往是很易确定上述区别的,例如:外部干扰就不与试验电压(波形)同步;
- 研究局部放电是否由供电电源传输而来,试验时在电源与变压器之间接入低通滤波器对此可以有所帮助;
- 研究确定局部放电源是在变压器内部还是在变压器外部(例如:从大厅内具有悬浮电位的物体发出,从空气中带电部分发出或从变压器接地部位的尖角发出)。当试验系涉及内部绝缘时,可以允许并推荐采用临时的外部屏蔽罩;
- 按照变压器的线路图研究局部放电源的可能位置。可以使用单相外施电压试验。现已有几种公认的定位方法。其中一种是根据不同的成对端子上的各个读数和校准值的相互关系来定位(用以补充各线路端子与地之间的应读取的读数)。如果使用宽频带系统记录,则也有可能用相应的校准波形与试验中的单个脉冲波形进行鉴别。电容式套管介质中的局部放电鉴别是另一种特殊情况;
- 用声波或超声波的检测方法,探测油箱内的放电源位置;
- 用油箱内的超高频电磁传感器探测放电源的物理位置;
- 根据局部放电水平随试验电压高低的变化、滞后效应、试验电压波形上的脉冲波分布、局部放电随时间的变化等来确定局部放电源的可能的物理位置;
- 绝缘系统中的局部放电,可能由于绝缘的干燥或浸液不充分而引起,一般可从局部放电特征中

明显地表现出来。因此,变压器可在重新处理或静置一个时期后重复试验:

- 只要遭受相当高的局部放电,即使时间短,则也可能使油局部分解,并使熄灭电压和起始电压暂时降低,但经过几小时后,仍可自然地恢复到原有状态;
- 若试验电压增加,局部放电水平增加不多,电场中悬浮粒子局部放电特征增加不多并且又不是随时间而增加的,则认为该变压器仍可投入运行。在此情况下,经过协商可以重复试验,或者延长试验时间,或者增加试验电压水平,经过一段时间降低局部放电水平。

除非在相当长的持续时间内,出现了远大于验收限值的局部放电水平,否则当将变压器吊芯后,难于用肉眼发现局部放电的痕迹。如果其他改善局部放电性能或确定局部放电位置的措施均无效时,则本程序可作为最后的手段。

参 考 文 献

- [1] GB/T 311.2 绝缘配合 第2部分:使用导则
- [2] GB/T 1094.4 电力变压器 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
- [3] GB/T 10230.1 分接开关 第1部分:性能要求和试验方法
- [4] GB/T 11022 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求
- [5] IEC 60076-5 Power transformers—Part 5:Ability to withstand short circuit
- [6] IEC 60076-1:2011 Insulation co-ordination—Part 1:Definitions,principles and rules
- [7] IEEE C57.12.00—2010 Standard General Requirements for Liquid—Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers
- [8] IEEE C57.142.00—2010 IEEE guide to describe the occurrence and mitigation of switching transients induced by transformers,switching device and system interaction
- [9] CIGRÉ-report 12-14(1984) Resonance behaviour of high voltage transformers.Paper presented in the name of Study Committee 12 by Working Group 12.07
-