



中华人民共和国电力行业标准

DL/T 2043 — 2019

±1100kV 特高压直流换流变压器 使用技术条件

Technical specification for ±1100kV UHVDC converter transformers

行业标准信息平台

2019-06-04 发布

2019-10-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 2

5 使用条件 2

6 额定值和性能要求 4

7 基本参数 6

8 组件、部件、绝缘油等的要求 8

9 其他要求 13

10 试验 14

附录 A（资料性附录）换流变压器的额定值与技术参数..... 25

行业标准信息服务平台

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009《标准化工作导则第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业高压直流输电技术标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：国网经济技术研究院有限公司。

本标准主要起草人：赵峥、乐波、贺立、陈东、马为民、梅念、薛英林、李探、陈钊、厉璇、付颖、祝全乐、王涛、徐忠力。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心(北京市宣武区白广路二条一号，100761)。

行业标准信息平台

±1100kV特高压直流换流变压器使用技术条件

1 范围

本标准规定了±1100kV级特高压直流输电系统用换流变压器的使用条件、额定值和性能要求、基本参数、组部件要求、其他要求和试验的技术条件。

本标准适用于双12脉动换流器串联的±1100kV级直流输电系统用单相双绕组换流变压器。

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 1094.2 电力变压器 第2部分：液浸式变压器的温升

GB/T 1094.3-2017 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/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

GB 1094.5 电力变压器 第5部分：承受短路的能力

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 1094.10 电力变压器 第10部分：声级测定

GB 2536 电工流体 变压器和开关用的未使用过的矿物绝缘油

GB/T 2900.33 电工术语 电力电子技术

GB/T 4109 交流电压高于1000V的绝缘套管

GB/T 5273 高压电器端子尺寸标准化

GB/T 7354 局部放电测量

GB 10230.1 分接开关 第1部分：性能要求和试验方法

GB/T 13498 高电压直流输电术语

GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求

GB 50150 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准

DL/T 596 电力设备预防性试验规程

IEC 60815 污染条件下用高压绝缘子的选择和定尺寸 (Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions)

IEC 60943 电气设备组件特别是接线端子容许温升导则 (Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals)

IEC 61378-2 变流变压器 第2部分：高压直流输电用换流变压器 (Converter transformers- Part 2: Transformers for HVDC applications)

IEC 65700 直流系统用套管 (Bushings for DC application)

3 术语和定义

GB/T 2900.33和GB/T 13498界定的术语和定义适用于本标准。

4 符号

下列符号适用于本文件。

f_1 : 额定频率，亦即基波频率

f_x : 用于确定涡流损耗分布的频率

f_h : h 次谐波的频率

F_{SE} : 结构件中杂散损耗附加系数

F_{WE} : 绕组涡流损耗附加系数

h : 谐波次数

I_1 : 额定电流

I_x : 频率 f_x 下的负载损耗试验电流

I_{LN} : 所考虑绕组运行时的负载电流方均根值

I_h : h 次谐波的电流

I_{eq} : 与绕组在运行中负载损耗等效的正弦电流方均根值

$I_1^2 R$: 额定电流下的电阻损耗

k_h : 电流 I_h 与额定电流 I_1 的比值

N : 从直流线路的中性点至与变压器相连的整流桥间所串接的六脉动桥数量

P_1 : 基波频率(50Hz)下的总负载损耗

P_N : 总运行负载损耗

P_x : 频率 f_x 下测得的负载损耗

P_{SE1} : 基波频率下结构件(不包括绕组)中的杂散损耗

P_{WE1} : 基波频率下的绕组涡流损耗

R : 包括内部引线在内的绕组直流电阻

S_R : 额定容量

U_1 : 额定电压

U_{ac} : 阀侧绕组的外施交流试验电压(方均根值)

U_{dm} : 每个阀桥的最高直流电压

U_{dc} : 阀侧绕组的外施直流试验电压

U_m : 网侧绕组的最高系统电压

U_{pr} : 阀侧绕组的极性反转试验电压(直流电压)

U_{vm} : 换流变压器阀侧绕组的最大相间交流工作电压

注: “阀侧”和“网侧”表明了换流变压器绕组的外部接线。网侧绕组是指接到交流电网的绕组,而阀侧绕组则指接到换流阀或变流器的绕组。

5 使用条件

5.1 一般规定

本标准中的换流变压器应符合GB 1094.1中所规定的使用条件,但其中明显不适用于换流变压器或本标准中另有规定时除外。若无其它说明,均假设换流变压器是在近似对称的三相系统中运行的。

