



# 中华人民共和国国家标准

GB 1094.16—2013

## 电力变压器 第16部分：风力发电用变压器

Power transformers—Part 16: Transformers for wind turbine applications

(IEC 60076-16:2011, MOD)

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

2013-12-17 发布

2014-12-14 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 .....	2
4 使用条件 .....	2
5 电气性能 .....	4
6 铭牌 .....	6
7 试验 .....	6
附录 A (资料性附录) 本部分与 IEC 60076-16:2011 的技术性差异及其原因 .....	8
附录 B (资料性附录) 计算方法和表格 .....	10
B.1 自然通风室内变压器的冷却 .....	10
B.2 带非正弦波电流负载的变压器的额定容量确定 .....	12
B.3 电压谐波的影响 .....	18
B.4 电谐振频率测量 .....	20
B.5 符号列表 .....	23
附录 C (资料性附录) IEC 60076-16:2011 的绝缘水平 .....	25
参考文献 .....	26
图 1 局部放电测量程序 .....	6
图 B.1 自然通风室内的散热 .....	10
图 B.2 工频电流注入装置原理图 .....	20
图 B.3 利用电容注入方法切换变压器绕组的电压响应 .....	21
图 B.4 高压注入试验图 .....	22
图 B.5 测量设备实例 .....	22
表 1 绝缘水平 .....	3
表 A.1 本部分与 IEC 60076-16:2011 的技术性差异及其原因 .....	8
表 B.1 谐波含量对液浸式变压器损耗的影响 .....	15
表 B.2 谐波含量对干式变压器损耗的影响 .....	17
表 B.3 电压谐波次数示例 .....	19
表 B.4 符号列表 .....	23
表 C.1 IEC 60076-16:2011 的绝缘水平 .....	25

## 前 言

本部分的第2章、第3章、7.2~7.4、附录A~附录C为推荐性的,其余为强制性的。

GB 1094《电力变压器》目前包含了下列几部分:

- 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。

本部分为GB 1094的第16部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分使用重新起草法修改采用IEC 60076-16:2011《电力变压器 第16部分:风力发电用变压器》。

本部分与IEC 60076-16:2011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一览表。

本部分还做了下列编辑性修改:

- 在第3章中,增加对GB 1094.1和GB/T 2900.53的引用,并将GB/T 2900.53列入规范性引用文件中;
- 为方便使用,在7.2和7.3的有关液浸式变压器的局部放电试验程序的规定中,将IEC 60076-16:2011中直接引用IEC 60076-13改为将IEC 60076-13的相关内容直接列入标准中。同时增加对GB/T 7354的引用,并将其列入规范性引用文件中;
- 增加附录A,将本部分与IEC 60076-16:2011的技术性差异及原因列于该附录中;
- 将IEC 60076-16:2011的附录A改为本部分的附录B;
- 表B.4中,增加了 $I_{h1}$ 、 $I_{h2}$ 和 $U_1$ ,删除了HV和LV;
- 增加附录C,将IEC 60076-16:2011中未被采用的绝缘水平列于该附录中。

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、顺特电气设备有限公司、国网电力科学研究院、明珠电气有限公司、吉林省电力科学研究院、广东钜龙电力设备有限公司、卧龙电气集团北京华泰变压器有限公司、丹东欣泰电气股份有限公司、保定天威顺达变压器有限公司、广州骏发电气有限公司、山东

GB 1094.16—2013

泰开箱变有限公司、卧龙电气银川变压器有限公司、吴江市变压器厂有限公司、广东海鸿变压器有限公司、福州天宇电气股份有限公司。

本部分主要起草人：张显忠、章忠国、刘燕、肖勋、任晓红、蔡定国、祁颖矢、敖明、王文光、付宝振、蔡虹、李占元、樊建平、刘建萍、鲁玮、林灿华、郭献清、林诚文。



## 引 言

GB 1094 的本部分用于规定安装在风力机组上的变压器的附加要求。

风力机组通过发电机升压变压器连接到电网。这些变压器可以安装在机舱或者塔架内或者靠近风力机组的外部。

本部分涵盖了风力机组或风电场用的变压器,这些场所对变压器的要求已超出现有 GB 1094 系列标准的要求。这些要求通常是变压器制造厂、风力机组制造厂和操作者所不熟悉的,导致这些变压器的可靠性低于常规的变压器。

现有的 GB 1094 标准中不包含风力发电用变压器。

本部分的目的在于使风力发电用变压器与常规的变压器达到同一可靠性水平。

本部分主要解决针对风力机组或风电场的重复高频瞬变过电压、电气、环境、温度、负载、安装和维护条件产生的影响。

在风力机组的现场测量、调研及观察中发现了不同安装方法的风险情况:

- 在 kHz 范围内的重复高频瞬变过电压/欠电压;
- 风力机控制所引起的过频/欠频;
- 过电压值;
- 来自低压侧的过电压/欠电压;
- 开、合产生的高的瞬变过电压;
- 变压器周围有局部放电现象;
- 电流和电压的谐波含量;
- 在环境条件下的过负载;
- 快速暂态过负载;
- 间隙不符合规定的最小值;
- 安装条件和连接方式;
- 冷却条件受到限制;
- 水滴;
- 湿度超出最大允许值;
- 盐度和灰尘等极端气候条件;
- 强振动;
- 机械应力。

因此,在变压器设计时有必要考虑应用中的限制条件,或者设置一些保护设备来保护变压器。对这些变压器有必要规定附加的或者更严格的例行试验、型式试验或者特殊试验来满足电网的要求。

# 电力变压器

## 第 16 部分：风力发电用变压器

### 1 范围

GB 1094 的本部分适用于额定容量从 100 kVA~10 000 kVA 的风力发电用的干式和液浸式变压器，其设备最高电压不大于 40.5 kV，且至少一个绕组的工作电压大于 1.1 kV。

适用于本部分的变压器应符合 GB 1094 系列标准的相关要求。

注：其他电压等级的风力发电用变压器可参考使用本部分。

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

GB 1094.2 电力变压器 第 2 部分：液浸式变压器的温升(GB 1094.2—2013, IEC 60076-2:2011, MOD)

GB 1094.3 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(GB 1094.3—2003, eqv IEC 60076-3:2000)

GB 1094.5 电力变压器 第 5 部分：承受短路的能力(GB 1094.5—2008, IEC 60076-5:2006, MOD)

GB/T 1094.7 电力变压器 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则(GB/T 1094.7—2008, IEC 60076-7:2005, MOD)

GB 1094.11 电力变压器 第 11 部分：干式变压器(GB 1094.11—2007, IEC 60076-11:2004, MOD)

GB/T 1094.12 电力变压器 第 12 部分：干式电力变压器负载导则(GB/T 1094.12—2013, IEC 60076-12:2008, MOD)

GB/T 2900.53 电工术语 风力发电机组(GB/T 2900.53—2001, idt IEC 60050-415:1999)

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

GB/T 13499 电力变压器应用导则(GB/T 13499—2002, idt IEC 60076-8:1997)

GB/T 18451.1 风力发电机组 设计要求(GB/T 18451.1—2012, IEC 61400-1:2005, IDT)

GB/T 18494.1 变流变压器 第 1 部分：工业用变流变压器(GB/T 18494.1—2001, idt IEC 61378-1:1997)

GB/T 18494.3 变流变压器 第 3 部分：应用导则(GB/T 18494.3—2012, IEC 61378-3:2006, MOD)

ISO 12944(所有部分) 色漆和清漆 防护漆体系对钢结构的腐蚀防护(Paints and varnishes—Corrosion of steel structures by protective paint systems)

IEC 61100 绝缘液体按照着火点和净热值分类(Classification of insulating liquids according to fire-point and net calorific value)

### 3 术语和定义

GB 1094.1 和 GB/T 2900.53 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**风力发电用变压器** wind turbine transformer

连接风力机组到风电场电力汇集网络的发电机升压变压器。

#### 3.2

**塔架** tower

风力发电机组的主体支撑结构件,其顶部放置装有发电机和其他设备的机舱。

#### 3.3

**机舱** nacelle

设在水平轴风力机塔架顶部包容电机、传动系统和其他装置的部件。

[GB/T 2900.53—2001,定义 2.1.7]

