

中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 1094.14—2011/IEC/TS 60076-14:2009

电力变压器 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

Power transformers—Part 14: Design and application of liquid-immersed transformers using high-temperature insulation material

(IEC/TS 60076-14:2009, IDT)

杭州高电

专业高试铸典范

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 | 电力试验工程服务

2011-12-30 发布

2012-05-01 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 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 绝缘材料 4

4.1 概述 4

4.2 绝缘材料的老化和寿命 4

4.3 固体绝缘 5

4.4 导线绝缘涂层 6

4.5 绝缘液体 7

5 绝缘系统 9

5.1 概述 9

5.2 绝缘系统类型 9

6 温度限值 12

7 变压器附件和相容性 14

7.1 概述 14

7.2 套管 14

7.3 分接开关 15

7.4 密封材料 15

7.5 油箱喷漆 15

7.6 冷却器 15

7.7 油泵 15

7.8 油箱和储油柜 15

7.9 粘合剂 15

7.10 电流互感器 16

7.11 温控器 16

7.12 保护继电器 16

7.13 辅助电缆 16

8 设计时的特殊考虑 16

8.1 短路考虑 16

8.2 绝缘要求 16

8.3 温度要求 16

8.4 过载 18

8.5 谐波电流影响 18

8.6 油保护系统 18

9 需要的信息	18
9.1 用户应提供的信息	18
9.2 制造方应提供的信息	19
10 铭牌及补充信息	19
10.1 铭牌和警告牌	19
10.2 变压器说明书	19
11 试验	19
11.1 概述	19
11.2 例行试验、型式试验和特殊试验的要求	20
11.3 温升试验	20
11.4 绝缘的型式试验	22
12 监测、诊断和维修	22
12.1 概述	22
12.2 矿物油浸渍式变压器	22
12.3 高温绝缘液体浸渍式变压器	22
附录 A (资料性附录) 与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件	23
附录 B (资料性附录) 从表 4 和表 5 看变压器温度	24
附录 C (资料性附录) 气泡生成温度的计算	25
C.1 概述	25
C.2 基本假定	25
C.3 气泡生成的数学公式	26
参考文献	30

前 言

GB 1094《电力变压器》分为以下部分：

- 第1部分：总则；
- 第2部分：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14部分：采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计和应用。

本指导性技术文件是 GB 1094 的第 14 部分。

本指导性技术文件按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本指导性技术文件使用翻译法等同采用 IEC/TS 60076-14:2009《电力变压器 第 14 部分：采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计和应用》(英文版)。

本指导性技术文件中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件见附录 A。

本指导性技术文件对 IEC/TS 60076-14:2009 还做了下列编辑性修改：

- a) “本国际标准”一词改为“本指导性技术文件”；
- b) 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”；
- c) 删除 IEC/TS 60076-14:2009 的前言；

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这些专利的责任。

本指导性技术文件由中国电器工业协会提出。

本指导性技术文件由全国变压器标准化技术委员会(SAC/TC 44)归口。

本指导性技术文件起草单位：沈阳变压器研究院、中电电气集团有限公司、保定天威保变电气股份有限公司、华东电网有限公司、西安西电变压器有限责任公司、顺特电气设备有限公司、特变电工衡阳变压器有限公司、明珠电气有限公司。

本指导性技术文件主要起草人：张显忠、徐子宏、胡振忠、姜益民、宓传龙、刘燕、蔡定国。

引 言

几十年来,如同 IEC 60076-2 的规定,液浸式变压器绕组的平均温升一直限定为 65 K/70 K,顶层油温升限定为 60 K。

从历史上看,液浸式变压器中的绕组导体向来是采用纤维素纸或瓷漆进行绝缘的,其他固体绝缘材料也是纤维素制品。至于绝缘液体,矿物油仍是最主要的。上述这些绝缘材料至今仍占主导地位。

变压器多年来所累积的运行经验,绝大多数是基于上述这些绝缘材料和温升限值取得的。有时,由于空间和重量限制,要求设计人员采用更高的温升值,以便减少变压器的尺寸并降低变压器重量。此时,需要采用更好的绝缘材料(固体和液体),其温度限值比传统规定值高且在此高温下的老化特性仍然良好,并具有可接受的预期寿命。高温绝缘材料有时也可用于绕组的某些被认为处于高温的部位中。

最近采用的光纤测量技术表明,热点温度有时比预计值高。甚至在某些情况下要高得多。这样,老化率将比预计值要高。通过这种测量,可提供有关热点的位置和在该处可能要采用高温绝缘材料等相关知识。

从导线瓷漆和缠带到垫块、撑条和结构支撑件等高温绝缘件已用于大型电力变压器、小型配电变压器、移动变压器、电机车(牵引)变压器和整流变压器中。闪点远高于 300 °C,适用于比矿物油温度高的 K 级液体已经使用了几十年了。它们的使用量和范围正在迅速增加。多年来,变压器制造方为了满足各种特殊使用的需要,已通过设计、使变压器采用高温材料,从而达到了变压器重量轻、容量密度大、防火能力强、寿命长的目的。

本技术规范的目的是开始开发采用高温绝缘的液浸式变压器的标准化过程。从系统来说,固体绝缘可能包括很多种材料,它们具有不同的耐热等级。绝缘和冷却液体也可以是从矿物油到多种新的 K 级液体,也有多种耐热能力。

在当前标准的液浸式变压器中应用的液体和固体绝缘材料组成的绝缘系统已经发生及发展超过 100 年了。因而,其应用规律及导则也很可靠且研究得良好。对应的是高温绝缘材料及采用高温绝缘材料的变压器,在应用和研究方面相对来说都是新的。

因而就不应对很多资料因研究得不充分及理解得不清楚而感到吃惊了。所以,建立并维持一个文件,以给制造方和用户之间讨论提供一个起点就很重要了。预计本技术规范将随着研究的发展经常更新。

本文件不是一个单独的文件,它必须与 IEC 60076 系列其他文件提供的大量资料及导则一起使用。因而本文件遵循两个原则。

第一,液浸式变压器非常普及,本系列的其他标准已经作了很好的规范,因而除有参考价值的或考虑到需要强调或比较目的外,本技术规范不重复这些变压器的细节。

第二,通常的液浸式变压器,用硫酸纸、层压板、木材、矿物油及许多其他通用材料绝缘,在已有温度限值下工作,是普通的,认为是正常的或常规的。所有其他具有超过用于普通绝缘系统的热能力的其他固体或液体绝缘材料,认为是高温材料。

因此,这个“标准”或“普通”绝缘系统被规定为“常规”绝缘系统以便比较,将它们的正常温度限值标出以便说明与其他高温系统的不同。将正常应用的固体和液体绝缘用通用列表方法,以方便对典型性能进行比较,并说明增加的相对不熟悉材料的使用范围和性能。

本技术规范以相同的方式强调负载、过载、试验和附件。经过选择的“常规”变压器的资料,仅用于比较或强调的目的。其他直接参考适合的 IEC 文件。

电力变压器 第 14 部分:采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计和应用

1 范围

本指导性技术文件规定了采用高温绝缘材料或采用高温绝缘材料与常规绝缘材料组合的液浸式变压器的技术规范、设计、试验和负载等方面的信息,以供制造方和用户使用。

本指导性技术文件适用于:

- 按 IEC 60076-1 设计的电力变压器;
- 按 IEC 61378 系列标准设计的变流变压器;
- 电弧炉变压器。

同时还包括了各种液体绝缘和固体绝缘组合的使用。

对于采用高温绝缘材料的牵引变压器,本指导性技术文件也有指导作用。

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。

IEC 60076-1:1993 电力变压器 第 1 部分:总则(Power transformers—Part 1:General)

IEC 60076-2 电力变压器 第 2 部分:温升(Power transformers—Part 2:Temperature rise)

IEC 60076-3 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 60076-5 电力变压器 第 5 部分:承受短路的能力(Power transformers—Part 5:Ability to withstand short-circuit)

IEC 60076-7:2005 电力变压器 第 7 部分:油浸式电力变压器负载导则(Power transformers—Part 7:Loading guide for oil-immersed power transformers)

IEC 60085 电气绝缘 耐热性分级(Electrical insulation-Thermal classification)

IEC 60216-1 电气绝缘材料 耐热性 第 1 部分:老化程序和试验结果的评定(Electrical insulating materials—Properties of thermal endurance—Part 1:Ageing procedures and evaluation of test results)

IEC 60296 电工流体 变压器和开关用的未使用过的矿物绝缘油(Fluids for electrotechnical applications—Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear)

IEC 60317(所有部分) 特种绕组导线规范(Specifications for particular types of winding wires)

IEC 60554-3(所有部分) 电工用纤维素纸规范 第 3 部分:单项材料规范(Specification for cellulosic papers for electrical purposes—Part 3:Specifications for individual materials)

IEC 60641-3(所有部分) 电工用纸板和压纸板规范 第 3 部分:单项材料规范(Pressboard and presspaper for electrical purposes—Part 3:Specifications for individual materials)

IEC 60674-3(所有部分) 电气用塑料薄膜规范 第 3 部分:单项材料规范(Plastic films for electrical purposes—Part 3:Specifications for individual materials)

IEC 60819-3(所有部分) 电工用非纤维素纸规范 第3部分:单项材料规范(Non-cellulosic papers for electrical purposes—Part 3:Specifications for individual materials)

IEC 60836 电气用未使用过的硅绝缘液体(Specifications for unused silicone insulating liquids for electrotechnical purposes)

IEC 60851-4 绕组线试验方法 第4部分:化学性能(Winding wires-Test methods—Part 4:Chemical properties)

IEC 60867 绝缘液体 以合成芳烃为基的未使用过的绝缘液体(Insulating liquids-Specifications for unused liquids based on synthetic aromatic hydrocarbons)

IEC 60893-3(所有部分) 绝缘材料 电工用热固性树脂工业硬质层压板(Insulating materials-Industrial rigid laminated sheets based on thermosetting resins for electrical purposes—Part 3:Specifications for individual material)

IEC 61099 电气用未使用过的合成有机树脂(Specifications for unused synthetic organic esters for electrical purposes)

IEC 61100 按着火点和净热量值对绝缘液体的分类(Classification of insulating liquids according to fire-point and net calorific value)

IEC 61212-3(所有部分) 电气用热固性树脂工业硬质圆形层压管和棒 第3部分:单项材料规范(Insulating materials-Industrial rigid round laminated tubes and rods based on thermosetting resins for electrical purposes—Part 3:Specifications for individual materials)

IEC 61378-1 变流变压器 第1部分:工业用变流变压器(Convertor transformers—Part 1:Transformers for industrial applications)

IEC 61629-1 电气用聚芳酰胺纸板 第1部分:定义、名称和一般要求(Aramid pressboard for electrical purposes—Part 1:Definitions, designations and general requirements)