5.2 海拔

海拔不应超过1000m,超过时应按照GB 1094.1中的相关要求修正。

5.3 环境温度

变压器的环境温度应符合下列规定:

- 最高气温: +40℃;
- 最热月平均温度: +30℃;
- 最高年平均温度: +20℃;
- 最低气温: -45℃(适用于户外式换流变压器)。

5.4 覆冰厚度

变压器应能在离地面高10m处，50年一遇的覆冰厚度条件下使用。

5.5 风速

变压器应能在离地面高10m处，维持10min的平均风速条件下使用。

5.6 日照强度

变压器应能在风速为0.5m/s时的日照强度条件下使用。

5.7 安装环境

变压器的安装环境应满足下列条件：

- a) 污秽等级：d级及以下；
- b) 地震引发的地面加速度：水平方向低于 3m/s^2 ；垂直方向低于 2m/s^2 。

5.8 系统条件

系统条件应符合下列规定：

- a) 网侧电源电压的波形近似于正弦波。同时，畸变波形中的总谐波含量不大于5%，偶次谐波含量不大于1%。
- b) 系统条件推荐值见附录A。

5.9 特殊使用条件

5.9.1 除应满足规定的正常使用条件之外的特殊使用条件，应在询价和订货时说明（见GB 1094.1）。

5.9.2 特殊使用条件下，换流变压器的额定值和试验规则规定如下：

- a) 在较高环境温度或高海拔环境下的温升应参考GB 1094.2的相应规定；
- b) 在高海拔环境下的外绝缘应参考GB/T 1094.3的相应规定。

5.10 负载电流

流过换流变压器的电流含有基波、谐波和直流偏磁电流。换流变压器应能在所提供的谐波成份及直流偏磁电流大小的条件下使用。

5.11 功率流向

除另有规定，换流变压器应设计成既能作整流运行用又能作逆变运行用的结构。

6 额定值和性能要求

6.1 一般要求

换流变压器的额定参数用额定基波频率下的电流和电压的稳态正弦量来表示。保证的损耗、阻抗和声级均应与额定参数值相对应。

6.2 额定电压

额定电压是相间电压基波分量的方均根值。

6.3 额定电流

额定电流是线电流基波分量的方均根值。

6.4 额定频率

额定频率是换流变压器设计所依据的50Hz的基波频率。

6.5 额定容量

额定容量是额定电压与额定电流的乘积，三相额定容量如式（1）所示：

$$S_R = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1 \quad (1)$$

6.6 绝缘水平

6.6.1 网侧绕组

绕组线端和中性点的绝缘应按照GB/T 1094.3的规定，确定下列绝缘水平：

- 换流变压器绕组的设备最高电压， U_m ；
- 额定雷电和操作冲击耐受电压（相对地）；
- 短时工频耐受电压；
- 与中性点绝缘水平相应的外施交流试验电压；
- 带有局部放电测量的感应电压耐受水平：应根据网侧绕组的设备最高电压 U_m ，参考GB/T 1094.3确定试验程序和电压耐受水平。

6.6.2 阀侧绕组

应参照本标准附录A确定雷电和操作冲击水平。

6.6.3 雷电冲击电压耐受水平

应规定阀侧绕组每个端子对地及绕组两端之间的雷电冲击电压耐受水平。

6.6.4 操作冲击电压耐受水平

应规定阀侧绕组每个端子对地的操作冲击电压耐受水平。

6.6.5 外施直流电压耐受水平

试验电压应为正极性，并应同时施加于阀侧绕组的两端子上。试验电压应由式（2）计算：

$$U_{dc} = 1.5((N - 0.5)U_{dm} + 0.7U_{vm}) \quad (2)$$

6.6.6 极性反转电压耐受水平

试验电压应同时施加于阀侧绕组的两端子上。试验电压由式（3）计算：

$$U_{pr} = 1.25((N - 0.5)U_{dm} + 0.35U_{vm}) \quad (3)$$

6.6.7 外施交流电压耐受水平

试验电压应同时施加于阀侧绕组的两端子上。试验电压由式（4）计算（方均根值）：

$$U_{ac} = \frac{1.5((N - 0.5)U_{dm} + \sqrt{2}U_{vm} / \sqrt{3})}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

6.7 无线电干扰水平

在1.1倍最高运行电压时的无线电干扰电压不大于500 μV ，并在晴天夜晚无可见电晕。

6.8 噪声水平

6.8.1 换流变压器的噪声水平应满足下列一般要求:

- a) 在确定噪声水平时应注意换流变压器在现场负载条件下的声功率级和空载试验时所产生的声功率级的差异;
- b) 用户应与制造单位共同协商声级测定的方法以模拟换流变压器运行中的实际电流。