### 4 使用条件

#### 4.1 正常使用条件

除本部分另有规定外,正常使用条件应符合 GB 1094.1 和 GB 1094.11 的要求。

#### 4.2 海拔

GB 1094 系列标准的规定适用于本部分。

#### 4.3 冷却空气温度

把变压器安装在一个无自主冷却系统的外壳内会使变压器的温度升高。

当冷却空气最高温度不同于 GB 1094.2 的规定时,用户应加以明确。

变压器的设计应基于用户在询价阶段所描述的实际环境温度和实际安装情况。

附录 B.1 提供了变压器安装在自然通风区域时所需要考虑的事项,自然通风区域类似于机舱后部或者一个安装在塔架外面且配有进、出风口的独立外壳。

如果变压器安装在一个不具备自然通风条件的塔架或者外壳内时,B.1 的公式就不适用。在这些条件下运行的变压器,进出风口、冷却条件、空气冷却效果和通风效率的影响应予以考虑。

用户应在询价阶段指明塔架内的环境空气温度和空气流量。如果没有指明空气温度和空气流量,将假定塔架的内部环境温度比外部环境温度高 10 K,且变压器周围的空气循环不受限制。

在设计阶段是不考虑外部太阳直接辐射影响的。太阳直接辐射将使得变压器零件的温度升高,因此用户宜在询价时给出相关信息。

#### 4.4 变压器谐波电流含量

在询价阶段,用户应指明注入变压器的谐波电流的大小和频率。制造方在变压器设计时应考虑谐波电流的损耗,以避免绕组和液体的温升超出限值。

附录 B.2 给出了在变压器设计时谐波电流影响的计算方法。

变压器设计时应考虑由谐波电流引起的增容要求。温升试验应在 B.2 定义的谐波损耗下进行。其试验结果应满足变压器绝缘材料的绝缘耐热等级对变压器温升保证值的要求。

#### 4.5 电源电压波形

在规定的设备最高电压( $U_m$ )下,变压器应能在满负荷且电压与频率之比超过 GB 1094.1 规定的额定电压与额定频率之比的“过励磁”情况下连续运行而无损坏。

在询价阶段,风力机组制造方应规定电压与频率的最大比值。变压器制造方在变压器设计时应对此值加以考虑。

用户应在询价时指明电源内出现的所有谐波电压的幅值和频率。B.3 中给出了变压器设计时电压谐波影响的计算方法。

#### 4.6 瞬变过电压和欠电压

使得风力发电用变压器运行故障的风险更高的原因是变压器每一侧的重复性瞬变过电压和欠电压。

为防止这些快速瞬变的影响,可采用以下几种方法来提高变压器的可靠性:

- 评估变压器的绝缘水平,如有必要,采用建模或高频谐振分析测量系统中的一种或多种方法。谐振频率试验是一项特殊试验,试验方法应由制造方与用户达成共识。B.4 中描述了其中一种方法;
- 安装标准保护设备,如避雷器(高压和低压)、RC 回路或者浪涌电容。

系统工程师有责任根据特定的绝缘配合(参见 GB 311.1 和 GB/T 311.2)和风险评估来对表 1 中组 I 或者组 II 进行选择。

组 II 所示的变压器具有更强的重复性瞬变过电压承受能力和更高的可靠性。

表 1 绝缘水平

单位为千伏

设备最高电压 $U_m$ (方均根值)	额定短时外施工频耐受电压 (方均根值)		额定雷电冲击耐受电压 (峰值)	
	液浸式 (GB 1094.1)	干式 (GB 1094.11)	组 I	组 II
≤1.1	3	3	—	20
3.6	18	10	40	50
7.2	25	20	60	75
12	35	35	75	95
17.5	45	38	95	125
24	55	50	125	150
40.5	85	70	170	200

注: 如果用户另有要求,绝缘水平也可参照附录 C 或相关标准的规定选取。

高压侧或者低压侧的开合操作会产生高频浪涌。这些浪涌通过电缆传送到变压器接线端。变压器具有不同的谐振频率值,见 B.4。

如果由低压侧和高压侧的开关操作而引起的高频浪涌与绕组的固有频率一致时,则这些浪涌可能与绕组的固有频率产生共振,导致产生的电场强度超过绕组的绝缘耐受强度。

注: 对于  $U_m \leq 1.1$  kV 的情况,工频耐受电压宜取更高的值,如 10 kV。



#### 4.7 湿度和盐度

湿度和盐度过高会引起干式变压器故障,并给液浸式变压器或者带外壳干式变压器的敞开式套管带来问题。

IEC 60815 系列标准定义了液浸式变压器的敞开式套管的标准污秽等级。GB/T 4109 定义了模拟淋雨试验。

根据 GB 1094.11,对于环境等级为 E2 级的变压器,其试验室的相对湿度应维持在 93% 以上。在 E2 级试验中,盐雾的电导率应在 0.5 S/m~1.5 S/m 的范围内。

如果一个不带保护外壳的干式变压器要在相对于比 E2 级更严酷的湿度和盐度环境下运行时,则应按照 7.4.5 描述的 E3 级进行试验来证明所设计的变压器的性能。

GB/T 18451.1 规定 95% 及以下的相对湿度作为正常使用条件。

更高的湿度和盐度值应在询价阶段给出。

#### 4.8 变压器周围的特殊电气和环境条件

GB 1094.3 给出了变压器带电部件和风力机组导电部件的一般最小间隙的推荐值。

当被雨水、盐雾或者其他导电液体弄湿时,风力机组的所有由绝缘材料做成的部件将变成可导电的。变压器周围的局部放电会降低空气的绝缘强度。因此,风力机组的这些部件和变压器的带电部件的间隙应不小于 GB 1094.3 所推荐的间隙。

变压器制造方应在变压器的外形图上指明必需的最小间隙,用户有责任遵从以满足要求。

#### 4.9 振动等级

在设计变压器时,应考虑变压器的安装结构体的振动,尤其需要考虑应力传递到连接端子上的情况。

用户应在询价阶段说明振动谱。如有振动试验,则其试验程序应在询价阶段由用户与制造方达成共识。

#### 4.10 特殊使用条件

液浸式变压器和干式变压器的特殊使用条件分别按 GB 1094.1 和 GB 1094.11 的规定。

#### 4.11 运输和贮存条件

液浸式变压器和干式变压器的运输和贮存条件分别按 GB 1094.1 和 GB 1094.11 的规定。

贮存条件应包含在运行维护手册中,用户应加以重视。

#### 4.12 防腐保护

用户应根据安装种类选择一种 ISO 12944 中定义的保护等级,或者由用户与制造方共同协商。

### 5 电气性能

#### 5.1 额定容量

额定容量应与 GB 1094.1 的规定一致。

变压器的额定容量  $S_r$  基于基波电压  $U_1$  和基波电流  $I_1$ 。因此三相变压器的额定容量是:

$$S_r = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1$$

变压器的温升和冷却要求应考虑谐波损耗的影响。

## 5.2 设备最高电压

设备最高电压应根据 GB 1094.3 进行选择。

风力机组设计者应告知变压器制造方有关峰值电压、频率和所有瞬时重复过电压的持续时间等信息(也可见表 1)。

绝缘配合的信息见 GB 311.1 和 GB/T 311.2。

## 5.3 分接

如有分接,分接的规定按 GB 1094.1 进行。

分接范围的优先值为:

——+5%~-5%,每级 2.5%;或者:  
——+5%~-5%,每级 5%。

分接的选择应通过无励磁分接片或者无励磁分接开关来实现。

## 5.4 联结组

除非用户另有规定,依据 GB 1094.1,变压器的联结组标号一般为 Dyn5 或者 Dyn11。

## 5.5 中性点端子尺寸

除非用户另有规定,中性点端子应能够承载额定相电流。

## 5.6 短路阻抗

通常短路阻抗应与 GB 1094.5 的规定一致。

对于有辅助绕组的变压器,当第三绕组与系统的组合阻抗导致短路电流过高,使得变压器设计不可行或不够经济合理时,制造方应就最大允许过电流值与用户达成共识,并将其标志在铭牌上。在此情况下,用户宜限制过电流不超过制造方确定的最大值。