ISO 2592 石油产品闪点和燃点的测定 克利夫兰开口杯法(Determination of flash and fire points—Cleveland open cup method)

ISO 2719 闪点的测定 宾斯基-马丁闭口杯法(Determination of flash-point—Pensky-Martens closed cup method)

3 术语和定义

IEC 60076-1 和 IEC 60076-2 中界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

绝缘系统 insulation system

由固体绝缘和液体绝缘材料组成的系统。

3.2

温度指数 TI temperature index TI

从耐热性关系推出的时间为 20 000 h(或其他规定时间)时的摄氏温度数值。

注:改写 IEC 212-02-08。

3.3

半差 HIC halving interval HIC

表示在温度等于 TI 时取得的终点时间的一半到终点时间的开氏温度间隔的数值。

注:改写 IEC 212-02-10。

3.4

耐热等级 thermal class

电气绝缘材料(EIM)或电气绝缘系统(EIS)耐热特性的一种标称,其数值等于该 EIM/EIS 可用的最高温度的摄氏温度(℃)数值。

注:改写 IEC 60085 的 3.11。

3.5

常规 conventional

形容词,指由矿物油和非改性纸构成的系统的温升限值和所用绝缘材料。

3.6

热改性纸(TUP) thermally upgraded paper (TUP)

经过化学处理的纤维素纸,其分解率得以降低。通过局部消除水分形成的媒质(如在氰乙化物中)或通过使用稳定剂(如在胺化物、双氰胺中)来抑制水分形成以减少老化的影响。如果纸的寿命满足了 ANSI/IEEE C57.100 的要求:在 110℃ 的密闭管中放置 65 000 h 或在按式(1)给出的其他时间/温度组合下仍保持 50% 的张力,则可认为纸已得到改性:

$$\text{Time(h)} = e^{\left[\frac{15\,000}{(\theta_A + 273)} - 28.082\right]} \approx 65\,000 \times e^{\left[\frac{15\,000}{(\theta_A + 273)} - \frac{15\,000}{(110 + 273)}\right]} \dots\dots\dots (1)$$

由于现在使用的热改性化学药品含氮,而在硫酸盐纸浆中没有氮,因此化学改性的程度是通过对外处理过的纸中的氮含量进行测定来确定的。当按 ASTM D-982 进行测量时,热改性纸的含氮量典型值介于 1% 和 4% 之间。

注:本定义于 2003 年 10 月 7 日由 IEEE 变压器委员会热改性纸定义工作组批准。

[IEC 60076-7 的 3.12]

3.7

高温 high temperature

指包括固体或液体材料的且运行温度比常规高的绝缘系统的温升限值和材料。

3.8

混合绝缘系统 hybrid insulation system

所有紧贴绕组导线(裸的或有绝缘)的绝缘(包括导线绝缘和直接与绕组接触的垫块、撑条和纸筒)均采用高温固体材料。仅在温度低的区域中用耐热等级为 105 限值的绝缘材料能满足要求时,在这些范围内便使用纤维素材料(见图 2)。

3.9

半混合绝缘系统 semi-hybrid insulation system

仅在导线绝缘中采用高温绝缘材料(见图 3)。

3.10

局部混合绝缘系统 mixed insulation system

位于绕组热点区域内的紧贴绕组导线的绝缘(包括绕组导线绝缘和如有必要时,与该区域中导线接触的垫块、撑条和纸筒)采用高温固体绝缘材料,而在绕组其余部分和其他温度低的区域中用耐热等级为 105 限值的绝缘材料能满足要求时,在这些范围内便使用纤维素材料(见图 4)。

3.11

均匀绝缘系统 homogeneous insulation system

所有高于常规绝缘系统温度的区域都使用高温固体绝缘,同时还使用高温液体绝缘的系统。

3.12

参考温度 reference temperature

绕组额定平均温升加 20℃。

4 绝缘材料

4.1 概述

本章所列举的各种高温绝缘材料仅供参考用。所述的这些材料,并不意味着它们之间任何一种特定的组合均作为电气绝缘系统(EIS)适用于高温液浸式变压器。

表1列出了目前常用的固体绝缘材料名称及其一些典型参数和特性。这些参数和特性,在对该材料进行评估时是必需的。值得注意的是,宜从材料生产商处取得所选用材料的供设计用的参数规定值。绝缘材料通常可分为固体、导线用漆涂层和液体类。

任何一种材料均应考虑它与系统中其他材料的相容性问题,而不只是考虑其热能力。应注意各单项材料的热能力即便满足要求,但将它们用于一个系统中时,由于彼此之间的相互影响,有可能使系统反而变成不适用的情况。

4.2 绝缘材料的老化和寿命¹⁾

材料老化是绝缘材料分子分裂过程的结果,它改变了材料的某些性能。这是个吸热过程,需要供给原子充足的能量以使分子分裂。供给的能量越多,分子分裂的速度越快。能量的表现形式是热,它使温度升高。结果温度就成了老化率和寿命的对应的指标。除温度外的其他因素,如酸、氧或水也可能影响寿命。假设这些其他因素是不变的,绝缘材料的寿命通常符合式(2):

$$L = a \times e^{\frac{b}{T}} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- L——寿命(小时);
- a——以小时为单位的常数;
- e——自然对数的底(2.718...);
- b——以K为单位的常数;
- T——以K为单位的温度。

式(2)是从阿伦尼乌斯(Arrhenius)公式导出的。当对等号两侧同时取自然对数时,结果为:

$$\ln(L) = \ln(a) + \left(\frac{b}{T}\right) \dots\dots\dots (3)$$

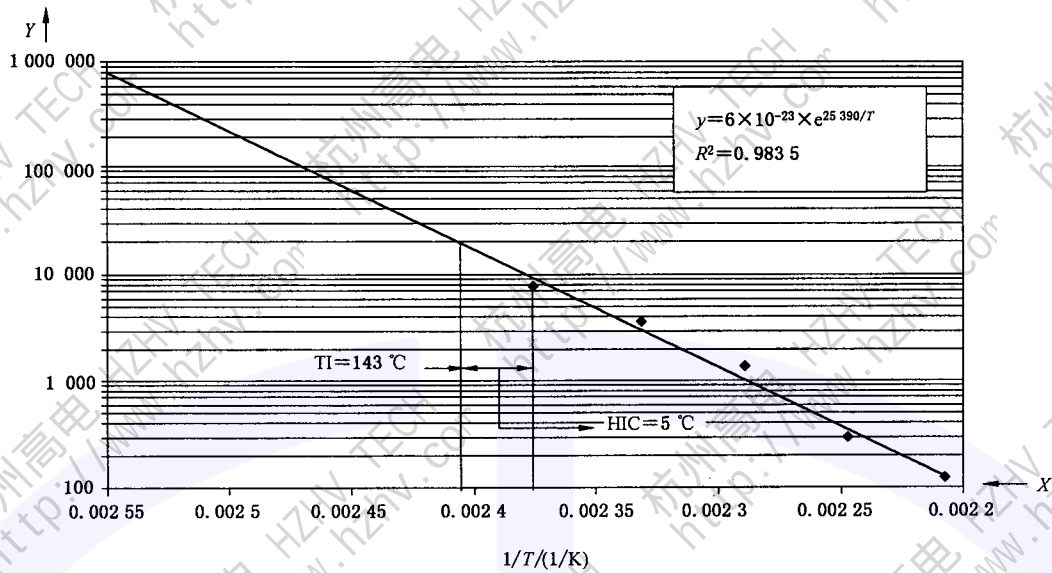
式(3)为一条直线(在半对数坐标L对1/T坐标系中),是按IEC 60216-1根据耐热试验得到的。

寿命终点的判定标准必需在耐热试验开始前规定好。它可以是一个绝对值或材料的某个关键性能指标的原始值的百分数,应该首选劣化速度比其他的快的重要性能。对用纤维素绝缘的矿物油浸渍式变压器来说,包导线的纸的抗拉强度通常用作确定变压器整体老化率的参数之一。聚合度(DP)也用作老化的指标,对纤维素基绝缘来说,数值200通常认为是寿命的终点。

耐热试验时,材料试样被加热到几个不同的温度,并记下到寿命终点的时间。持续时间相对于绝对温度的倒数值标记到坐标系统上,坐标系的时间轴为对数刻度(见图1)。

图1上的点是耐热试验的结果。直线就是回归线。正如看到的,这些点的位置很靠近回归线,这证明被试材料的寿命对时间关系符合阿伦尼乌斯公式。

1) 本条阐述简单材料的经典老化理论。典型变压器中有关材料复杂的老化机理更详细的分析可在参考文献中得到。



说明：

X 轴——绝对温度的倒数数值， K^{-1} ；

Y 轴——寿命，小时(h)；

注：X 轴(1/T)通常从右向左，所以高温在图的右侧。

图 1 耐热试验图例

过回归线与纵坐标上 20 000 h 寿命的交点画一条垂直线，这条垂直线交横坐标于相当于 143 °C 点。这即说明，这个材料的温度指数 TI 为 143 °C。

过回归线与 10 000 h 寿命的交点画另一条垂直线，这条垂直线交横坐标于相当于温度 148 °C 点。半差 HIC 就是 148 与 143 之差，等于 5 °C。

在温度指数 TI 时的寿命 20 000 h(稍大于 2 年)，通常认为作为可接受的寿命是太短了。要得到可接受的寿命，选定的耐热等级必须低于 TI。低多少取决于材料的寿命要求多长。寿命和温度的关系可以从图上的回归线得到，或用图中右上角的回归公式计算。

例如，如果要求寿命为 20 年(175 200 h)，则耐热等级建议为 128 °C。如果要求为 30 年(262 800 h)，则耐热等级建议为 126 °C。

耐热等级等于材料的最高运行温度，使用者还要适当的考虑到使用材料的变压器的寿命要求。变压器的负载类型和变压器运行现场的实际环境温度也建议考虑。在许多情况下，变压器可能长时间在低于额定负载下工作，这将降低老化率并延长寿命。

在某些已进行的试验中，寿命终点规定为失去初始抗拉强度的 50%。然而，不建议对这个限值或其他寿命终点所规定的限值进行机械地理解。当规定的寿命达到后，变压器还可以正常的运行许多年。材料的降解缓慢进行，没有明显的拐点。规定的寿命终点，更多地起到一个警示作用，即提示变压器承受应力的能力(如大短路电流的能力)与新变压器相比是很低了。此外将变压器从一个场地运到另一个场地可能会产生更大的风险。

4.3 固体绝缘

固体绝缘是以纸、膜、片(薄板纸)和纸板的形式使用的，并做成各种各样的外形用于绝缘结构中。

表 1 列出了常见材料名称及其典型性能参数值。表中也有纤维素基产品的参数以便比较。注意,这些材料的典型性能是将系统组成部分制作成独立的试验样品单个地在空气中试验取得的。当一个绝缘系统浸入所选用的绝缘液体中时,其绝缘性能和热特性的参数值可能与系统组成部分自身的参数值有明显的差别,且与其在指定液体中浸渍处理后的相关参数值有明显的差别。