6.8.2 保证的声功率级或声压水平应符合下列规定:

- a) 在订货时, 应明确保证的声压水平(声压级或声强级)和相应的声功率级;
- b) 由于此声功率级与现场负载条件下所获得的值不同, 用户在定合同前, 一般规定在制造单位空载条件下获得的换流变压器的最大声功率级, 或者由用户与制造单位共同协商此声功率级。

注: 声功率级以正弦空载励磁或正弦负载电流励磁为基准。

6.8.3 现场的声功率级应符合下列规定:

- a) 制造单位测得的换流变压器声级与在现场测得的声级之间差值可能在 10dB(A) 到 20dB(A) 之间;
- b) 用户也可与制造单位共同协商确定声功率级或声级水平(声压级)。
- c) 换流变压器在额定直流电流和用户给定谐波电流下的声级水平(声压级)不应大于 80 dB(A)。

6.9 损耗

6.9.1 一般要求

换流变压器的总损耗应该等于额定运行条件下的空载损耗与负载损耗之和, 这些损耗值应在具体工程规定的偏差范围之内。

6.9.2 空载损耗

换流变压器空载损耗和空载电流的测量, 按GB 1094.1的规定进行。

6.9.3 额定工频条件下的负载损耗

负载损耗按GB 1094.1与本标准的规定进行测量。

6.9.4 运行条件下的负载损耗

6.9.4.1 换流变压器运行条件下的负载损耗应符合下列规定:

- a) 制造单位应根据给定的负载电流的谐波频谱来计算实际运行中的总负载损耗值;
- b) 谐波频谱应由用户提供;
- c) 计算应分别就主分接和极限分接进行;
- d) 此计算出的损耗值可以作为损耗评估的保证基准值;
- e) 根据 IEC 61378-2 等标准:
 - 1) 假设涡流损耗和杂散损耗与电流的平方成正比;
 - 2) 假设绕组涡流损耗与频率的 2 次方成正比, 结构件中的杂散损耗与频率的 0.8 次方成正比。

6.9.4.2 涡流损耗和杂散损耗与电流和频率的关系如式(5)所示:

$$\Delta P \propto I^2 \times f^k \quad (5)$$

式中: $k = \begin{cases} 2, & \text{对于绕组涡流损耗;} \\ 0.8, & \text{对于杂散损耗。} \end{cases}$

6.9.4.3 根据给定的谐波频谱, 运行中的总负载损耗由式(6)计算:

$$P_N = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \times F_{WE} + P_{SE1} \times F_{SE} \quad (6)$$

式中:

$$I_{LN} = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} I_h^2}$$

(25 是计算的最高谐波次数)

$$F_{WE} = \sum_{h=1}^{25} k_h^2 \times h^2$$

$$F_{SE} = \sum_{h=1}^{25} k_h^2 \times h^{0.8}$$

且 $k_h = \frac{I_h}{I_1}$, $h = \frac{f_h}{f_1}$

6.9.5 热点温度确定

热点温度的确定方法宜按温度场来计算。对于负载电流中给定的谐波频谱, 应计算其涡流损耗附加系数以补偿使用GB/T 1094.7的计算方法确定的热点温升可能与正常运行时得到的不同值。

7 基本参数

7.1 型式

应为单相、双绕组、有载调压、油浸式。

7.2 使用地点

应为户外。

7.3 冷却方式

应为强迫导向油循环风冷(ODAF)或强迫油循环风冷(OFAF)。

7.4 额定频率

应为50Hz。

7.5 额定容量

应按具体工程确定。

7.6 额定电压

应按具体工程确定。

7.7 额定电压比

应按具体工程确定。

7.8 调压方式

调压方式采用有载调压, 调压位置放置在网侧中性点。

7.9 中性点接地方式

网侧中性点直接接地, 阀侧中性点不接地。

7.10 联结组标号

应为Ii0(三相组: YNyn0或YNd11)。

7.11 负载能力

- 7.11.1 换流变压器的负载能力应符合 GB/T 1094.7 的要求，制造单位应提供该变压器负载能力计算所需的热特性参数。
- 7.11.2 换流变压器的负载能力应满足具体工程的要求。

7.12 耐受短路能力

- 7.12.1 当换流变压器任意端发生出口短路时，能保持动、热稳定而无损坏。
- 7.12.2 制造单位的换流变压器应满足 GB 1094.5 要求，同时应提供短路时绕组动、热稳定的计算结果及计算报告，热稳定的短路持续时间不应少于 2s。