## 5.7 高压绕组和低压绕组的绝缘水平

高压绕组和低压绕组所选的绝缘水平应与表 1 保持一致。

## 5.8 额定条件下的温升保证值

变压器的设计应与用户在询价阶段说明的运行条件(谐波含量、环境温度)保持一致。

温升保证值应考虑由谐波(如规定)引起的附加损耗,包括绕组和支架部分的涡流损耗和杂散损耗。

如果在设计阶段没有规定谐波但在运行时实际负载电流包含谐波,则有必要减小变压器负载,以防止变压器温升超过限值。

B.2 给出了计算谐波电流影响的示例。

## 5.9 过载能力

过载能力按 GB/T 1094.7 和 GB/T 1094.12 的规定。

## 5.10 涌流

由于在风电场运行期间变压器的频繁合闸,因此变压器也频繁地承受涌流的机械效应和热效应。

在询价阶段应给出合闸频率(每年合闸的次数)。除非另有规定,应在高压侧(网侧)进行合闸。如果是在发电侧合闸,则应说明合闸和同步的方法。

用户在询价阶段应给出系统的涌流限值(最大值、持续时间)。

### 5.11 短路承受能力

变压器应满足 GB 1094.5 的要求。

### 5.12 带强迫冷却的运行

当通过风机或者泵强迫冷却时,带强迫冷却和不带强迫冷却的标称额定容量应由用户与制造方达成共识。

铭牌上应注明不带强迫冷却的额定容量和带强迫冷却的最大额定容量。

注:如果带强迫冷却,则制造方与用户应在询价阶段达成共识,优先使用相互负载法进行变压器的温升试验。因为使用相互负载法试验测量的温升更接近于正常运行中的实际值。

## 6 铭牌

液浸式变压器的铭牌按 GB 1094.1 的规定,干式变压器的铭牌按 GB 1094.11 的规定。

## 7 试验

### 7.1 试验项目和分类(例行试验、型式试验和特殊试验)

液浸式变压器按 GB 1094.1 的规定,干式变压器按 GB 1094.11 的规定。

### 7.2 例行试验

液浸式变压器按 GB 1094.1 的规定,干式变压器按 GB 1094.11 的规定。

注:如果用户与制造方在询价阶段达成协议,则可确定对所有类型的变压器的冲击试验和对液浸式变压器的局部放电试验在每台变压器上进行。液浸式变压器的局部放电试验的试验程序按 7.3 的规定。

### 7.3 型式试验

液浸式变压器按 GB 1094.1 的规定,干式变压器按 GB 1094.11 的规定。

由于 GB 1094.3 没有关于 72.5 kV 以下的液浸式变压器的局部放电的规定,因此局部放电的试验程序按下列规定:

试验按照 GB/T 7354 的规定。

对被试变压器施加三相电源电压,局部放电测量程序见图 1。

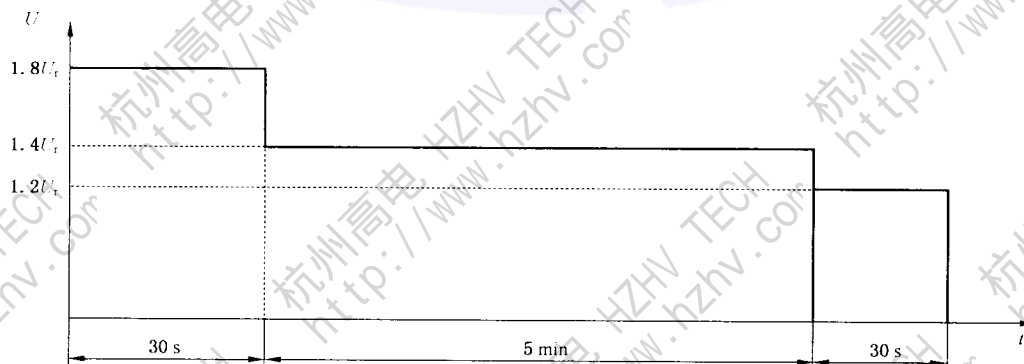


图 1 局部放电测量程序

接受标准:在 $1.2U_r$ 下的局部放电水平不应超过 $50\text{ pC}$ ;在 $1.4U_r$ 下的局部放电水平不应超过 $100\text{ pC}$ 。  
 $U_r$ 为额定电压。

注:如果用户与制造方在询价阶段达成共识,则可以将截波试验作为型式试验的一部分。

## 7.4 特殊试验

### 7.4.1 概述

特殊试验应由用户在询价阶段规定。

### 7.4.2 截波试验

建议用户与制造方在询价阶段达成共识,将扩展后的波尾截断的雷电冲击试验作为特殊试验。

截波的峰值应为规定的全波(BIL)峰值的 $110\%$ 。

试验按 GB 1094.3 的规定。

### 7.4.3 电谐振频率试验

试验方法参见 B.4。

### 7.4.4 气候等级试验

干式变压器按 GB 1094.11 的规定。

### 7.4.5 E3 环境等级试验

变压器应放置在温度和湿度可控的试验室内。

试验室的容积至少为容纳变压器的最小矩形体积的 $5$ 倍。变压器任一部件到墙壁、天花板和喷嘴的间隙应不小于变压器带电部件之间的相间最小间隙(见 GB 1094.3),并且按照 GB 1094.11 的规定不小于 $150\text{ mm}$ 。

试验室的空气温度应确保在变压器上产生凝露。

试验室内的湿度应维持在 $95\%$ 以上。可通过定期或连续地雾化合适的水分来达到。

水分的电导率应在 $3.6\text{ S/m}\sim 4\text{ S/m}$ 的范围内。

机械式雾化器的放置应避免将水直接喷到变压器上。

变压器在无励磁的状态下,至少应在空气相对湿度大于 $95\%$ 的环境中放置 $6\text{ h}$ 。

此后,应在 $5\text{ min}$ 内对变压器进行以下感应电压试验:

- 对于拟接到中性点直接接地系统或经低阻抗接地的系统中的变压器,应在 $1.1$ 倍额定电压下施加 $15\text{ min}$ ;
- 对于拟接到中性点绝缘系统或经高阻抗接地的系统中的变压器,应连续承受三次且每次为 $5\text{ min}$ 的感应电压试验。试验期间,每个高压端子应依次接地,在其他端子与地之间施加 $1.1$ 倍的额定电压。三相试验可以用单相试验来代替,此时应将两个不接地相的端子连接在一起。

优先选择在试验室内进行绝缘试验。

在施加电压期间,应无闪络现象发生,且外观检查应没有严重的放电痕迹。

如果没有 a)项或 b)项试验条件的任何说明信息,则应按 b)项进行试验。

### 7.4.6 燃烧性能试验

干式变压器按 GB 1094.11 的规定。

液浸式变压器用液体按 IEC 61100 的规定。



附录 A  
(资料性附录)

本部分与 IEC 60076-16:2011 的技术性差异及其原因

表 A.1 给出了本部分与 IEC 60076-16:2011 的技术性差异及其原因。

表 A.1 本部分与 IEC 60076-16:2011 的技术性差异及其原因

本部分 章节编号	技术性差异	原因
1	设备最高电压由 IEC 60076-11:2011 中的 36 kV 修改为 40.5 kV。 增加“注：其他电压等级的风力发电用变压器可参考使用本部分。”	适应我国国情
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 1094.1 代替了 IEC 60076-1:2011; b) 用修改采用国际标准的 GB 1094.2 代替了 IEC 60076-2:2011; c) 用修改采用国际标准的 GB 1094.3 代替了 IEC 60076-3:2000; d) 用修改采用国际标准的 GB 1094.5 代替了 IEC 60076-5:2006; e) 用修改采用国际标准的 GB/T 1094.7 代替了 IEC 60076-7:2005; f) 用修改采用国际标准的 GB 1094.11 代替了 IEC 60076-11:2004; g) 用修改采用国际标准的 GB/T 1094.12 代替了 IEC 60076-12:2008; h) 用修改采用国际标准的 GB/T 18494.3 代替了 IEC 61378-3:2006; i) 增加了 GB/T 2900.53 和 GB/T 7354	适应我国国情
4.6	对 IEC 60076-16:2011 中表 1 绝缘水平按我国的实际情况作了修改	适应我国国情
B.2.9	将 IEC 60076-16:2011 的 A.2.9 中式(A.18)由: $T_{I1s} = NLL + [(I_{h1}^2 \times R_1 \times I_1^2) \times (k_1 \times (1 + e_1))] + [(I_{h2}^2 \times R_2 \times I_2^2) \times (k_2 \times (1 + e_2))] + S_1$ 改为: $T_{I1s} = NLL + [(I_{h1}^2 \times R_1 \times I_1^2) \times (1 + k_1 \times e_1 / I_{h1}^2)] + [(I_{h2}^2 \times R_2 \times I_2^2) \times (1 + k_2 \times e_2 / I_{h2}^2)] + S_1$ 并增加对公式中符号的解释和注的内容,具体如下: $I_{h1} \text{—— 谐波下绕组 1 的电流标么值, } I_{h1}^2 = \sum_{k=1}^{h=n} (I_k / I_1)^2;$ $I_{h2} \text{—— 为谐波下绕组 2 的电流标么值, } I_{h2}^2 = \sum_{k=1}^{h=n} (I_k / I_2)^2.$ 注:某些情况下, $I_{h1} \neq I_{h2}$ ”	按实际情况对 IEC 标准的公式进行修正
B.2.12.2.1	将 IEC 60076-16:2011 的 A.2.12.2.1 中公式: $I_1^2 = \sqrt{\sum_{k=1}^{h=n} I_k^2}$ $I_1^2 = 1.0779$ 改为: $I_{h1}^2 = \sum_{k=1}^{h=n} (I_k / I_1)^2$ $I_{h1}^2 = 1.0779$	按实际情况对 IEC 标准的公式进行修正