也不宜假定系统的耐热等级必然是由该系统中各组成部分各自温度等级中最低者来确立的。相反地,系统的耐热能力往往要受益于最高温元件。但是在绝缘设计中,宜根据各组成部分的各自温度等级对不同的绝缘材料进行正确的配置。

根据对不同液体研究时的试验数据的分析,表明在运行温度下具有明显高的饱和含水量的液体,可允许固体绝缘有更高的运行温度限值,因为它们能够将水从纸中移出。

表 1 固体绝缘材料典型性能

材料	耐热等级 (IEC 60085) ℃	引用标准	25 ℃下的 相对 介电常数	介质损耗因数/%		吸潮性 %	密度 g/cm ³	形态
				在 25 ℃	在 100 ℃			
纤维素基	105	IEC 60554-3	3.3~4.1	0.4	1.0	7.0	0.97~1.2	纸
纤维素基 热改性纸	120	—	3.3~4.1	0.4	1.0	7.0	0.97~1.2	纸
纤维素基	105	IEC 60641-3	2.9~4.6	0.4	1.0	7.0	0.8~1.35	板
酚醛纸板	130	—	5.8	2.5	—	2.3	1.36	板
聚苯撑 硫(PPS)	155	—	3.0	0.06	0.12	0.05	1.35	膜
聚酯玻璃 [*]	130~200	IEC 60893-3	4.8	1.3~7.0	不适用	0.2~1.1	1.8~2.0	片
聚酯玻璃 [*]	130~220	IEC 61212-3	不适用	不适用	不适用	0.16~0.28	1.8~2.0	成型件
聚酰亚胺	220	IEC 60674-3	3.4	0.2	0.2	1.0~1.8	1.33~1.42	膜
芳族聚酰胺	220	IEC 60819-3	1.6~3.2	0.5	0.5	5.0	0.72~1.0	纸
芳族聚酰胺	220	IEC 61629-1	2.6~3.5	0.5	0.5	5.0	0.70~1.15	板
注 1: 所有数据均在空气中测量。								
注 2: 相对介电常数和介质损耗因数数据均为 50 Hz/60 Hz 下的值。								
注 3: 吸潮性数据为空气相对湿度为 50% 的值。								
[*] 由于制造过程中可能吸气,故典型的应用只在低压产品上。								

4.4 导线绝缘涂层

表 2 列出了多种适用于铜和铝制的圆形和扁形绕组导线的绝缘漆。有关补充资料可参见 IEC 60317 系列标准中的特定部分。注意本表中所列出的绝缘漆材料,不意味着它与任何一种可用绝缘液体相容。IEC 60851-4 规定了它们与不同绝缘液体是否相容的(试验)程序。

表 2 导线绝缘常用的各种涂层材料

化学名称	耐热等级 ℃	IEC 60317 的适用部分	通用简称	通用名称
聚乙烯醇缩醛	105 120	1、14、17 12、18	PVF 或 PVA	聚乙烯醇缩醛
聚氨酯	130 155 180	2、4 20、35 51	UEW	聚氨酯
覆有聚酰胺的聚氨酯	130 155	19 21	UEWN	尼龙涂层聚氨酯
聚酯	130 155	34、41、45 3、16、54	PEW	聚酯
覆聚酰胺涂层的聚酯	180	22、24	PWWN HPEWN	尼龙涂层聚酯
聚酰胺酯	180	8、15、23、28 36、37	EIW	聚酰胺酯
聚酯·聚酰胺酯亚胺	200	13、25、29、38	HPEAIW	聚酯·聚酰胺酯亚胺
覆有聚酰胺酯亚胺涂层的 聚酰胺酯	200	13、25、29、38	EAIW	酰胺酯亚胺涂层 聚酰胺酯
覆有聚酰胺涂层的聚酰胺酯	180	22、24		聚酰胺涂层聚酰胺酯
芳香族聚酰胺酯亚胺	200	26	AIW	芳香族聚酰胺酯亚胺
芳香族聚酰胺酯	200	7、30	PIW	芳香族聚酰胺酯
以下为标准未规定的绕组线绝缘				
环氧树脂	155	不适用	Epoxy	环氧树脂
聚苯醚砜	155	不适用	PPSU PAES	聚苯醚砜
聚芳基砜	180	不适用	PAS	聚芳基砜
聚苯醚-醚酮	220	不适用	PEEK	聚苯醚-醚酮
注：在空气中的耐热等级按 IEC 60317。				

4.5 绝缘液体

表 3 列出了适用于液浸式变压器的绝缘液体典型性能参数。表中也列出了变压器最常用的符合 IEC 60296 要求的矿物油,目的是为其他液体与其进行性能对比提供参考基准,该液体也作为高温性能对比的基准。

IEC 61100 提供了按燃点和发热(卡路里)值对绝缘液体进行分类的规则,按 ISO 2592 的规定,如果测得的燃点高于 300 ℃,则该液体便定为 K 级。然而,不论是闪点还是燃点,都不能决定液体的耐高温能力,沉积物的出现、受潮及氧化程度均会对液体的耐热能力有影响。如果某种成品液体适用于工作温度比常规矿物油高时,则宜向该液体生产商进行咨询,这是由于液体的高温性能与其内部是否有添加剂有关,而在同样的一般产品目录中,不是所有的产品都存在添加剂。

表 3 列出了最高工作温度,其出发点仅是提供进一步研究用的数值。因为至今尚无一个确立绝缘液体耐热等级的可接受的通用方法。所列出的这些数值是估计值或者为工业部门的一般接受值,但不宜作为本指导性技术文件的推荐值。

表 3 绝缘液体的典型性能

通用名称	引用标准	耐热等级 ^a ℃	闪点 ^c ℃	燃点 ^c ℃	含水量 mg/kg	密度 g/cm ³	25 ℃ 下的相对介电常数 ^d	25 ℃ 下的介质损耗因数 ^d %	粘度 (mm ² /s)		25 ℃下的 热传导率 W/mK	25 ℃下的 比热 J/kg℃
									40 ℃时	100 ℃时		
矿物油	IEC 60296	105	145	160	25	0.88	2.2	0.05	9.2	2.3	0.12	2 100
合成碳氢液体	IEC 60867	~130	230	250	15	0.83	2.1	0.01	—	4.1	0.14	2 100
合成酯液体	IEC 61099	~130 ^b	275	310	50	0.97	3.2	0.02	34	5.8	0.16	2 100
二甲基硅液体	IEC 60836	~155 ^b	310	360	50	0.96	2.7	0.01	40	14.3	0.15	1 500
下列液体虽已用于某些变压器中,但尚无标准对其进行规范												
合成 PAO 碳氢液体	不适用	~130	264	304	15	0.83	2.1	0.01	—	8.6	0.13	2 300
自然酯	不适用	~130 ^b	330	360	50	0.91	3.2	0.20	33	9	0.17	2 000
高分子碳氢液体	不适用	~155	280	312	10	0.87	2.2	0.01	—	11.8	0.14	2 100
注:本表中所列各值仅作为不同液体对比用的一般指导。至于某些特定的物理参数的可接受值,见各种液体的标准。没有标准的,建议与生产商确认。												
^a 耐热等级等于推荐的最高运行温度,在此温度下可得到液体的可接受的寿命。 ^b 由于这些液体的抗氧化性能,因此,估计的温度限值只适用于可基本消除空气浸入的密封型变压器或有充氮保护系统的变压器。 ^c 克利夫兰开口杯试验时按 ISO 2592。在 IEC/TC 10(电工设备用液体技术委员会)中,闪点测定是按 ISO 2719 规定的宾斯基-马丁闭口杯法,其测得的数据一般低于本表列出值。 ^d 相对介电常数和介质损耗因数的数值均为 50 Hz/60 Hz 下的值。												

5 绝缘系统

5.1 概述

用于电工设备的绝缘系统,包括了用一种或几种固体绝缘材料对导电部分进行电气绝缘,同时用一种液体对导电部分进行绝缘并进行热交换和冷却。这些绝缘材料必须耐受住电工设备在其预计寿命期间中出现的电气、机械、化学和热应力。有关对由固体和液体材料组成的绝缘系统的评估方法,可见 IEC/TS 62332-1。

绝缘材料承受的热应力主要与温度有关。然而,即使在常规变压器中温度分布也是不均匀的。例如,在变压器处于满负载时,液体的温度能在从底部处的 70 °C 到顶部处的 100 °C 之间变化。相应地,导线连同其绝缘材料达到的热点温度,一般比其周围液体温度要高 10 °C~20 °C。其余绝缘材料,按其所在位置的高度,大致接近于其所接触处液体的温度。

由于绝缘系统的老化和寿命时间与温度有很大的关系,因此对各种绝缘材料采用不同的组合,有可能得到最佳的变压器热性能和经济的设计。由于使用耐热等级不同的绝缘材料,故绝缘系统也不是常规绝缘系统。为了让这些高温绝缘材料在使用中得到最佳值,使绝缘材料的能力与其实际使用温度相配合是有意义的。

依据不同固体绝缘材料与某一种液体的组合,可以标志出多种不同的绝缘系统。但为了交流,一般将绝缘系统分为四种不同的类型。然而,选择和定义这四种系统并不意味着限制其他可能的组合。随着高温绝缘系统的发展,可能增加附加的通用组合。这些分类也不包括虽然使用了高温绝缘材料,但仍在常规温度下工作的组合情况。IEC 60076-2 和 IEC 60076-7 充分地包括了这一类型的变压器。

5.2 绝缘系统类型

5.2.1 均匀高温绝缘系统

均匀高温绝缘系统是指所有主要固体绝缘材料采用高温绝缘材料,同时液体采用高温绝缘液体。然而,在选定的温度较低的区域可以采用温度较低的绝缘。例如,在热的液体流之外的机械支撑。