7.13 短路阻抗

U_k 取值范围为20%~23%，由具体工程确定。

7.14 短路阻抗偏差

- 7.14.1 对分接范围不超过 30%的换流变压器，主分接下的阻抗允许偏差为 $\pm 3.75\%$ 。主分接下的阻抗值应予保证。其它分接位置下的阻抗值也应该保证符合用户与制造单位间的协议或符合表 1 的规定。

表1 短路阻抗偏差表

主 分 接	其余分接
$\pm 3.75\%$	$\pm 5\%$

- 7.14.2 对分接范围超过 30%的换流变压器，其分接范围内的阻抗偏差应由用户与制造单位在签订合同之前进行协商。
- 7.14.3 对设计成用于同一目的或能互换的相同或相似的换流变压器，各台变压器在整个分接范围内的阻抗变化，均应不超过其平均实测值的 $\pm 2\%$ 。

7.15 温升限值

换流变压器的温升应满足下列要求：

- a) 顶部油温升：45K；
- b) 绕组平均温升：53K；
- c) 绕组热点温升：66K；
- d) 油箱及结构件温升：75K；
- e) 短时过负荷绕组热点温度：120℃。

注：上述数值为工厂试验温升限值，已考虑工厂试验条件和现场运行条件的差异。

7.16 直流偏磁电流

按具体工程确定，但每台不应小于10A/相。

7.17 绕组额定绝缘水平

换流变压器绕组额定绝缘水平由具体工程确定，典型值参见附录A。

8 组件、部件、绝缘油等的要求

8.1 套管

8.1.1 型式

换流变压器的型式应满足下列要求:

- a) 若网侧套管使用油浸式套管,应加装易于从地面检查油位的油位指示器;阀侧套管使用干式套管,如充 SF₆,应加装压力表;
- b) 瓷套管的颜色应为棕色,非瓷套管的颜色应为灰色;
- c) 在实际工程中,套管的具体结构依据工程确定。

8.1.2 额定绝缘水平

换流变压器套管的额定绝缘水平应符合下列规定:

- a) 换流变压器网侧套管额定绝缘水平应按 GB/T 4109 的规定。
- b) 换流变压器阀侧套管绝缘水平应比换流变压器阀侧绕组绝缘水平均提高不等的系数(中性点套管除外)。其中,直流电压:1.15;直流极性反转:1.15;外施交流电压:1.10;雷电冲击:1.10;操作冲击:1.10。
- c) 高端换流变压器阀侧套管不开展工频 1min 短时耐受试验,使用外施交流长时耐受试验代替。

8.1.3 套管爬电比距

换流变压器的套管爬电比距应符合下列规定:

- a) 网侧线端、中性点套管的最小爬电比距均应不小于 25 mm/kV;
- b) 计算爬距时,应进行直径系数的校正;
- c) 套管应满足爬电系数(即:爬电距离/干弧距离)不大于 4.0;
- d) 阀侧套管最小爬电比距应不小于 14mm/kV;
- e) 爬电系数、外形系数、直径系数以及表示伞裙形状的参数,均应符合 IEC 60815 的规定。

8.1.4 套管端子

换流变压器的套管端子应满足下列要求:

- a) 套管端子型式和尺寸应满足 GB/T 5273 标准中的有关规定,且有可靠的防锈层;
- b) 端子板应能承受附录 A 中对应的受力要求,端子板的接触面应镀银;
- c) 套管端子允许载荷(连续作业)按具体工程实际设计确定,典型值参见附录 A;
- d) 在具体工程规定的最高环境温度下,换流变压器绕组端子的温度不应超过 IEC 60943 的有关规定;
- e) 网侧套管端部均压出线端子应按防电晕要求进行设计。

8.1.5 试验

套管的试验和其它的性能要求应符合 GB/T 4109 和 IEC 65700 规定。

8.1.6 电流互感器

换流变压器的电流互感器应满足下列要求:

- a) 所有的电流互感器的变比应在换流变压器铭牌中列出;
- b) 电流互感器的二次引线应经金属屏蔽管道引到换流变压器控制柜的端子上,引线应采用截面不小于 4mm² 的耐油、耐热的软线;
- c) 按具体工程确定,典型配置参数表见附录 A。