表 A.1 (续)

本部分 条款编号	技术性差异	原因
B.2.12.3.1	将 IEC 60076-16:2011 的 A.2.12.3.1 中公式： $I_r^2 = \sqrt{\sum_{k=1}^{k=n} I_k^2}$ $I_r^2 = 1.0939$ 改为： $I_{h1}^2 = \sum_{k=1}^{k=n} (I_k / I_1)^2$ $I_{h1}^2 = 1.0939$	按实际情况对 IEC 标准的公式进行修正

附录 B  
(资料性附录)  
计算方法和表格

B.1 自然通风室内变压器的冷却

B.1.1 假设

室内为自然通风冷却时:

$Q_{AF}$  为强迫空气循环的散热量 (kW):

$$Q_{AF} = 0 \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

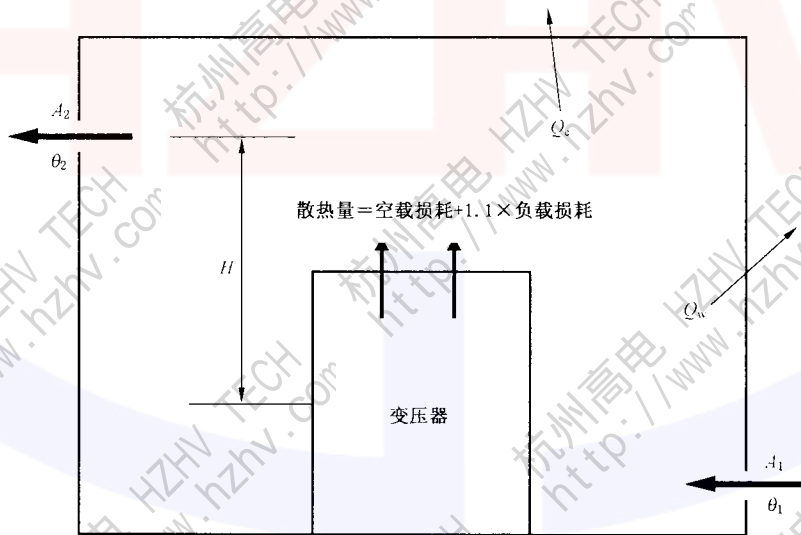
$Q_c$ 、 $Q_w$  分别是通过天花板和墙壁的散热量 (kW):

$$Q_c = Q_w = 0 \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

如果负载电流中含有谐波,则应根据 B.2 考虑,或者变压器降容使用。

通过天花板和墙壁的散热量一般很少。此值取决于墙壁和天花板材料的热传递系数、天花板和墙壁的表面积及室内与室外的温差。

见图 B.1。



说明:

- $A_1$  —— 进风口有效截面积( $m^2$ );
- $A_2$  —— 出风口有效截面积( $m^2$ );
- $\theta_1$ 、 $\theta_2$  —— 进风口和出风口的空气温度( $^{\circ}C$ );
- $H$  —— 出风口表面中点与变压器高度中点间的高度差;
- $Q_c$ 、 $Q_w$  —— 通过天花板和墙壁的散热量(kW)。

图 B.1 自然通风室内的散热

B.1.2 通风量计算数据

对于变压器在室内散热的情况,下面给出了散热量的计算。

$\Delta\theta_a$  为进风口与出风口之间的空气的温升(K):

$$\Delta\theta_a = \theta_2 - \theta_1 \approx 15 \quad \text{..... ( B.3 )}$$

散热量 = 空载损耗 + 1.1 × 负载损耗:

$$HL = NLL + 1.1 \times LL \quad \text{..... ( B.4 )}$$

式中:

HL 变压器在室内的散热量,单位为千瓦(kW);

NLL 变压器的空载损耗,单位为千瓦(kW);

LL 变压器在参考温度下的标称负载损耗,单位为千瓦(kW)。

注:上述 15 K 的值是从制造方试验中得出的经验值。

### B.1.3 输出

变压器产生的热量应发散到室外。下面给出了进风口面积的计算。

$$A_2/A_1 > 1.1(\text{超过 } 10\%) \quad \text{..... ( B.5 )}$$

$Q_{\text{tot}}$  为发散到变压器室内的热量(kW):

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{nac}} + Q_{\text{wc}} + Q_{\text{AF}} \quad \text{..... ( B.6 )}$$

$Q_{\text{nac}}$  为自然空气循环的散热量(kW):

$$Q_{\text{nac}} = 0.1 \times A_1 \times \sqrt{H \times \Delta\theta_a^3} \quad \text{..... ( B.7 )}$$

式中:

$\Delta\theta_a$ ——空气温升,单位为开(K);

$Q_{\text{wc}}$  为通过墙壁和天花板的散热量(kW):

$$Q_{\text{wc}} = Q_w + Q_c = 0 \quad \text{..... ( B.8 )}$$

注:见 B.1.1 假设。

$Q_{\text{AF}}$  为通过强迫空气循环的散热量(kW):

$$Q_{\text{AF}} = 0$$

注:见 B.1.1 假设。

确保房间良好通风的情况下:

$$HL = Q_{\text{nac}} + Q_{\text{wc}} \quad \text{..... ( B.9 )}$$

所需的进风口截面积  $A_1$  是:

$$A_1 = \frac{HL}{0.1 \sqrt{H \times \Delta\theta_a^3}} \quad \text{..... ( B.10 )}$$

出风口的截面积  $A_2$  计算:见式(B.5)。

### B.1.4 1 000 kVA 变压器的计算实例

本例子中不考虑谐波。

NLL = 2.3 kW

LL = 11 kW

变压器室内的散热量 HL 为:

$$HL = NLL + 1.1 \times LL = 2.3 + 1.1 \times 11 = 14.4(\text{kW})$$

$$H = 4.6 \text{ m}$$

最后得出:

$$A_1 = \frac{14.4}{0.1 \times \sqrt{4.6 \times 15^3}} = 1.155$$



进风口的有效截面积应至少为 1.155 m<sup>2</sup>, 以确保在自然通风室内变压器的有效冷却。

出风口截面积 A<sub>2</sub> 的计算:

$$A_2 = 1.1 \times 1.155 = 1.271$$

变压器安装在自然通风室内将导致温升升高, 温升升高值约为进出风口之间温升的一半(参见 IEC 62271-202)。

## B.2 带非正弦波电流负载的变压器的额定容量确定

### B.2.1 变压器负载损耗

变压器损耗由两部分构成:

直接损耗(欧姆损耗) =  $I^2 R$  (W);

附加损耗  $v$  等于涡流损耗加上杂散损耗。

杂散损耗和涡流损耗的定义见 GB/T 13499 和 GB/T 18494.1。区分杂散损耗和涡流损耗的双频测量方法参见 GB/T 18494.3。

### B.2.2 基波涡流损耗( $e_1$ )

由漏磁通通过绕组产生的损耗。

$e_1$  是指定绕组的基波涡流损耗的标么值。

### B.2.3 负载损耗(LI)

参考温度下指定绕组的负载损耗 LI(W):

$$LI = R \times I^2 \times (1 + e_1) \dots\dots\dots (B.11)$$

### B.2.4 杂散损耗( $S_1$ )

由漏磁通通过线夹、盖板、油箱和其他金属部件产生的损耗。

### B.2.5 总负载损耗(TI)

变压器总负载损耗 TI(W) 如下计算:

$$TI = R_1 \times I_1^2 \times (1 + e_1) + R_2 \times I_2^2 \times (1 + e_2) + S_1 \dots\dots\dots (B.12)$$