固体:用于绕组的高温部位及相关的部位。

液体:高温。

温度限值:液体顶层温度及绕组平均温度和热点温度均比常规温度高。

5.2.2 混合绝缘系统

混合绝缘系统是指变压器的整个绕组,但不必是每一个绕组,采用了矿物油和高温固体材料。例如,当某个特定绕组设计成是在常规温度下运行,可能用常规绝缘材料。

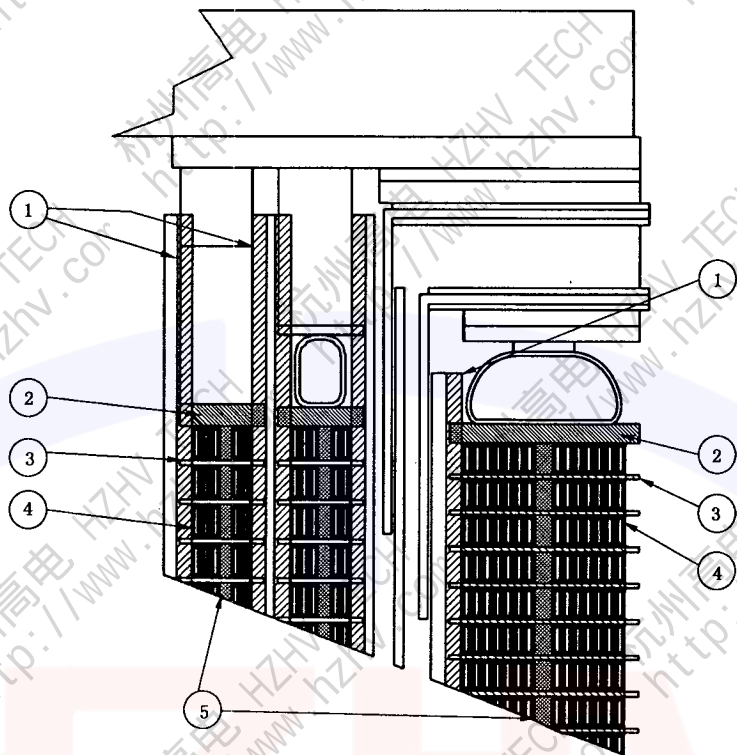
典型的是导线绝缘和幅向及轴向垫块用高温绝缘材料。常规的纤维素基绝缘用于所有其他区域,如纸筒和角环等在常规温度下工作的,用常规绝缘。

固体:所有与发热导线接触的绝缘均用高温材料。

液体:矿物油或任何具有等同或更高绝缘耐热等级的绝缘液体。

温度限值:液体顶层温度用常规温度,某些绕组平均温度和绕组热点温度高于常规温度。

注:假定引线按常规温度设计,那么它们可以用常规绝缘。



说明：

- ①——高温轴向撑条；
- ②——绕组顶部和底部高温幅向垫块；
- ③——绕组内部高温幅向垫块；
- ④——高温导线绝缘；
- ⑤——绕组内部高温轴向撑条。

图 2 混合绝缘系统中的固体绝缘示意图

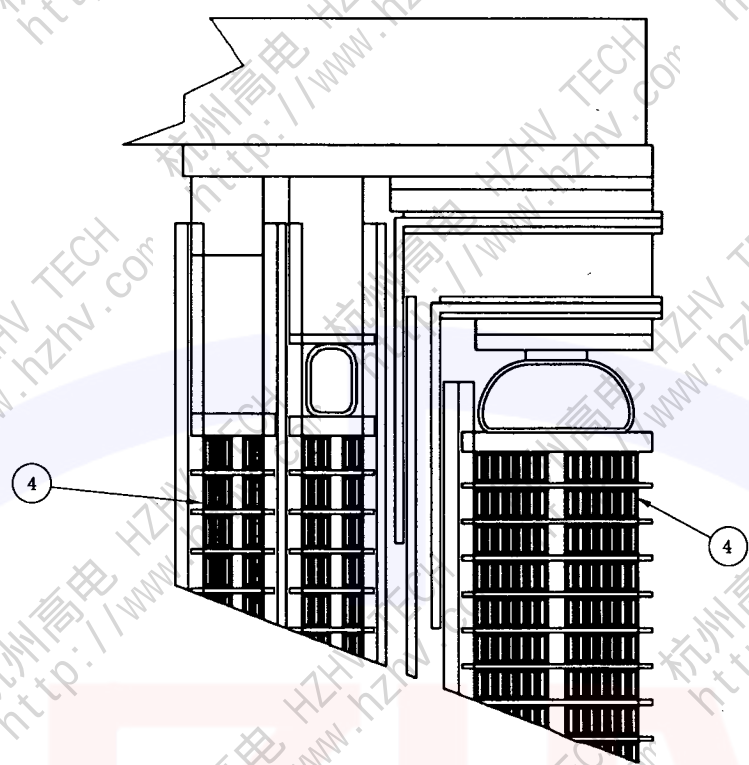
5.2.3 半混合绝缘系统

半混合绝缘系统是指采用常规液体以及只在运行温度高于常规温度的绕组中的导线绝缘采用高温固体绝缘材料，而所有其余绝缘材料均是常规绝缘材料。在层式绕组中，导线绝缘还包括层间绝缘。

固体：仅在某些绕组或所有绕组中的导线绝缘采用高温材料。

液体：矿物油或任何具有等同或更高绝缘耐热等级的绝缘液体。

温度限值：液体顶层温度用常规温度，某些绕组平均温度和绕组热点温度高于常规温度。



说明：

④——高温导线绝缘。

图 3 半混合绝缘系统中的固体绝缘示意图

5.2.4 局部混合绝缘系统

局部混合绝缘系统是指在绕组的某些元件或部分，例如，绕组导线所在区域中的温度高于常规温度的情况下，采用高温绝缘材料。

有可能会有额外损耗和发热区，例如：

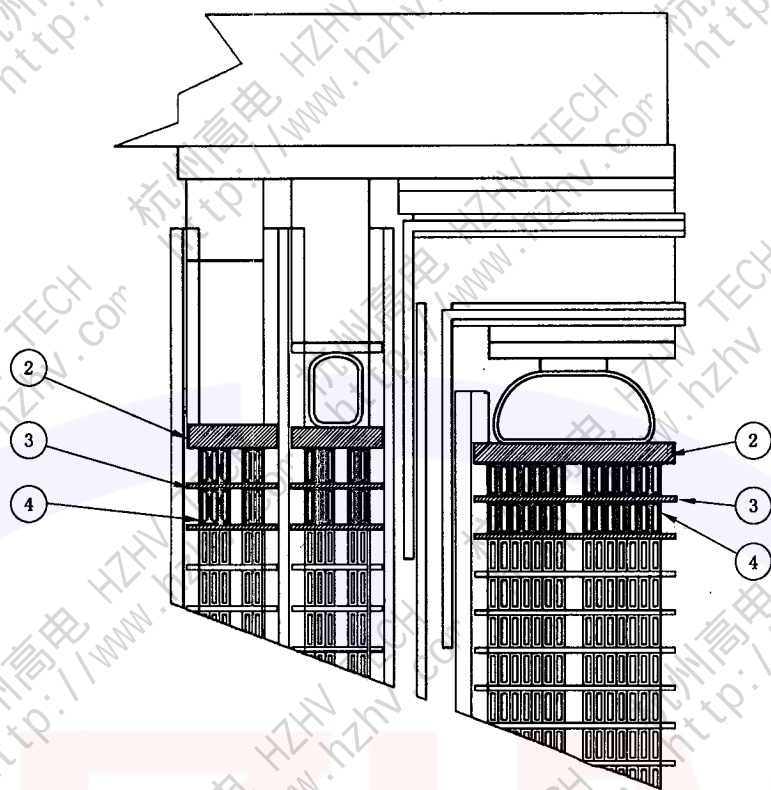
- 由于幅向漏磁分量绕组端部；
- 变流变压器绕组中谐波电流大的区域。

由于在绕组上部的温度较高，例如上部 1/4 处，这部分也可能采用高温绝缘。然而，主要的固体绝缘材料以及变压器中的绝缘液体是常规的。

固体：某些绕组的特定区域为防止老化过快而采用高温绝缘。

液体：矿物油或任何具有等同或更高绝缘耐热等级的绝缘液体。

温度限值：液体顶层温度和绕组平均温度用常规温度，某些绕组或所有绕组的热点温度高于常规温度。



说明:

- ②——绕组顶部高温幅向垫块;
- ③——绕组内部高温幅向垫块;
- ④——热点区域高温导线绝缘。

图 4 局部混合绝缘系统中的固体绝缘示意图

6 温度限值

在大多数采用纤维素材料和矿物油的常规变压器中,变压器的最高运行温度是由固体绝缘决定的。当高温固体绝缘材料与常规液体一起使用时,绝缘液体通常成为一种限制性的因素,且由它决定变压器的最高温度限值。此时避免绝缘液体过热便成为设计的焦点。这是因为,当液体温度超过某一规定值后,老化现象便出现了,从而改变了绝缘液体的众多性能。其中,作为重要性能之一的液体绝缘强度,如果液体温度不保持低于某规定值时,有可能在较短时间内明显地下降。

表 4 和表 5 列出了由不同固体和液体绝缘材料组合的绝缘系统的最高温度限值。有关补充信息参见附录 B。然而,表中所列的这些值均是上限值,且它与变压器的设计和使用有密切的关系。因而本指导性技术文件并没有为每个绝缘系统选定一个单一温升限值。相反,建议选定的额定温升限值比表中的最大值要低,且其增量宜为 5℃。经过足够的试验数据证明了的熱分布模型,可用来决定任何一台特定变压器设计的实际最高温度限值。在决定这些最高温度限值时需要考虑如下一些因素:

- 自由呼吸单元会将水分和氧带入变压器油箱内,从而对绝缘老化有很大影响。这种老化随温度升高而加快;
- 绝缘材料的老化,比如纤维素材料,会在变压器油箱内产生水和氧;
- 冷却通道中液体的流速,这是由于液体长时间暴露于高温中,使劣化加快;

- 由于存在因裸铜和银表面的接触反应而产生的副产品、溶解于绝缘液体中的衍生物以及微粒等引起的催化作用,从而使液体和绝缘材料加速老化;
- 在绕组的导线与绝缘层之间被截留的液体因过热而产生气泡。关于气泡生成的一般性信息和所列的计算气泡产生时的温度计算近似公式,见附录 C。当这个资料是基于纤维素绝缘和矿物油时,其概念与高温材料是基本相同的。然而,研究显示,高温材料的含水量比纤维素绝缘更少,结果是产生气泡的温度就更高(附加信息参见 IEEE 1276-1997 的 P.5)。

表 4 矿物油或替代液体变压器在顶层液体温升为 60 K 时的温升限值

a) 最高温升限值				
项 目	常规绝缘系统 ^a	局部混合绝缘系统	半混合绝缘系统	混合绝缘系统 ^b
最低的高温固体绝缘耐热等级 ^c /℃	不适用	130	120	155
顶层液体温升/K	60	60	60	60
绕组平均温升/K	65 ^d	65	75	95
常规固体绝缘热点温升/K	78	78	78	78
高温固体绝缘热点温升/K	不适用	110	90	130
注:所示的温升为基于 IEC 60076-1 规定的常规环境温度下的温升,但包括在非标准环境温度下的陈述。				
^a 用于对比的参考系统。 ^b 液体保护系统有效防止空气进入油箱的基本无氧应用情况。 ^c 材料要求。 ^d OD 装置的温升可以是 70 K。				
b) 最高过载温度限值				
项 目	常规绝缘系统 ^a	局部混合绝缘系统	半混合绝缘系统	混合绝缘系统 ^b
最低的高温固体绝缘耐热等级 ^c /℃	不适用	130	120	155
正常负载周期下的最高顶层液体温度/℃	105	105	105	105
长期急救负载下的最高顶层液体温度/℃	115	115	115	115
正常负载周期下的最高常规热点温度/℃	120	120	120	120
长期急救负载下的最高常规热点温度/℃	140	140	140	140
正常负载周期下的最高高温绝缘热点温度/℃	不适用	150	130	170
长期急救负载下的最高高温绝缘热点温度 ^d /℃	不适用	180	150	200
注:参见 IEC 60076-7 的表 4。				
^a 用于对比的参考系统。 ^b 液体保护系统有效防止空气进入油箱的基本无氧应用情况。 ^c 材料要求。 ^d 表中所示的急救负载温度宜谨慎使用,因为它们是类似于 IEC 60076-7 推出的,但还没有被现场经验或实验室试验证明。这些值仅作为一个起点,应谨慎评估。				