8.1.7 阀侧套管分压器

按具体工程确定,典型配置参数表见附录 A。

8.2 有载分接开关

8.2.1 额定电流

在选择有载开关的额定电流时，应考虑谐波电流和一定的过载能力，并应满足GB 10230.1对有载分接开关的要求。

8.2.2 调压范围

按具体工程设计确定。

8.2.3 性能要求

换流变压器应满足下列性能要求：

- a) 有载分接开关的机械寿命不少于 80 万次（油浸式），100 万次（真空泡式）；
- b) 有载分接开关的电气寿命不少于 20 万次（油浸式），30 万次（真空泡式）；
- c) 有载分接开关检修/换油周期不少于 10 万次；
- d) 有载分接开关长期载流的触头，应能够承受外部短路电流，持续 1s，且触头不熔焊、烧伤、无机械变形，保证可继续运行；
- e) 有载分接开关长期载流的触头，在 1.2 倍额定电流下，对换流变压器油的稳定温升不超过 20K；
- f) 有载分接开关的油箱应能经受 0.05MPa 压力的油压试验，经 1h 无渗漏现象。

8.2.4 结构要求

8.2.4.1 有载分接开关应装设在线滤油机。

8.2.4.2 有载分接开关的结构应满足下列要求：

- a) 有载分接开关应是高速转换电阻式，且有限位装置；
- b) 有载分接开关的切换装置应装于与换流变压器主油箱分隔且不渗漏的油箱里，其中的切换开关可单独吊出检修；
- c) 有载分接开关油箱应有单独的储油柜、呼吸器、压力释放装置和压力继电器等；
- d) 有载分接开关的驱动电机及其附件应装于耐全天候的控制柜内；
- e) 有载分接开关应能远距离操作，也可在换流变压器旁就地手动操作；
- f) 有载分接开关应备有累计切换次数的动作记录器和分接位置指示器，控制电路应有计算机接口。

8.3 冷却器

8.3.1 制造单位应优化换流变压器冷却器的位置，以进一步提高冷却效率。

8.3.2 换流变压器 box-in 方案时，所有的风机应可以安装在 box-in 箱体外。

8.3.3 换流变压器投入或退出运行时，工作冷却器均可通过控制开关投入与停止运行。控制开关装置应可在换流变压器旁就地手动操作，也可在控制室中遥控。

8.3.4 冷却装置应采用低噪声的风扇和低转速的油泵，应考虑灰尘导致的冷却功能降低等因素，必要时加装冷却器自动清洗装置。

8.3.5 换流变压器应采用强迫风冷却方式，具有自启动风扇和随换流变压器顶层油温及负载自动分级启停冷却系统的功能，当工作或冷却器故障时，备用冷却器能自动投入运行。

8.3.6 制造单位应提供在不同环境温度下，投入不同数量的冷却器时，换流变压器允许满负载运行时间及持续运行的负载系数。

8.3.7 制造单位设计换流变压器时应提供冷却器布置方案（一般应有一台冷却器作为备用）。当需要时，备用冷却装置也可投入运行，即全部冷却装置（包括备用）投入运行。

8.3.8 当冷却器发生故障切除全部冷却器时，在额定负载下至少允许运行 20min。当油面温度尚未达到 75℃ 时，允许上升到 75℃，但切除冷却器后的最长运行时间不得超过 1h。

8.3.9 当冷却系统电源发生故障或电压降低时，应自动投入备用电源。

8.3.10 当投入备用电源、备用冷却器、切除冷却器和电动机损坏时，应发出信号，并提供接口。

8.3.11 制造单位应提供冷却装置的电源总功率。冷却系统电动机的电源电压采用三相交流 380/220V，控制电源电压为直流 220V 或 110V。

8.3.12 冷却系统电动机的三相均应装有超载、短路及断相运行的保护装置。

8.3.13 制造单位应考虑在台风等恶劣的气象条件时冷却器的机械强度。

8.4 绝缘油、油箱及储油柜

8.4.1 绝缘油

换流变压器的绝缘油应满足下列要求：

- a) 换流变压器绝缘油应选用满足 GB 2536 规定、添加抗氧化剂，不应含有 PCB 成份，且不含其它任何添加剂的低含硫环烷基油；
- b) 注入换流变压器后的新油还应满足大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒不多于 2000 个/100mL 的要求；
- c) 制造单位应提供与厂内试验用油相同并经处理合格的新油；
- d) 同一换流站内的换流变压器应采用牌号和规格相同的变压器油；
- e) 油量除满足换流变压器安装和正常运行的油量外，再加一定的备用油。