### B.2.6 谐波

带非正弦波电流负载的变压器损耗取决于电流中各次谐波的频率及其方均根值。

当电流包含谐波含量而非纯正弦波时, 变压器在额定电流下的总损耗会发生改变。

在不考虑电流中的谐波含量的情况下设计的变压器应降容使用。

谐波分量的表现形式是频率为基波频率整数倍的周期波。

谐波分量用谐波次数或者基波的倍数来表示。

例如: 以 50 Hz 为基波, 频率为 250 Hz 的谐波称为 5 次谐波(基波的 5 倍)。

谐波叠加到基波波形上, 使其畸变并改变其幅值。

当非线性负载(例如: 变流器、电子设备)与变压器二次侧相连时会产生谐波电流。

谐波电流引起的问题有: 损耗增加和变压器过热, 存在谐波电流时应更多关注涡流损耗而少些关注杂散损耗。

涡流损耗随频率平方的增加而增加。

由于这些物理原因(损耗增大和产品过热),在设计前应知道谐波频谱或者告知变压器制造方以确定其承受这些谐波的能力。

**B.2.7 谐波电流引起的涡流损耗**

**B.2.7.1 电流方均根值计算:  $I_{rms}$**

非正弦波负载供电时的电流方均根值  $I_{rms}$  (A)为:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=n} I_h^2} \dots\dots\dots (B.13)$$

式中:

$h$  —— 电流谐波次数;

$I_h$  —— 是  $h$  次谐波电流幅值,单位为安(A)。

**B.2.7.2 涡流损耗计算**

在特定谐波下的涡流损耗计算如下:

$$P_h = P_f \times r_h^2 \times h^2 \dots\dots\dots (B.14)$$

式中:

$P_h$  ——  $h$  次谐波的涡流损耗,单位为瓦(W);

$P_f$  —— 在基波频率  $f$  和基波值额定电流  $I_1$  下的涡流损耗,单位为瓦(W);

$r_h$  ——  $h$  次谐波电流幅值与基波电流幅值的比值。

$$r_h = \frac{I_h}{I_1} \dots\dots\dots (B.15)$$

总涡流损耗  $P_{EL}$  (W)由各次谐波的涡流损耗求和得到:

$$P_{EL} = P_f \sum_{h=1}^{h=n} r_h^2 \times h^2 \dots\dots\dots (B.16)$$

**B.2.7.3 杂散损耗**

根据 GB/T 18494.1,在特定的  $h$  次谐波下的杂散损耗按下式变化:

$$SL_{sh} = r_h^2 \times h^{0.8}$$

举例如下:

谐波  $h=5$ ;

幅值 = 25.8%;

$$SL_{5s} = 0.258^2 \times 5^{0.8} = 0.2412。$$

**B.2.8 谐波涡流损耗系数:  $k$  系数**

$k$  系数是由所有谐波电流引起的总涡流损耗与基波电流  $I_1$  引起的涡流损耗的比值。

当变压器带非正弦波电流负载时,涡流损耗以它的基波下涡流损耗的  $k$  倍增加。

$$k = \frac{P_{EL}}{P_f} \dots\dots\dots (B.17)$$

**B.2.9 非正弦波电流下的变压器总损耗  $T_{tIs}$**

$T_{tIs}$  = 空载损耗(NLL) + 非正弦波电流下的总负载损耗(LIs)。

$$T_{t1s} = NLL + [(I_{h1}^2 \times R_1 \times I_1^2) \times (1 + k_1 \times e_1 / I_{h1}^2)] + [(I_{h2}^2 \times R_2 \times I_2^2) \times (1 + k_2 \times e_2 / I_{h2}^2)] + S_1 \dots\dots\dots (3.18)$$

式中：

$I_{h1}$  谐波下绕组 1 的电流标么值， $I_{h1}^2 = \sum_{k=1}^{k=n} (I_k / I_1)^2$ ；

$I_{h2}$  谐波下绕组 2 的电流标么值， $I_{h2}^2 = \sum_{k=1}^{k=n} (I_k / I_2)^2$ 。

注：某些情况下， $I_{h1} \neq I_{h2}$ 。

**B.2.10 非正弦波电流下的液浸式变压器的顶层油温升**

见 GB/T 1094.7 的顶层油温升计算：

$$TO_1 = TO_r \times (T_{t1s} / T_{tl})^{0.8} \dots\dots\dots (3.19)$$

式中：

$TO_1$  非正弦波电流下的顶层油温升；

$TO_r$  额定电流下的顶层油温升；

$T_{t1s}$  非正弦波电流下的变压器总损耗；

$T_{tl}$  基波电流下的变压器总损耗。

**B.2.11 变压器降容**

变压器应大致按如下降容：

$$SrE = Sr \times (T_{tl} / T_{t1s})^{0.5} \dots\dots\dots (3.20)$$

式中：

$SrE$  变压器许用负载；

$Sr$  变压器的标称负载；

$(T_{tl} / T_{t1s})^{0.5}$  变压器的降容系数。

**B.2.12 液浸式变压器和干式变压器的谐波影响的计算示例**

**B.2.12.1 谐波含量等效电流**

本例供设计时参考，用来说明变压器设计对涡流损耗的影响。涡流损耗取决于绕组的设计（尺寸、原材料和阻抗）。

根据 GB/T 18494 系列标准，谐波的幅值用附加系数表示。

表 B.1 和表 B.2 给出了两个示例。表 B.1 对应于液浸式变压器，表 B.2 对应于干式变压器。

在表 B.1 中：方均根值电流比基波电流增加 3.82%，导致涡流损耗以 3.808 的  $k$  系数增加，杂散损耗以 1.308 的系数增加。

在表 B.2 中：方均根值电流比基波电流增加 4.6%，导致涡流损耗以 5.96 的  $k$  系数增加，杂散损耗以 1.41 的系数增加。

B.2.12.2 液浸式变压器举例

B.2.12.2.1 变压器许用负载计算

表 B.1 谐波含量对液浸式变压器损耗的影响

谐波次数 h	幅值 %	$I_h/I_1$	$(I_h/I_1)^2$	涡流损耗 附加系数	杂散损耗 附加系数
1	100	1	1	1.000	1.000 0
5	25.8	0.258	0.066 56	1.664	0.241 2
7	8.3	0.083	0.006 89	0.338	0.032 7
11	5.2	0.052	0.002 70	0.327	0.018 4
13	3.3	0.033	0.001 09	0.184	0.008 5
17	1.5	0.015	0.000 23	0.065	0.002 2
19	1.4	0.014	0.000 20	0.071	0.002 1
23	0.9	0.009	0.000 08	0.043	0.001 0
25	0.8	0.008	0.000 06	0.040	0.000 8
29	0.7	0.007	0.000 05	0.041	0.000 7
31	0.6	0.006	0.000 04	0.035	0.000 6

	$\Sigma$	1.077 9	3.808	1.308
RMS 电流	1.038 2	THD 是总谐波含量(%)		
THD	27.91%			

THD 按照 GB 1094.1 的定义。

$$I_{h1}^2 = \sum_{h=1}^{h=n} (I_h/I_1)^2$$

$$I_{h1}^2 = 1.077 9$$

$$k = \frac{P_{EL}}{P_f} = 3.808$$

以下的计算是按表 B.1 计算的系数完成的。

额定容量=1 000 kVA

空载损耗=1 100 W

75 °C时的负载损耗=10 456 W

频率=50 Hz

顶层油额定温升=60 K

绕组平均温升=65 K

各部分计算如下：

——低压绕组：

- 基波电流下的损耗计算：



- ◆ 75 °C 下  $I^2R$  损耗 = 4 000 W;
- ◆ 涡流损耗 (4%) = 160 W;
- ◆ 75 °C 下总损耗 = 4 000 W + 160 W = 4 160 W;
- ◆ 低压绕组温升 = 18 K;
- ◆ 杂散损耗 = 320 W;
- 非正弦波电流下的损耗计算:
  - ◆  $I^2R$  损耗 = 4 000 W  $\times$  (1.038 2)<sup>2</sup> = 4 312 W;
  - ◆ 涡流损耗 = 160 W  $\times$  3.808 = 609 W;
  - ◆ 低压绕组总损耗 = 4 312 W + 609 W = 4 921 W;
  - ◆ 低压绕组温升计算 = 18 K  $\times$  (4 921/4 160)<sup>0.5 $\times$ 1.5</sup> = 20.6 K;
  - ◆ 运行中的总杂散损耗 = 320 W  $\times$  1.308 = 419 W。