表 5 均匀高温绝缘系统变压器的温升限值

a) 最高温升限值						
项 目	酯油或相当的油			硅油或相当的油		
最低的高温固体绝缘耐热等级 ^a /℃	130	155	180	155	180	200
顶层液体温升/K	80	80	80	100	100	100
绕组平均温升/K	85	100	115	100	115	125
热点温升/K	110	135	160	135	160	180
注 1：液体保护系统有效防止空气进入油箱的基本无氧应用情况。						
注 2：所示的温升为基于 IEC 60076-1 规定的正常环境温度下的温升，但包括在非标准环境温度下的陈述。						
^a 材料要求。						
b) 最高过载温度限值						
项 目	酯油或相当的油			硅油或相当的油		
最低的高温固体绝缘耐热等级 ^a /℃	130	155	180	155	180	200
正常负载周期下的最高顶层液体温度/℃	130	130	130	155	155	155
长期急救负载下的最高顶层液体温度/℃	140	140	140	170	170	170
正常负载周期下的最高热点温度/℃	150	175	200	175	200	220
长期急救负载下的最高热点温度 ^b /℃	170	200	230	200	230	255
注：基本无氧应用情况，液体保护系统有效防止空气进入油箱。						
^a 材料要求。						
^b 表中所示的急救负载温度宜谨慎使用，因为它们是类似于 IEC 60076-7 推出的，但还没有被现场经验或实验室试验证明。这些值仅作为一个起点，应谨慎评估。						

7 变压器附件和相容性

7.1 概述

在高温运行中，要重视对各种附件进行检查，以确认它们与配套的部件或所接触的材料在电、热、化学和机械方面的特性均具有相容性。相容的材料在正常使用时的性能应不会降低或关键参数应无异常劣化。

本部分主要涉及热相容性。但是，也须考虑这些附件的绝缘和化学性能以及它们的密封特性是否合适的问题。

7.2 套管

只要顶层液体温度不超过常规限值，绕组中的运行温度即使比较高，也不会对套管有较大的影响。如果顶层液体温度高于常规设计值时，则可能对套管性能有影响。此时，可能需要特别的高温套管或尺寸加大的套管。作为一种替代的办法，也可以将套管移放至液体温度较低部位处。

对常规电容式套管宜特别注意,因为当套管周围环境温度过高时,电容可能会热击穿。见 IEC 60137,其中描述了套管周围变压器绝缘液体的温度限值:

- 正常负载:100 ℃;
- 急救负载:115 ℃;
- 最高日平均:90 ℃。

由于有热击穿的危险,电缆供应商及进入变压器的端部密封件的供应商可能也会限制变压器套管周围的液体温度。

7.3 分接开关

无励磁分接开关通常不会安置在顶层液体最热处。但是,当分接开关置放处的液体温度超过常规产品采用的 100 ℃时,宜在选择分接开关各元件时,对其热、机械和绝缘性能进行专门考虑。

如果热量是从绕组传递到分接开关触头上,则绕组运行温度更高时也可能会对分接开关有影响。由于热源是来自绕组而不是来自于更大的电流,故选用电流额定值更高的分接开关不是解决问题的办法。在高温运行的使用情况中,宜考虑触头材料的相容性问题。

当有载分接开关处于高于常规的温度时,如果需要特殊调整,有必要在寻价、订货阶段向有载分接开关供货商咨询。同样,如果变压器的绝缘液体与常规的矿物油不同,也建议向有载分接开关供货商咨询。

7.4 密封材料

如果顶层液体温度不超过常规值,则绕组内部运行温度不会影响密封件的性能。当绝缘液体在较高的温度下运行时,就要求采用更高等级的密封材料,所用的材料在使用温度下要求与绝缘液体化学相容。

7.5 油箱喷漆

如果顶层液体温度不超过常规值,则绕组内部较高的运行温度不会影响漆的性能。当绝缘液体在较高的温度下运行时,采用热相容的内部和外部漆的规范就重要了。

7.6 冷却器

如果顶层液体温度不超过常规值,则绕组内部较高的运行温度不会影响冷却器的性能。当绝缘液体在较高的温度下运行时,冷却器的所有材料宜适用于高温。粘度和传热率等热性能应仔细考虑,因为它们可能与矿物油有明显的不同。它们的热性能在更大的温度范围内可能会发生变化。就像油箱一样,漆宜适用于高温下使用。

7.7 油泵

油泵的规范中宜考虑绝缘液体在整个运行温度范围内的粘度问题。

7.8 油箱和储油柜

储油柜的容积大小宜考虑到变压器运行的温度范围。高温液体的膨胀/收缩可能会明显地与矿物油不同。对于密封式变压器,油箱或储油柜的大小宜足够,以免产生不正常的压力。对于采用隔膜式的呼吸系统,可能要求采用具有更高温度等级的隔膜材料。而且隔膜的材料应与绝缘液体相容。

7.9 粘合剂

制造过程中使用的粘合剂,如果希望在整个寿命过程中一直牢固,则宜适用于运行温度且与绝缘液体化学相容。

7.10 电流互感器

电流互感器的绝缘系统宜在热和化学性能方面与变压器所用的高温绝缘液体相容。

7.11 温控器

必要时,温控器及温度指示器宜适合于更高温度下工作且具有更大的温度测量范围,更大的范围是由特殊应用决定的。特别是要对其报警值和动作值仔细调整好。

7.12 保护继电器

采用高温绝缘系统的变压器,其内部所产生的气体可能与常规绝缘系统不同,因此,保护继电器宜与绝缘液体、运行温度和可能产生的气体相容。

7.13 辅助电缆

预计绝缘液体运行温度高于常规矿物油的变压器,连接外部附件的电缆应与箱盖、箱壁隔热或采用能长期耐受相应温度的型号。

8 设计时的特殊考虑

8.1 短路考虑

欲使设计的绕组平均温升比常规设计值高,可通过降低其冷却能力或选取更高的电流密度或二者同时来达到。在后一情况下,则可能还需要加强其机械结构,以便能承受住外部短路所产生的动稳定效应。

绕组自身的机械结构及其支撑结构的设计,宜考虑绕组在更大温度范围下可能出现的膨胀或收缩问题。

此外,绕组的工艺处理宜使其在运行中保持结构坚固性。

变压器宜设计成能承受住 IEC 60076-5 规定的短路。每个绕组的平均温度最高许可值宜按该标准进行计算。对于表 5 所列的具有高温绝缘的 I 类变压器,铜绕组在短路下的最高许可温度值为 350 °C。

对于绕组设计成采用环氧树脂粘合的绕组导线的,宜考虑到环氧树脂在更高温度下的机械强度会变得 weaker 的特点。

8.2 绝缘要求

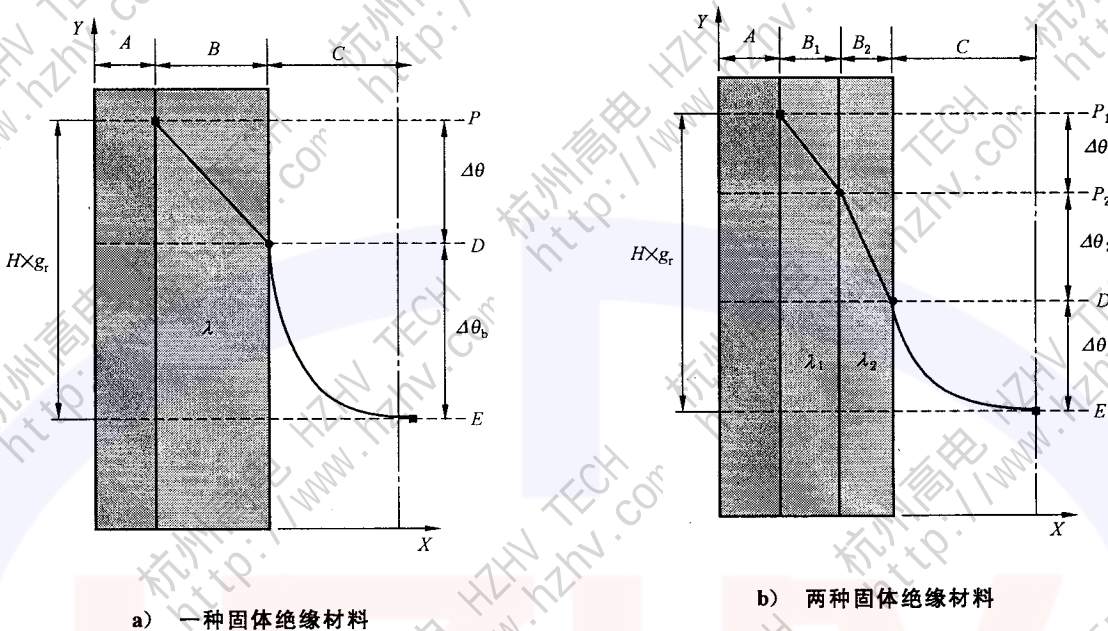
尽管 IEC 60076-3 的基本要求适用,但由固体和绝缘液体组成的高温绝缘系统的绝缘性能可能会与常规系统不同。因此在设计阶段,要对这些变化的影响进行全面的分析。设计宜保证变压器在整个运行温度范围内,绝缘性能不产生不可接受的劣化。

8.3 温度要求

绕组热点温度值及其位置,对变压器能否正常地运行至关重要。对任何一台变压器这些都是设计特性,宜有一个准确的并已通过模型试验得到确认的绕组热模型。在局部混合绝缘系统中,将存在着几个热点(每一种绝缘类型有一个热点),因而都要仔细考虑。见图 5b)及图 6。

重要的是要注意到,在很多情况下绕组内部冷却通道中的液体温度比油箱中的顶层液体温度高,因为绕组热点是由紧邻绕组的液体温度决定的,所以宜考虑到这点。绝缘绕组中的绕组导体对液体的温差通常是等于跨固体绝缘的温差及跨液体边界层的温差之和。在高温绝缘系统中,跨液体边界层的温差通常比常规绝缘系统要大。这意味着在大多数情况下,绕组表面的温度是受绝缘液体的热能力限制的。