8.4.2 油箱及储油柜

换流变压器的油箱及储油柜应满足下列要求：

- a) 换流变压器油箱的顶部不应形成积水，油箱内部不应有窝气死角。
- b) 油箱上应设有温度计座、接地板、吊攀水平、千斤顶支架和水平牵引装置等。
- c) 油箱上应装有梯子，梯子下部有一个可以锁住踏板的挡板，梯子位置应便于在换流变压器带电时从气体继电器中采集气样。
- d) 油箱的下部箱壁上应装有油样阀门，油箱上部装滤油阀门，底部应装有排油装置。
- e) 换流变压器油箱应装有下列阀门：
 - 1) 进油阀与排油阀(在油箱上部和下部应成对角线布置)；
 - 2) 油样阀(取样阀的结构和位置应便于取样)；
 - 3) 油箱的下部箱壁上应装有油样阀门；
 - 4) 油箱上部装滤油阀门，底部应装有排油装置。
- f) 油箱的机械强度应承受住真空残压 13Pa 和正压不小于 0.1MPa 的机械强度试验，油箱不得有损伤和存在不允许的永久变形。
- g) 储油柜应具有与大气隔离的油室，应采取全密闭防油老化措施，如在储油柜内部加装胶囊等。
- h) 储油柜容积应保证在最高环境温度允许过载状态下油不溢出，在最低环境温度未投入运行时观察油位计，应有油位指示。
- i) 储油柜油室中的油量可由构成气室的隔膜(袋)或其它的膨胀或收缩来调节，气室通过吸湿型呼吸器与大气相通。
- j) 储油柜应有油位计、放气塞、排气管、排污管和进油管、排污装置及吊攀。
- k) 储油柜与换流变压器油箱之间的联管应畅通。
- l) 油温测量装置应满足下列要求：
 - 1) 装有供玻璃温度计用的管座，所有设置在油箱顶盖的管座应伸入油内不少于 110mm；
 - 2) 装设户外式信号温度计，温度计引线应用支架固定，信号温度计的安装位置应便于观察；
 - 3) 装有远距离测温用的测温元件，并应有送出该信号的功能；
 - 4) 当换流变压器采用集中冷却结构时，在靠油箱进出油口总管路处，安装测量油温用的玻璃温度计管座。

8.5 安全保护装置

8.5.1 换流变压器应装有气体继电器，为使气体易于汇集在气体继电器内，要求升高座的联管、换流变压器与储油柜的联管和水平面有一定升高坡度，以不影响气体继电器正确动作。同时，气体继电器的顶部接线盒密封盖的设计应考虑防进水措施。

8.5.2 气体继电器的安装位置及其结构应能观察到分解气体的数量和颜色，且应便于取气样，气体继电器的放气管应引至地面。

8.5.3 每台换流变压器在油箱两端应直接安装带报警接点的压力释放装置（至少装有 2 个），当内部压力达到规定值时能可靠释放压力。

8.6 铁心和绕组

8.6.1 铁心应采用高质量、低损耗的晶粒取向冷轧硅钢片，换流变压器铁心不应因运输和运行的振动而松动。

8.6.2 全部绕组应采用铜导线，优先采用半硬铜导线，绕组应有良好的冲击电压波分布；使用场强应严格控制，确保绕组内不发生局部放电；应对绕组漏磁通进行控制，避免在绕组和其它金属构件上产生局部过热。

8.6.3 绕组应适度加固，引线应充分紧固，器身形成坚固的整体，使其具有足够耐受短路的强度。在运输时和在运行中不发生相对位移。

8.6.4 绕组内部应有较均匀的油流分布，油路通畅，避免绕组局部过热。

8.6.5 换流变压器的铁心、夹件、接线装置应与油箱绝缘，通过装在油箱的套管引出，并在油箱下部与油箱连接接地。油箱应有 2 个接地处，应有明显接地符号。

8.6.6 接地极板应满足接地热稳定电流要求，并配有与接地线连接用的接地螺钉，螺钉的直径不小于 12mm。

8.7 铭牌及金属外表面

8.7.1 铭牌应用耐腐蚀材料制成，字样、符号应清晰耐久。设备正常运行时，铭牌安装位置应明显可见。

8.7.2 换流变压器及金属外表面应进行防腐处理。

8.7.3 所有需要涂漆的表面在涂漆前应进行彻底的表面处理。

8.7.4 换流变压器油箱内表面、铁心上、下夹件等均应涂以浅色漆，并与换流变压器油有良好的相容性，用漆由制造单位决定。

8.7.5 换流变压器油箱、储油柜、冷却装置及联管等的外表面均应涂漆，其颜色应依照用户的要求。

8.7.6 换流变压器出厂时，外表面油漆应全新，并供给用户适当数量的原用漆，用于安装现场补漆。

8.7.7 铭牌内容应包括：换流变压器种类，标准代号，制造厂名，出厂序号，制造年份，相数，额定容量(kVA 或 MVA)，额定频率，各绕组额定电压和分接范围，各绕组额定电流，接线原理图，以百分数表示的短路阻抗实测值，冷却方式，负载损耗，空载损耗，空载电流，套管电流互感器，总重，运输重，器身重等。