——高压绕组:

- 基波电流下的损耗计算:
  - ◆ 75 °C 下  $I^2R$  损耗 = 5 300 W;
  - ◆ 涡流损耗 (12%) = 636 W;
  - ◆ 75 °C 下总损耗 = 5 300 W + 636 W = 5 936 W;
  - ◆ 高压绕组温升 = 17 K;
  - ◆ 杂散损耗 = 40 W;
- 非正弦波电流下的损耗计算:
  - ◆  $I^2R$  损耗 = 5 300 W  $\times$  (1.038 2)<sup>2</sup> = 5 710 W;
  - ◆ 涡流损耗 = 636 W  $\times$  3.808 = 2 421 W;
  - ◆ 高压绕组总损耗 = 5 710 W + 2 421 W = 8 131 W;
  - ◆ 高压绕组温升计算 = 17 K  $\times$  (8 131/5 936)<sup>0.5 $\times$ 1.5</sup> = 21.9 K;
  - ◆ 运行中的总杂散损耗 = 40 W  $\times$  1.308 = 52 W。

——基波电流下的变压器总损耗(Ttl):

- Ttl = 空载损耗(NLI) + 总负载损耗(LI);
- Ttl = (1 100 + 4 000 + 160 + 320 + 5 300 + 636 + 40) W = 11 556 W。

——非正弦波电流下的变压器总损耗 Ttls:

- Ttls = (1 100 + 4 312 + 609 + 419 + 5 710 + 2 421 + 52) W = 14 623 W。

——非正弦波电流下的顶层油温升标么值:

- $TO_1/TO_0 = (14 623/11 556)^{0.8} = 1.21$  (高 21%)。

变压器的降容大致如下:

变压器许用负载 = 额定容量  $\times$  (11 556/14 623)<sup>0.5</sup>。

变压器许用负载 = 额定容量  $\times$  0.89。

变压器的降容大约为 11%。

### B.2.12.2.2 结论

举例中的 1 000 kVA 变压器不适合用于所描述的运行环境,且:

——变压器的设计应降低绕组温度和顶层油温升;或者

——用户必须选择额定容量更高的变压器(如:1 000/0.89 kVA);或者

——变压器额定容量不足以承担负载,用户应以 0.89 的系数降低变压器负载。

注:如果已知高压绕组和低压绕组的(欧姆和涡流)损耗,则所考虑绕组的特定损耗认为是根据绕组热点来降容后的准确值。

## B.2.12.3 干式变压器例子

## B.2.12.3.1 变压器许用负载的计算

表 B.2 谐波含量对干式变压器损耗的影响

谐波次数 h	幅值 %	$I_h/I_1$	$(I_h/I_1)^2$	涡流损耗 附加系数	杂散损耗 附加系数
1	100	1	1	1.000	1.000 0
5	26.2	0.262	0.068 64	1.716	0.248 8
7	11.0	0.110	0.012 10	0.593	0.057 4
11	8.1	0.081	0.006 56	0.794	0.044 7
13	5.8	0.058	0.003 36	0.569	0.026 2
17	4.2	0.042	0.001 76	0.510	0.017 0
19	2.6	0.026	0.000 68	0.244	0.007 1
23	1.9	0.019	0.000 36	0.191	0.004 4
25	1.6	0.016	0.000 26	0.160	0.003 4
29	1.2	0.012	0.000 14	0.121	0.002 1
31	0.8	0.008	0.000 06	0.062	0.001 0
		$\Sigma$	1.093 9	5.960	1.412
RMS 电流		1.046	THD 是总谐波含量(%)		
THD		30.65%			

THD 按照 GB 1094.1 的规定。

等效电流的计算：

$$I_{h1}^2 = \sum_{h=1}^{h=n} (I_h/I_1)^2$$

$$I_{h1}^2 = 1.093 9$$

$$k = \frac{P_{EL}}{P_f} = 1.412$$

以下的计算是按表 B.2 计算的系数完成的。

$k$  系数 = 5.960

额定容量 = 1 000 kVA

空载损耗 = 2 300 W

120 °C 下的负载损耗 = 11 000 W

频率 = 50 Hz

绕组平均温升 = 100 K

各部分计算如下：

——低压绕组：

- 基波电流下的损耗计算：

- ◆  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下  $I^2R$  损耗=4 100 W;
- ◆ 涡流损耗(2.9%)=120 W;
- ◆  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下总损耗=4 100 W+120 W=4 220 W;
- ◆ 低压绕组温升=100 K;
- ◆ 杂散损耗=320 W;
- 非正弦波电流下的损耗计算:
  - ◆  $I^2R$  损耗=4 100 W $\times(1.046)^2=4\ 485\text{ W}$ ;
  - ◆ 涡流损耗=120 W $\times 5.960=715\text{ W}$ ;
  - ◆ 低压绕组总损耗=4 485 W+715 W=5 200 W;
  - ◆ 低压绕组温升计算=100 K $\times(5\ 200/4\ 220)^{0.5\times 1.6}=118.1\text{ K}$ ;
  - ◆ 运行中的总杂散损耗=320 W $\times 1.412=452\text{ W}$ 。

高压绕组:

- 基波电流下的损耗计算:
  - ◆  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下  $I^2R$  损耗=6 000 W;
  - ◆ 涡流损耗(7.5%)=450 W;
  - ◆  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下总损耗=6 000 W+450 W=6 450 W;
  - ◆ 高压绕组温升=100 K;
- 非正弦波电流下的损耗计算:
  - ◆  $I^2R$  损耗=6 000 W $\times(1.046)^2=6\ 563\text{ W}$ ;
  - ◆ 涡流损耗=450 W $\times 5.960=2\ 682\text{ W}$ ;
  - ◆ 高压绕组总损耗=6 563 W+2 682 W=9 245 W;
  - ◆ 高压绕组温升计算=100 K $\times(9\ 245/6\ 450)^{0.5\times 1.6}=133.4\text{ K}$ 。

——基波电流下的变压器总损耗(Ttl):

- Ttl=空载损耗(NL1)+总负载损耗(LI);
- Ttl=(2 300+4 100+120+320+6 000+450) W=13 290 W。

——非正弦波电流下的变压器总损耗 Ttl<sub>s</sub>:

- Ttl<sub>s</sub>=(2 300+4 485+715+452+6 563+2 682) W=17 197 W。

变压器的降容大致如下:

变压器许用负载=额定容量 $\times(13\ 290/17\ 197)^{0.5}$ 。

变压器许用负载=额定容量 $\times 0.88$ 。

变压器的降容大约为 12%。

### B.2.12.3.2 结论

举例中的 1 000 kVA 变压器不适合用于所描述的运行环境,且:

- 变压器的设计应降低绕组温度;或者
- 用户必须选择额定容量更高的变压器(如:1 000/0.88 kVA);或者
- 变压器额定容量不足以承担负载,用户应以 0.88 的系数降低变压器负载。

### B.3 电压谐波的影响

电压波形畸变导致以下参数增大:

- 磁通密度;
- 空载损耗;

- 空载电流；
- 噪声水平；
- 铁心温度。

表 B.3 中给出了电压谐波次数示例。

$B_h$  ——  $h$  次谐波对应的磁通密度(T)；

$B_n$  —— 标称电压下的磁通密度(T)；

$U_h$  —— 谐波电压(V)；

$U_1$  —— 基波电压(V)。

表 B.3 电压谐波次数示例

谐波次数 h	幅值 %	$U_h/U_1$	$(U_h/U_1)^2$	$B_h/B_n$	$(B_h/B_n)^2$
1	100	1	1	1	1
2	4	0.040	0.001 60	0.02	0.000 4
3	16	0.160	0.025 60	0.053 333	0.002 844 44
4	6	0.060	0.003 60	0.015	0.000 225
5	20	0.200	0.040 00	0.04	0.001 6
6	2	0.020	0.000 40	0.003 333	$1.111 1 \times 10^{-5}$
7	11	0.110	0.012 10	0.015 714	0.000 246 94
8	2	0.020	0.000 40	0.002 5	0.000 006 25
9	5.8	0.058	0.003 36	0.006 444	$4.153 1 \times 10^{-5}$
10	4.2	0.042	0.001 76	0.004 2	0.000 017 64
11	2.6	0.026	0.000 68	0.002 364	$5.586 8 \times 10^{-6}$
13	1.9	0.019	0.000 36	0.001 462	$2.136 1 \times 10^{-6}$
15	1.6	0.016	0.000 26	0.001 067	$1.137 8 \times 10^{-6}$
29	1.2	0.012	0.000 14	0.000 414	$1.712 2 \times 10^{-7}$
31	0.8	0.008	0.000 06	0.000 258	$6.659 7 \times 10^{-8}$