在 D 点(见图 5)处的绕组表面的最高温度是由冷却通道中的液体温度与跨液体边界层温升之和给出的。它与绕组表面处的传导系数和穿过绕组表面的热流密度有关。要求绝缘液体能承受此最高的绕组表面温度而其老化不加快,且不会出现不可接受的气体或气泡。



说明:

X 轴——距导线表面的距离;

Y 轴——温度;

A ——导体厚度;

B ——固体绝缘材料的厚度;

B_1 ——高温绝缘材料的厚度;

B_2 ——常规绝缘材料的厚度;

C ——液体边界层厚度;

D ——绕组表面温度;

E ——冷却通道中的液体温度;

g_r ——额定电流下绕组平均温度与液体平均温度之间的温差;

H ——热点系数;

P ——与固体绝缘材料接触处的热点温度;

P_1 ——与高温绝缘材料接触处的热点温度;

P_2 ——与常规绝缘材料接触处的热点温度;

$\Delta\theta$ ——固体绝缘内部的温差;

$\Delta\theta_1$ ——高温绝缘内部的温差;

$\Delta\theta_2$ ——常规绝缘内部的温差;

$\Delta\theta_b$ ——液体边界层内部的温差;

λ ——固体绝缘材料的热传导率;

λ_1 ——高温绝缘材料的热传导率;

λ_2 ——常规绝缘材料的热传导率。

图 5 导体对液体的温差

8.4 过载

高温变压器的过载能力可能与常规变压器不一样,这与变压器的设计和绝缘系统的热能力有关。

IEC 60076-7 关于油浸式变压器负载导则的一般原理和公式仍适用,但过载水平除外,这是由于温度和时间常数对不同的绝缘系统可能不适用。最高过载温度见表 4b)和表 5b)。任何过载要求,还宜在询价或签订合同时予以规定。

8.5 谐波电流影响

谐波电流与同一方均根值的正弦波电流相比,将使变压器的涡流损耗和杂散损耗增加。从而使绕组的平均温升和热点温度增加。

由谐波电流引起的损耗增加,将使绕组平均温升与绕组热点温度之间的差值也加大。此差值对于具有两个或多个相互弱耦合侧绕组的变流变压器是十分明显的。有关补充信息,见 IEC 61378-1。

8.6 油保护系统

在询价和订货时,宜按 IEC 60076-1 对液体保护系统予以规定。所有液浸式变压器,均应排除氧气。对于高温运行中的变压器,这一点特别重要。当液体保护系统不总能避免液体与空气接触时,宜限制其在可以更经常地进行液体处理的场合使用。尽管这样,宜采取一些积极的手段对空气进行干燥,例如采用去潮式呼吸器。

9 需要的信息

9.1 用户应提供的信息

9.1.1 环境温度和负载周期

环境温度宜符合 IEC 60076-1 和 IEC 60076-2 要求。如果环境温度与常规运行条件不同,表 4 和表 5 注明的温升限值宜作相应的修正。用户应提供任何特殊的负载周期的信息。

9.1.2 谐波电流

关于谐波电流对变压器的损耗以及温度的影响,按 8.5 的规定。谐波电流主要来自于与变压器相连接的变流器。这些谐波的特性与下述情况有关:

- 变流器线路布置;
- 变流器控制技术;
- 变流器与其所适用系统之间的相互影响;
- 电力电子元件的特性。

变压器制造方一般没有有关变流器产生谐波电流的必要信息或知识。因此,IEC 61378-1 系列标准要将谐波频谱纳入规范内。用户有责任对变压器将受到的谐波作出规定,而变压器制造方在其变压器设计中考虑这些谐波规定值。

9.1.3 其他特殊使用条件

所有其他特殊使用条件,按 IEC 60076-1 的规定。

9.2 制造方应提供的信息

9.2.1 热特性

在询价及签订协议时宜给出额定的顶层液体温升和绕组平均温升。

除了 IEC 60076-2 规定的温升值外,宜提供绕组导线的热点温升值。

询价及订货时宜给出绝缘系统的类型。

如果适用,宜给出所用绝缘液体的技术规范,同时宜按 IEC 61100 给出液体的等级标号。

9.2.2 参考温度

当变压器绕组具有不同的绝缘系统温度时,具有较高绝缘系统温度的绕组的参考温度应为变压器的参考温度。

9.2.3 保证值

应保证参考温度下的负载损耗及短路阻抗值。参考温度下的负载损耗亦用于温升试验中。IEC 60076-1 规定的保证值偏差适用。

顶层液体温升及绕组平均温升限值应不超过表 4 和表 5 所列出的值。

10 铭牌及补充信息

10.1 铭牌和警告牌

10.1.1 铭牌

除了 IEC 60076-1 所规定的要求外,额定铭牌还应包括下列信息:

- 标准编号;
- 绝缘系统类型(均匀、混合、半混合、局部混合等);
- 按表 4 或表 5 的绝缘系统(EIS)耐热等级;
- 额定顶层液体及绕组的平均温升;
- 液体的类型、牌号及标准编号。

10.1.2 警告牌

如果油箱表面温度高于 60 °C,应提供警告牌以引起注意,避免触及这类表面。当表面可触及时,宜参照有关标准以及特殊设计温度,在变压器上放置适当的警告标志。

10.2 变压器说明书

由于所用绝缘材料与纤维素材料和矿物油不同,故变压器说明书应重点突出介绍有关其气体生成和受潮过程的不同特点。对现场脱气和干燥处理宜作出说明。

11 试验

11.1 概述

电力变压器和电抗器的试验要求,按 IEC 60076 系列标准的规定;变流变压器的试验要求,按 IEC 61378-1 系列标准的规定。

11.2 例行试验、型式试验和特殊试验的要求

11.2.1 概述

要求将测量结果值校正到参考温度下。对于 IEC 60076-5 定义的 II 类和 III 类变压器,可能还需要采集溶解气体分析(DGA)数据,以作为一种诊断方法供参考用,这是由于其特性很可能与常规变压器不同。

11.2.2 例行试验

试验应按照 IEC 60076-1 的要求。

11.2.3 型式试验

试验应按照 IEC 60076-1 的要求。

11.2.4 特殊试验

试验应按照 IEC 60076-1 的要求。

11.3 温升试验

11.3.1 概述

绕组对液体温差大的紧凑型强迫油导向循环冷却方式变压器的热时间常数比常规变压器要小。因此,应尽可能缩短从试验电源切除到绕组电阻测量之间的时间间隔。

从试验电源切除到第一个读数测出时的时间间隔,理想地说宜小于 1 min。如果做不到这一点,则允许在切断试验电源的同时,还切除冷却风扇和油泵的电源,以降低冷却曲线的测量不确定性。

11.3.2 局部混合绝缘系统的温升试验结果估算

两个不同的热点温度需要用计算或试验来确定。图 6 中 P_1 为 B、C 之间绝缘系统的热点温度, P_2 为 E、C 之间绝缘系统的热点温度。绕组各部分的温度估算宜按照 IEC 60076-7 的规定。热点系数 H_1 和 H_2 需由制造方计算。

油箱内顶层与底部之间的液体温差为:

$$\Delta\theta_{LW} = \theta_o - \theta_b \dots\dots\dots (4)$$

式中:

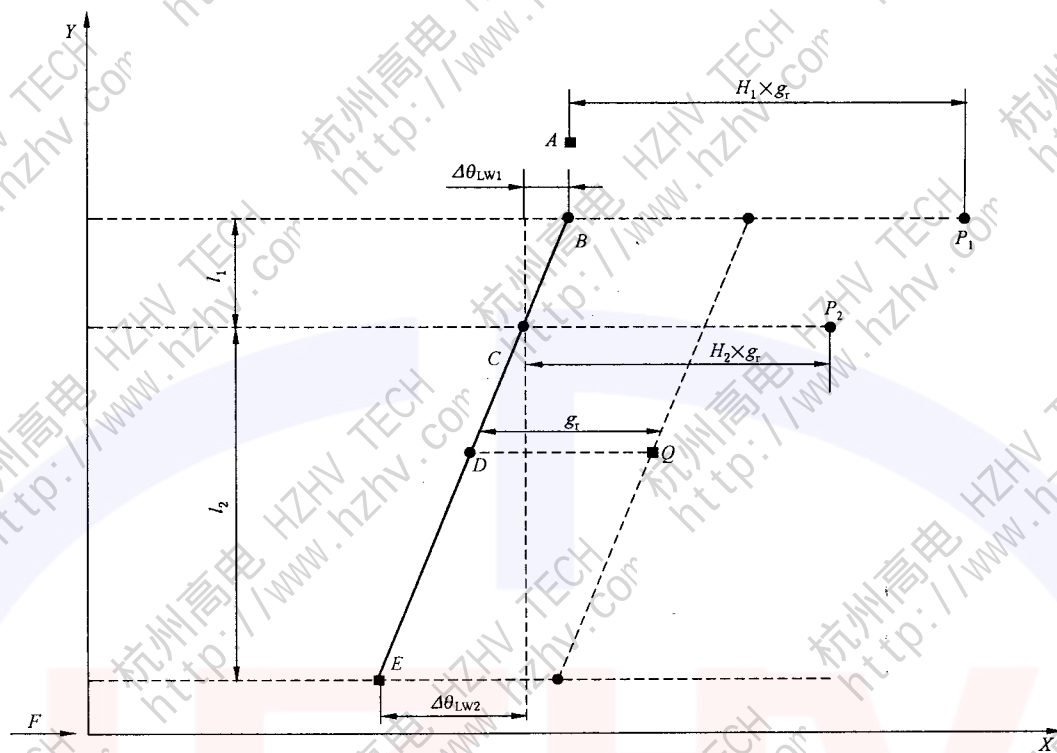
θ_o ——油箱内顶层液体温度;

θ_b ——油箱内底部液体温度。

为了得到绕组两个不同部分分界处的冷却通道液体温度(图 6 中的点 C),将液体温差分为两个部分:

$$\Delta\theta_{LW1} = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \times \Delta\theta_{LW} \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta\theta_{LW2} = \Delta\theta_{LW} - \Delta\theta_{LW1} \dots\dots\dots (6)$$



说明:

X 轴 —— 温度;

Y 轴 —— 沿变压器高度方向的轴向位置;

A —— 油箱中液体出口处和油箱温度计的液体温度的平均值;

B —— 绕组顶部处的液体温度(假设与 A 相同);

C —— 在两种不同绝缘材料分界处的绕组内部的液体温度;

D —— 油箱内平均液体温度;

g_r —— 额定电流下绕组平均温度与平均液体温度的温差;

E —— 流入绕组底部的液体温度;

F —— 表示油箱的底部;

H_1 —— 采用高温绝缘材料的绕组部分的热点系数;