8.8 换流变压器就地控制（控制箱）系统

8.8.1 换流变压器就地控制系统应与换流变压器配套供货，功能应包括：变压器冷却器就地自动控制、变压器分接头就地控制、变压器就地控制与远方控制的接口及用于变压器本体保护的监视测量信号的输出。

8.8.2 换流变压器就地控制系统输入/出信号的内容参见附录 A。

8.9 控制柜和端子箱

8.9.1 换流变压器及其附件所用控制柜和端子箱应设计合理，控制柜内的端子排应为阻燃、防潮型，应有足够的接线端子以便连接控制、保护、报警信号和电流互感器引线等的内部引线，并应留有 15% 的备用端子。

8.9.2 所有外部接线端子包括备用端子均应为线夹式。

8.9.3 控制跳闸的接线端子之间及与其它端子间均应留有一个空端子，或采用其它隔离措施，以免因短接而引起误跳闸。

8.9.4 控制柜和端子箱的安装高度应便于在地面上进行就地操作和维护。

8.9.5 控制柜内应有可开闭的照明设施，并应有适当容量的交流 220V 的加热器，以防止柜内发生水气凝结。控制柜外可有防雨电源插座(单相，10A，220V，AC)。

8.9.6 冷却系统控制箱应随换流变压器成套供货，控制箱应为户外式，防护等级不低于 IP55。控制箱应采用双回路电源供电。

8.10 结构及其附件

8.10.1 换流变压器的结构应有利于运输，需现场安装的附件，安装好后应能立即进入持续工作状态。

8.10.2 换流变压器套管、储油柜、油箱和冷却器等布置应符合用户的要求。

8.10.3 端子连结方式应满足下列要求：

- a) 网侧、阀侧使用架空软导线；
- b) 网侧中性点使用架空软导线或硬母线。

8.10.4 换流变压器应能在其主轴线和短轴线方向在平面上滑动或在管子上滚动，油箱上应有用于拖动的构件。

8.10.5 换流变压器底座与基础的固定方法，应经用户认可。

8.10.6 换流变压器及其附件的设计和组装应使振动最小。

8.10.7 换流变压器应配备绕组测温 and 油温测量装置并符合下列要求：

- a) 绕组测温应能反映绕组的平均温升，油温测量应不少于两个监测点，并分别分布于变压器长轴的两端；
- b) 上述温度变量除在换流变压器本体上可观测外，并应能将该信号送出。

8.10.8 换流变压器本体上的测温装置的端子箱或就地仪表间的电缆应用耐油、阻燃、屏蔽电缆。

8.10.9 气体继电器至端子箱电缆应将其触点两极分别引出，不得合用一根多芯电缆。

8.10.10 所有法兰的密封面应平整，密封垫应有合适的限位，杜绝渗漏。

8.10.11 压力释放阀、瓦斯继电器，油位指示计、油温表等表面应有防雨罩，应考虑对顶部接线盒密封盖的设计，采用防进水措施，防止内部接点受潮故障。

8.10.12 换流变压器的所有外购件应经过鉴定并有产品合格证，符合相应标准要求。

8.10.13 换流变压器应装设在线监测装置，该装置的监测值应能在主控室内看到，当出现异常时能给出报警信号。

9 其它要求

9.1 互换性

所有相同设计、相同额定值的换流变压器的电气性能应完全相同，具有互换性，且可以并列运行。

9.2 设计寿命

制造单位应保证设备能耐用30年。

9.3 消防

制造单位提供的产品（包含冷却器风扇电机、潜油泵、控制箱及端子箱等）应满足水喷雾灭火的要求。

9.4 尺寸和重量

制造单位应按工程要求，提供安装重量和安装尺寸。

9.5 运输

9.5.1 换流变压器应满足运输重量与运输尺寸的限度要求。

9.5.2 换流变压器应能承受运输中的冲撞，当冲撞加速度不大于 3g 时，应无任何松动、变形和损坏。

9.5.3 应充氮或干燥空气运输，确定运输过程中耐受冲撞的能力，并装设冲撞记录器进行检查。

9.5.4 换流变压器结构应满足允许倾斜 15° 的机械承受力。

9.5.5 换流变压器运到现场后，不经吊罩检查即能可靠投入运行。

10 试验

10.1 概述

10.1.1 换流变压器在出厂之前应参照本标准和 GB 1094.1、GB/T 16927.1 等的规定，在制造单位进行型式试验、例行试验和特殊试验。同时，套管制造单位应依照 IEC 65700 的试验项目，对换流变压器的套管进行型式、逐个试验，并向用户提供试验报告。