	$\Sigma$	1.090 3		1.005 402 014
电压 RMS	1.044			
电压总谐波分量 THD	30.05%			
磁密 RMS	1.003			
磁密总谐波含量 THD	7.35%			

THD 按照 GB 1094.1 的规定。

电压方均根值是  $(U_h/U_1)^2$  之和的平方根。

磁通密度方均根值是  $(B_h/B_n)^2$  之和的平方根。

当磁通密度总谐波分量比电压总谐波分量小得多时,如此高的电压总谐波分量的后果并不严重(电压总谐波分量 THD 小于 5% 在实际上可认为是正弦波)。

磁通密度是电压的时间积分,所以每一个谐波的磁通密度分量与谐波次数成反向变化。由于磁通的方均根值的增量接近于零,因此无需对空载损耗的测量值按照电压谐波进行修正。



在非正弦波电压下,以下参数与变压器的设计有关:

- 空载电流(尤其是当出现直流分量时);
- 噪声水平(尤其是出现直流分量和二次谐波时);
- 铁心温度(尤其是出现直流分量和二次谐波时)。

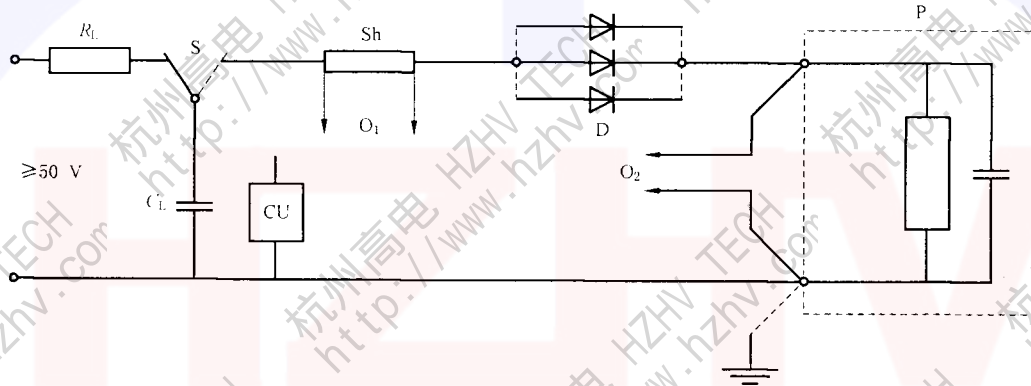
注:谐波磁通密度分量只增加空载损耗中的涡流部分。对于带取向的铁心材料,这部分大约占总空载损耗的50%。第二部分磁滞损耗部分大约占50%,理论上只受磁滞回线面积的增加和达到的磁通密度峰值所影响,实际上这两者均不受(谐波的磁通密度分量)影响。

## B.4 电谐振频率测量

### B.4.1 测量方法

采用电容电流注入原理进行测量,以测定范围从50 Hz~100 kHz的变压器绕组的固有谐振频率。这个方法在IEC 62271-100:2008的附录F中有描述。在测量期间,其他绕组应短路。

IEC 62271-100中电流注入设备见图B.2。



说明:

- $R_L$  —— 充电电阻;
- S —— 转换继电器;
- $C_L$  —— 电源电容;
- Sh —— 电流分流器;
- $O_1$  —— 阴极射线示波器通道 1, 记录电流幅值和线性并检查二极管运行状态;
- $O_2$  —— 阴极射线示波器通道 2, 记录电路的响应;
- D —— 多达 100 只快速硅开关二极管的并联连接组;
- P —— 设想中的用于 TRV 的测量回路;
- CU —— 提供动作顺序的控制单元。

图 B.2 工频电流注入装置原理图

### B.4.2 变压器绕组谐振频率测量

测量原理是通过变压器绕组中的电容放电来分析可见的绕组电压响应。

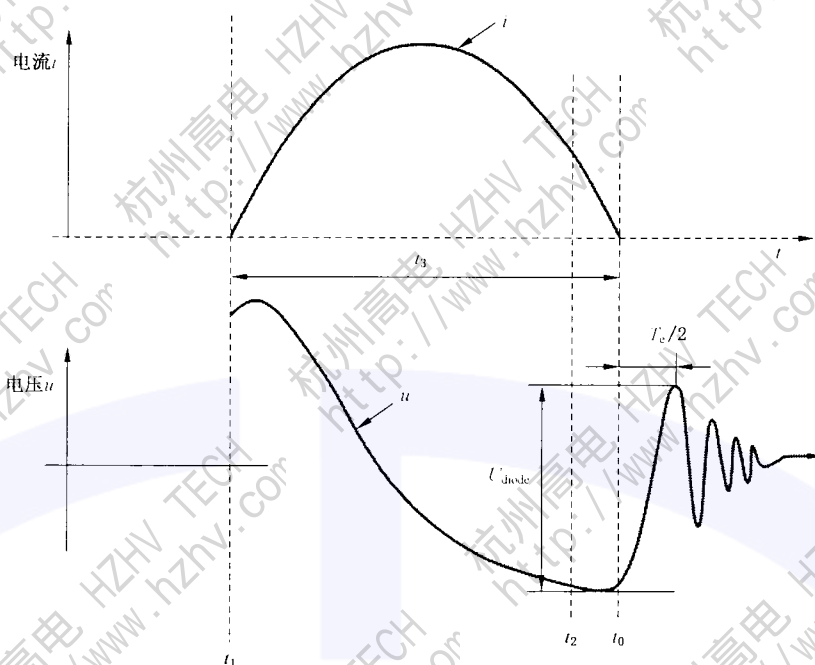
由于没有供电,所以电容放电是阻尼振荡。

振荡的频率就是变压器的谐振频率。

图 B.3 显示了合上转换继电器 S 后电流过 0 点时的电流  $i$  和电压  $u$  的波形。

出现暂态恢复电压 TRV, 阻尼振荡见图示。

TRV 的前半个周期  $T_r/2$  给出了被切换的变压器绕组的谐振频率。



说明：

$t_0$  —— 电流过零的时刻 (TRV 振荡开始)；

$t_1$  —— 继电器 S 的切换瞬间；

$t_2$  —— 阴极射线示波器触发；

$t_3$  —— 电流通过二极管 D 的持续时间；

$u$  —— 回路 P 两端的电压曲线；

$i$  —— 注入电流的波形；

$U_{\text{diode}}$  —— 二极管两端的最大电压差；

$T_e/2$  —— TRV 半周时间。

图 B.3 利用电容注入方法切换变压器绕组的电压响应

#### B.4.3 注入测量法的实际应用

##### B.4.3.1 注入试验图

对于三相变压器，本试验采用单相供电的方式进行。

以下是测量 A 相的图示。

低压端子 (a、b、c) 短路，低压中性点悬空，在变压器 A、B 相间注入电流 (B、C 端子短接)，如图 B.4 给出的方法。

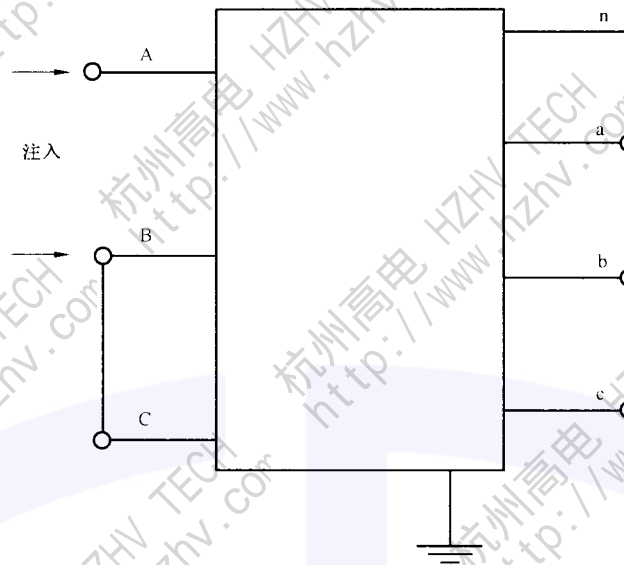
保持三个低压端子短路，应进行三种不同的高压注入：

—— 当在运行期间低压中性点接地时，试验时高压 B 相和 C 相相连，低压中性点连接到变压器的接地端，得出 A 相的值。

—— 高压 B 相和 C 相相连且接地，低压中性点连接到变压器的接地端。这种情况可用于观察当高压系统接地故障时的差异，得出 A 相的值。

—— 当在运行期间低压中性点不接地时，试验时高压 B 相和 C 相相连，低压中性点不连接，图 B.4 显示了这种测量方式，得出 A 相的值。

对于其他相的测量，应通过轮流交换相序来进行。



说明:

- A、B、C——高压端子；
- a、b、c——低压端子；
- n——中性点端子。

图 B.4 高压注入试验图

B.4.3.2 测量系统示例

图 B.5 显示了一个具有如下设备的实用测量系统：

- 供电电池、电容、驱动二极管、拟通过套管测试的变压器绕组；
- S1 和 S2, 电流和电压测量和波形显示设备。

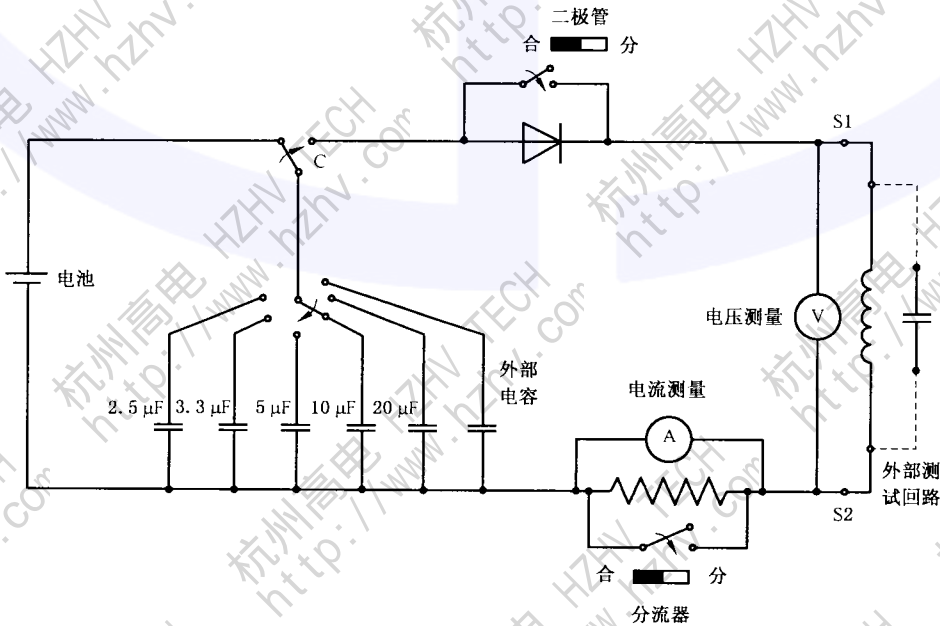


图 B.5 测量设备实例

推荐如下：

- 抽头 C 要求不反弹；
- 可以使用恢复时间更短的二极管且并联安装；
- 电压测量设备(示波器)通过电池或者隔离变压器进行供电。

## B.5 符号列表

符号见表 B.4。

表 B.4 符号列表

符号	含义	单位
$\theta_1$	进风口空气温度	°C
$\theta_2$	出风口空气温度	°C
$\Delta\theta_a$	进风口与出风口之间的空气的温升	K
$v$	附加损耗	W
$A_1$	进风口有效截面积	m <sup>2</sup>
$A_2$	出风口有效截面积	m <sup>2</sup>
AF	空气强迫冷却	—
$B_h$	$h$ 次谐波对应的磁通密度	T
$B_n$	标称电压下的磁通密度	T
E2、E3	环境等级	—
$e_1$	指定绕组的基波涡流损耗标么值	—
$f$	频率	Hz
$h$	电流谐波次数	—
$H$	出风口表面中点与变压器高度中点的高度差	m
HL	变压器在室内的散热量	kW
$I$	指定绕组的负载电流(见 B.2)	A
$I_{\text{rms}}$	电流方均根值	A
$I_1$	基波电流	A
$I_h$	$h$ 次谐波电流幅值	A
$I_r$	额定电流	A
$I_{h1}$	非正弦负载供电时绕组 1 的电流标么值	—
$I_{h2}$	非正弦负载供电时绕组 2 的电流标么值	—
系数 $k$	由所有谐波电流引起的总涡流损耗与基波涡流损耗的比值	—
LL	变压器在参考温度下的标称负载损耗	kW
Ll	参考温度下指定绕组的负载损耗	W
Lls	非正弦波电流下的变压器总负载损耗	W
NLL	变压器空载损耗	kW
$P_{\text{EL}}$	谐波的总涡流损耗	W
$P_f$	额定电流下基波的涡流损耗	W
$P_h$	$h$ 次谐波的涡流损耗	W
$Q_{\text{AF}}$	强迫空气循环的散热量	kW



表 B.4 (续)

符号	含义	单位
$Q_c, Q_w$	通过天花板和通过墙壁的散热量	kW
$Q_{nac}$	自然空气循环的散热量	kW
$Q_{tot}$	发散到变压器室内的热量	kW
$Q_{wc}$	通过墙壁和天花板的散热量的和	kW
$R, R_1, R_2$	绕组电阻	$\Omega$
$r_h$	$h$ 次谐波电流与基波电流幅值的比值	—
$S_i$	杂散损耗	W
$SL_{ih}$	在特定的 $h$ 次谐波下的杂散损耗	
$S_r$	变压器的标称负载	kVA
$S_rE$	变压器可用负载	kVA
THD	总谐波含量	%
Tl	变压器总负载损耗	W
$TO_1$	非正弦波电流下的顶层油温升	K
$TO_2$	额定电流下的顶层油温升	K
Ttl	基波电流下的变压器总损耗	W
TtIs	非正弦波电流下的变压器总损耗	W
$U_m$	设备最高电压	kV
$U_r$	额定电压	kV
$U_1$	基波电压	V
$U_h$	$h$ 次谐波电压	V

附 录 C  
(资料性附录)

## IEC 60076-16:2011 的绝缘水平

IEC 60076-16:2011 的绝缘水平见表 C.1。

表 C.1 IEC 60076-16:2011 的绝缘水平

设备最高电压 $U_m$ (方均根值) kV	额定短时外施工频耐受电压 (方均根值) kV	额定雷电冲击耐受电压 (峰值) kV	
		列 2	列 3
≤1.1	3	—	20
3.6	10	40	50
7.2	20	60	75
12	28	75	95
17.5	38	95	125
24	50	125	150
36	70	170	200

参 考 文 献

- [1] GB 311.1—2012 绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则(IEC 60071-1:2006,MOD)
- [2] GB/T 311.2—2002 绝缘配合 第2部分:高压输变电设备的绝缘配合使用导则(IEC 60071-2:1996,MOD)
- [3] GB/T 4109—2008 交流电压高于1 000 V的绝缘套管(IEC 60137,MOD)
- [4] GB 17467—2010 高压/低压预装式变电站(IEC 62271-202:2006,MOD)
- [5] IEC 60815(all parts) Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions
- [6] IEC 62271-100:2008 High-voltage switchgear and controlgear—Part 100:Alternating-current circuit-breakers

中华人民共和国  
国家标准

电力变压器

第 16 部分：风力发电用变压器

GB 1094.16—2013

\*

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(00013)  
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)6852394

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷  
各地新华书店经销

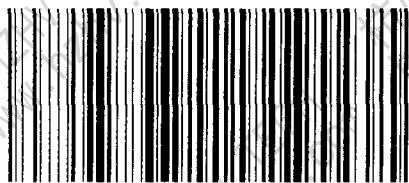
\*

开本 880×1230 1/16 印张 2.25 字数 54 千字  
2014 年 3 月第一版 2014 年 3 月第一次印刷

\*

书号: 155066·1-48376 定价 33.00 元

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



GB 1094.16-2013

打印日期: 2014年4月9日 F009A