H_2 —— 采用常规绝缘材料的绕组部分的热点系数;

l_1 —— 采用高温绝缘材料的绕组上部分的轴向长度;

l_2 —— 采用常规绝缘材料的绕组下部分的轴向长度;

P_1 —— 与高温绝缘材料接触处的热点温度;

P_2 —— 与常规绝缘材料接触处的热点温度;

Q —— 用电阻法测得的绕组平均温度;

$\Delta\theta_{LW1}$ —— 绕组上部的液体轴向温升;

$\Delta\theta_{LW2}$ —— 绕组下部的液体轴向温升;

■ —— 测量点; ● —— 计算点。

图 6 局部混合绝缘系统中的绕组温度分布图

11.4 绝缘的型式试验

需要时,绝缘系统的介电性能宜适合在高温下考核。

12 监测、诊断和维修

12.1 概述

对变压器进行监测和诊断,是对变压器的危险性进行分析和进行良好管理的战略手段之一,由此宜提出合适的维修计划和使变压器具有更可靠的运行寿命。由于以往的一些重要数据至今仍不大适用,对高温变压器,监视其绝缘系统的性能将是一项更重要的任务。

欲得到一个良好的通用诊断方法,可参阅 IEEE 62。

12.2 矿物油浸渍式变压器

由于矿物油的温度限制,在含有纤维素的绝缘系统中,其高温固体绝缘材料用量少,一般只占绝缘材料总量的很小部分。因此,由于发热、局部放电和燃弧而产生的气体的成分很可能接近正常运行条件下的常规变压器的情况。

在混合绝缘系统的变压器中,最可能产生气体的来源是矿物油。当出现过热、热故障、局部放电或燃弧时,有可能使高温固体绝缘分解,从而产生气体和其他衍生物(如,水分、微粒、呋喃、金属成分等)。

也可能要求定期地进行油样分析。IEC 60422 提供了对矿物油进行监测和维护的导则。

12.3 高温绝缘液体浸渍式变压器

当具有高温均匀绝缘系统的变压器内部出现了过热、局部放电或电弧时,液体或固体绝缘可能发生分解,出现气体和其他衍生物(例如,水、微粒、呋喃、金属成分等)。

对 IEC 60076-5 定义的 II 或 III 类变压器,可能还要求采集 DGA(溶解气体分析)数据,以作为一种诊断工具供参考用。这是由于其特性很可能与常规变压器不同。IEC 60944 和 IEC 61203 分别提供了硅油变压器和酯油设备的检测、诊断和维修指导。

附录 A
(资料性附录)

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下:

- GB/T 261—2008 闪点的测定 宾斯基-马丁闭口杯法(ISO 2719:2002,MOD)
- GB 1094.1—1996 电力变压器 第1部分:总则(eqv IEC 60076-1:1993)
- GB 1094.2—1996 电力变压器 第2部分:温升(eqv IEC 60076-2:1993)
- GB 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(IEC 60076-3:2000,MOD)
- GB 1094.5—2008 电力变压器 第5部分:承受短路的能力(IEC 60076-5:2006,MOD)
- GB/T 1094.7—2008 电力变压器 第7部分:油浸式电力变压器负载导则(IEC 60076-7:2005,MOD)
- GB 2536—1990 变压器油(neq IEC 60296:1982)
- GB/T 3536—2008 石油产品闪点和燃点的测定 克利夫兰开口杯法(ISO 2592:2000,MOD)
- GB/T 4074.4—2008 绕组线试验方法 第4部分:化学性能(IEC 60851-4:2005,IDT)
- GB/T 11021—2007 电气绝缘 耐热性分级(IEC 60085:2004,IDT)
- GB/T 11026.1—2003 电气绝缘材料 耐热性 第1部分:老化程序和试验结果的评定(IEC 60216-1:2001,IDT)
- GB 18494.1—2001 变流变压器 第1部分:工业用变流变压器(idt IEC 61378-1:1997)
- GB/T 21218—2007 电气用未使用过的硅绝缘液体(IEC 60836:2005,IDT)
- GB/T 21221—2007 绝缘液体 以合成芳烃为基的未使用过的绝缘液体(IEC 60867:1993,MOD)

附录 B
(资料性附录)

从表 4 和表 5 看变压器温度

表 4 和表 5 中所列的温度限值是根据固体和液体绝缘材料在给定的绝缘系统中的热性能给出的。本指导性技术文件规定了几个行业上不熟悉的新的绝缘系统。表 B.1 的目的是通过与采用常规绝缘系统的理论上平均水平的变压器进行比较,给出新绝缘系统的温升限值。表 B.1 从理论上说明了与每个绝缘系统相应的液体温升对应的可能的绕组梯度和热点温度系数。从结果上看,某些温升可能是不现实的。此外,为了简化,平均液体温升取顶层液体温升的 80%。

表 B.1 中将相对不熟悉的高温系统的关键温度与熟悉的常规系统进行了比较。此外,表 B.1 并不希望包含所有可能的常规设计,只是集中在几种容易区分的设计上。

表 B.1 理论上可能的变压器温升比较

液体类型	常规				酯	硅
绝缘系统类型	常规	局部混合	半混合	混合	均匀	均匀
绕组平均温升/K	65	65	75	95	100	115
绕组热点温升/K	78	110	90	130	135	160
顶层液体温升/K	60	60	60	60	80	100
估计的典型液体平均温升/K	50	50	50	50	65	80
估计的绕组温度梯度/K	15	15	25	45	35	35
估计的绕组热点温度梯度*/K	18	50	30	70	55	60
* 这些估计的温升值并不推荐为实用值,但却是用顶层液体温升推导出的绕组热点逻辑结果,说明了热点温升典型的大的裕度。						

附录 C
(资料性附录)
气泡生成温度的计算

C.1 概述

用户与设计人员宜考虑高温变压器内部会产生气泡的可能性。以往大量的关于过载条件的研究报告都是关于纤维素绝缘变压器的,但对于预定在高温下运行的变压器来说,生成气泡的原则大致相同。近 10 年来的研究表明,最大的一个决定性因素不是温度,而是固体绝缘内的含水量。本附录是以 Oommen 的研究为基础编制的,并被选作唯一的经验公式以描述这个现象。

曾经认为气泡生成条件是:要求总气体或蒸汽压力值必须超过施加于气泡上的外施压力。总气体或蒸汽压力值可由气泡的气体组分含量(由占多数的溶解氮气和某些生成气体)和由与发热导线接触的纸绝缘材料因受热而释放出的水蒸气来计算。

现在,专家们认同气泡是由空穴表面扩张而成形的。空穴含有初始的气体或蒸汽组分。当将此论点用于纸包导线时,就可假定细小的空穴存在于纸的表面处,且其内最初含有少量的水蒸气和溶解气体(主要是氮气)。在高温条件下,导线和纸过热且空穴膨胀,水蒸气开始注入空穴内。随着空穴变大,水蒸气越来越多。而在此有限的期间内,氮气含量很难出现变化。因此,气泡成形即表示水蒸气释放出,而不是油中氮气释放出。生成气体的作用甚至变得不太重要。

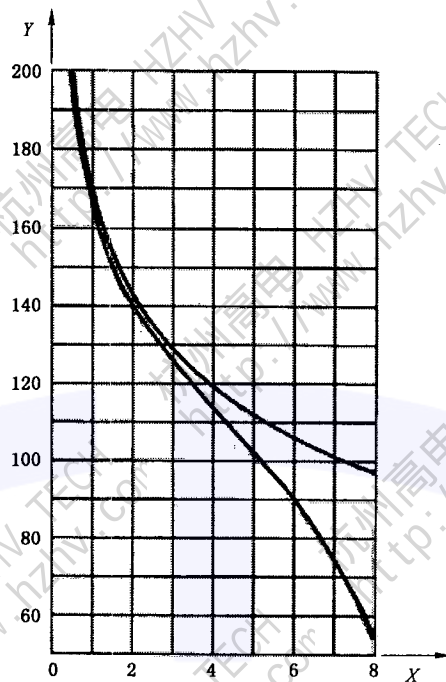
C.2 基本假定

决定气泡成形的基本公式按式(C.1):

$$P_{\text{int}} = P_{\text{ext}} + \frac{2 \times \sigma}{R} \dots\dots\dots (C.1)$$

- 式中:
- P_{int} —— 内压力;
 - P_{ext} —— 外压力;
 - σ —— 表面张力;
 - R —— 气泡半径。

图 C.1 是此结果的曲线图表示。上面一条曲线指脱气的油,下面的曲线指含气量饱和的油。注意在含水量低时,不论是脱气油还是气体饱和油,二者的气泡生成温度实际上几乎相同。当纸的含水量为 2%(此值大致与一台老化的纤维素绝缘变压器相对应)时,气泡生成温度略高于 140℃。而当含水量为 0.5%时,气泡生成温度便高于 200℃。



说明：
X 轴 —— 纸的含水量百分数；
Y 轴 —— 气泡生成的热点温度(℃)；
上曲线——不含气体的系统；
下曲线——含气量饱和的系统。

图 C.1 气泡生成的温度曲线图

C.3 气泡生成的数学公式

可以将热点温度看成是含水量、含气量和总外施压力(等于大气压力与油位差之和)三者的函数。
气泡生成温度可用式(C.2)估算：

$$\theta = \left[\frac{6\,996.7}{22.454 + 1.449\,5 \times \ln(W_{WP}) - (2.015 + \ln(P_{pres}))} \right] - e^{(0.473 \times W_{WP}) \times \left(\frac{V_g^{1.585}}{30} \right)} - 273 \tag{C.2}$$

式中：
 θ —— 气泡生成温度(℃)；
 W_{WP} —— 纸中含水量，按无油的干纸质量百分数(%)；
 P_{pres} —— 总压力(kPa)；
 V_g —— 液体中气体含量的体积分数(V/V)。

C.3.1 概述

C.3.1.1 纸中含水量确定

现在已有几种方法来确定变压器内纸绝缘的含水量。其中两种间接法是：时域或频域中的介电响应分析法和水分平衡曲线分析法。

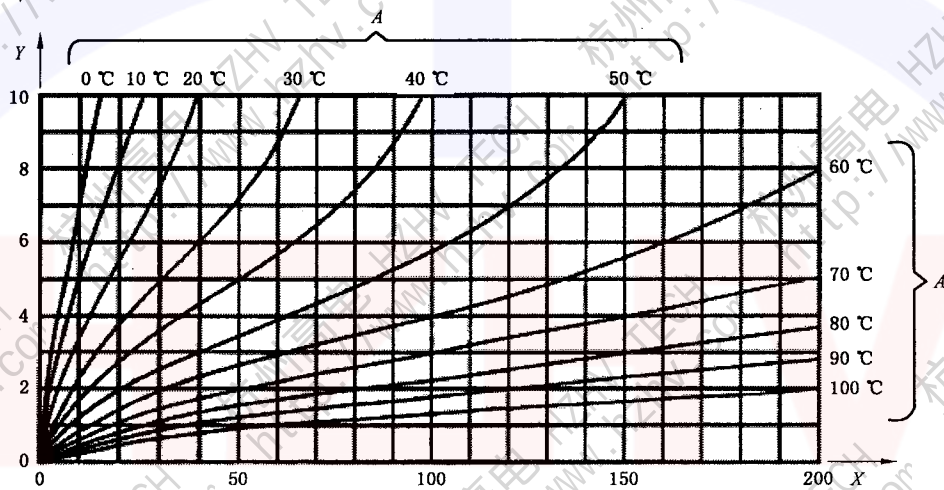
C.3.1.2 介电响应分析法

本法要求变压器在无励磁时施加一个直流电压,将其结果与含水量已知的系统进行比较,便可估算出变压器中的含水量。也可测其他参量,例如介质损耗因数和电容的频率函数曲线。

C.3.1.3 水分平衡曲线

在达到恒定负载的稳态条件下,便可得到纸和油中水分平衡的条件。在每个温度下,会确立新的一组值。利用这样一组平衡曲线,可根据容易测定的油中含水量来估算纸的含水量。

图 C.2 示出了由 Oommen 给出的油—纸绝缘系统的平衡曲线图,它是从纸和油在不同湿度和温度以及其组合下的饱和含水量的试验数据得到的。

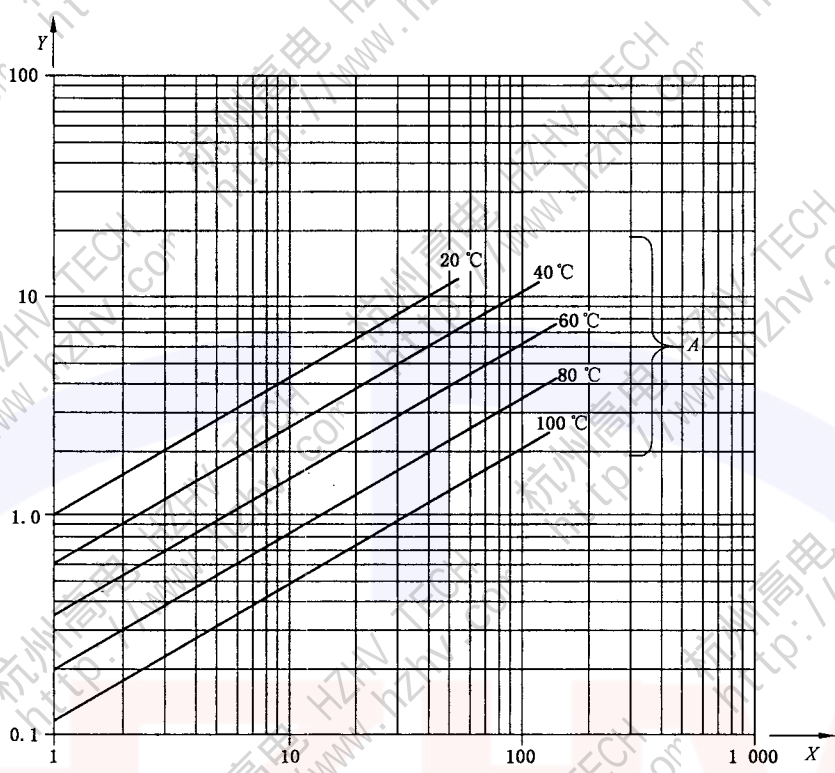


说明:
X 轴——油的含水量(mg/kg);
Y 轴——纸的含水量(%);
A ——平均油温。

图 C.2 纤维素和矿物油中的水平衡曲线图

在变压器生产制造中对其器身进行干燥时,其目的是使固体纤维素绝缘中的水分含量一般小于 0.5%。但是,固体绝缘的含水量会随运行时间增加而增加,这是由于纤维素基绝缘在老化过程中会产生水。水分会使油的绝缘强度降低,且当含水量大于 30 mg/kg 时,油会很快地受到损害。

在使用水分平衡曲线图时,对变压器来说,实际上最关心的区域,显然是左下角处一块相当小的矩形区域。有时,也采用对数坐标以改善此关心范围内的可读性。图 C.3 是这些曲线的示例。



说明：
X 轴——油的含水量(mg/kg)；
Y 轴——纸的含水量(%)；
A ——平均油温。

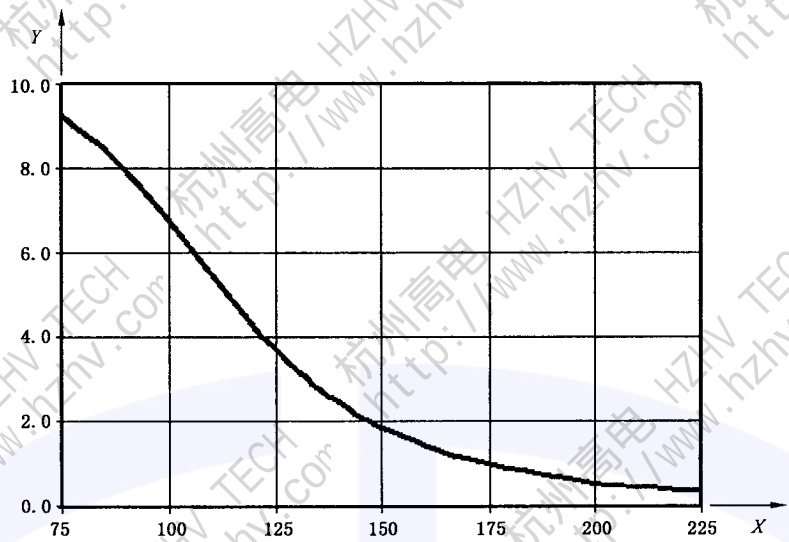
图 C.3 纤维素和矿物油中的水分平衡对数坐标曲线图

C.3.2 纤维素基绝缘变压器的计算举例

设纸绝缘中的含水量为 1.2%。为了计算大型电力变压器从线圈产生出的气泡生成温度，设气泡出现位置距顶层液面 2.5 m 深度处，故必须将液体高度引起的压力与液面上气体空间压力相加以得到计算用的总压力。假定采用如下的各参数值：

- 纸的含水量 W_{wp} : 1.2 %；
- 外界压力: 100 kPa；
- 液体压力(2.5 m): 21.6 kPa；
- 总压力 P_{pres} : 121.6 kPa；
- 含气量 V_g : 4.0 %。

按式(C.2)计算，气泡生成温度为 166 °C。当含气量为 8%时，气泡生成温度只下降 1 °C。但是，若含水量达 4%时，则气泡生成温度降至 121 °C。当含水量为 0.5 %且含气量仍为 8%时，则气泡生成温度大约是 204 °C。图 C.4 表示含气量为 4%时的同一例子的曲线图。由此看出，含水量是确定气泡生成温度的一个最关键的参数。



说明：
X 轴——温度(℃)；
Y 轴——纸的含水量(%)。

图 C.4 由计算例子所列各参数值得出的纸的含水量与气泡生成温度之间的关系曲线

参 考 文 献

- [1] IEC 60050-212:1990 International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 212: Insulating solids, liquids and gases
- [2] IEC 60076-4 Power transformers—Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing—Power transformers and reactors
- [3] IEC 60076-8 Power transformers—Part 8: Application guide
- [4] IEC 60137 Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V
- [5] IEC 60422 Mineral insulating oils in electrical equipment—Supervision and maintenance guidance
- [6] IEC 60505 Evaluation and qualification of electrical insulation systems
- [7] IEC 60567 Oil-filled electrical equipment—Sampling of gases and of oil for analysis of free and dissolved gases—Guidance
- [8] IEC 60599 Mineral oil-impregnated electrical equipment in service—Guide for the interpretation of dissolved and free gases analysis
- [9] IEC 60944 Guide for the maintenance of silicone transformer liquids
- [10] IEC 60970 Insulating liquids—Methods for counting and sizing particles
- [11] IEC 61039 Classification of insulating liquids
- [12] IEC 61203 Synthetic organic esters for electrical purposes—Guide for maintenance of transformer esters in equipment
- [13] IEC 61378-2 Converter transformers—Part 2: Transformers for HVDC applications
- [14] IEC 61378-3 Converter transformers—Part 3: Application guide
- [15] IEC/TS 62332-1 Electrical insulation systems (EIS)—Thermal evaluation of combined liquid and solid components—Part 1: General requirements
- [16] IEEE 62 IEEE Guide for diagnostic field testing of electric power apparatus—Part 1: Oil filled power transformers, regulators and reactors
- [17] IEEE 1276-1997 Guide for the application of high-temperature insulation materials in liquid-immersed power transformers
- [18] IEEE C57.147 Guide for the acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers
- [19] ASTM D6871 Standard specification for natural (vegetable oil) ester fluids used in electrical apparatus
- [20] CIGRE TF D1.01.10: October 2007 Ageing of cellulose in mineral oil insulated transformers, Brochure CIGRE N°323
- [21] EPRI Report EL-6761, March 1990 Bubble generation during transformer overload
- [22] Norwegian standard NEK 240-1: 2001 Insulating oils, requirements, supervision and maintenance—Part 1: transformers, switchgear and associated oil-filled equipment
- [23] L. E. Lundgaard, W. Hansen, S. Ingebrigtsen, D. Linhjell, M. Dahlund, Ageing of Kraft paper by acid catalyzed hydrolysis, IEEE Dielectric liquids, ICDL 2005, 26 June-1 July, pp 381-384
- [24] J. Jalbert, R. Gilbert, P. Tetreault, B. Morin, D. Lessard-Deziel, Identification of a chemical indicator of the rupture of 1,4- β -glycosidic bonds of cellulose in an oil-impregnated insulating paper

system, Cellulose DOI 10.2007/s 10570-007-9124-1, June 2007

[25] L. Lundgaard, O. Lillevik, K. B. Liland (SINTEF), Verification of paper condition in aged transformers, CIGRE colloquium A2/D1.01-Bruges, October 2007

[26] T. V. Oommen, Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems, Proc. Electrical Insulation Conference, Chicago, October 3-6, 1983

[27] ANSI/IEEE C57.100 Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers

[28] ASTM D-982 Standard Test Method for Organic Nitrogen in Paper and Paperboard

中 华 人 民 共 和 国
国家标准化指导性技术文件
电力变压器 第 14 部分：采用高温绝缘
材料的液浸式变压器的设计和应用

GB/Z 1094.14—2011/IEC/TS 60076-14:2009

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100013)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室：(010)64275323 发行中心：(010)51780235

读者服务部：(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 2.5 字数 69 千字
2012 年 4 月第一版 2012 年 4 月第一次印刷

*

书号：155066·1-44968 定价 36.00 元



GB/Z 1094.14—2011

打印日期：2012年5月7日 F009A

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话：(010)68510107