10.1.2 试验的一般要求如下：

- a) 试验应在 10℃～40℃ 环境温度下进行；
- b) 试验时，换流变压器的外部组件和装置（指可能影响变压器运行的）均应安装在规定的位置上；
- c) 试验应在换流变压器的主分接上进行（除非有关试验条文另有规定）；
- d) 除绝缘试验外，所有性能试验均应以额定条件为基准（除非试验条文另有规定）；
- e) 当试验测量的数据需校正到参考温度的值时，通常其参考温度取 75℃，但所有损耗和阻抗试验结果应校正到 85℃；
- f) 换流变压器在现场安装后，应参照本标准和有关交接试验标准进行现场交接试验。

10.2 试验项目

10.2.1 例行试验

例行试验应在所有的换流变压器上进行，但不必依次遵循下述顺序，换流变压器应进行下列例行试验：

- a) 联结组标号检定（按 GB 1094.1）；
- b) 电压比测量（按 GB 1094.1）；
- c) 绕组电阻测量（按 GB 1094.1）；
- d) 绕组连同套管的绝缘电阻、吸收比或极化指数测量（按 GB 1094.1）；
- e) 铁心及其相关绝缘的试验（按 GB 1094.1）；
- f) 绕组绝缘介质损耗及电容测量（按 GB 1094.1）；
- g) 套管试验（按 10.3.1）；
- h) 空载损耗和空载电流测量（按 10.3.2）；
- i) 负载损耗和短路阻抗测量（主分接和最大、最小分接）（按 10.3.3）；
- j) 谐波损耗试验（按 10.3.4）；
- k) 温升试验（按 10.3.5）；

- l) 绝缘油试验 (按 10.3.6) ;
- m) 雷电冲击全波试验 (按 10.3.8) ;
- n) 操作冲击试验 (按 10.3.9) ;
- o) 外施直流电压耐受试验 (包括局部放电测量) (按 10.3.10) ;
- p) 极性反转试验 (包括局部放电测量) (按 10.3.11) ;
- q) 阀侧外施交流耐压试验 (包括局部放电测量) (按 10.3.12) ;
- r) 中性点交流耐压试验 (按 10.3.12) ;
- s) 长时交流感应耐压试验 (包括局部放电测量) (按 10.3.13) ;
- t) 油流带电试验 (按 10.3.14, 冷却方式为 ODAF 的换流变压器) ;
- u) 长时间空载试验 (按 10.3.15) ;
- v) 1 小时励磁测量 (按 10.3.16) ;
- w) 套管电流互感器试验 (按 10.3.17) ;
- x) 有载分接开关动作试验 (按 10.3.18) ;
- y) 风扇和油泵电机的吸取功率测量 (按 10.3.21) ;
- z) 所有附件和保护装置的功能控制试验 (按 10.3.22) ;
- aa) 密封试验 (按 10.3.23) ;
- bb) 辅助回路绝缘试验 (按 10.3.25) ;
- cc) 高频阻抗测量 (按 10.3.28) ;
- dd) 频率响应特性或低压电抗测量 (按 10.3.32) 。

10.2.2 型式试验

型式试验在每种型式换流变压器中的一台产品上进行。型式试验报告2年有效,如果发生任何结构、材料的变化,应重新进行型式试验。除10.2.1的试验项目外,此换流变压器应进行如下试验:

- a) 雷电冲击截波试验 (按 10.3.8) ;
- b) 短时交流感应电压试验 (按 10.3.13) ;
- c) 油箱机械强度试验 (按 10.3.19) ;
- d) 无线电干扰水平测量 (按 10.3.20) ;
- e) 油流带电试验 (按 10.3.14, 冷却方式为 OFAF 的换流变压器) ;
- f) 声级测定 (按 10.3.36) ;
- g) 短路试验 (按 GB 1094.5, 如无条件进行此项试验,制造单位应提供表明换流变压器抗短路能力的计算报告) 。

10.2.3 交接试验

用户与制造单位协商的交接试验应在现场进行,换流变压器应进行下列交接试验:

- a) 测量绕组连同套管的直流电阻 (按 GB 50150) ;
- b) 检查所有分接头的电压比 (按 GB 50150) ;
- c) 检查换流变压器的引出线极性 (应与设计要求、铭牌及标记的相符) (按 GB 50150) ;
- d) 绕组连同套管的绝缘电阻、吸收比或极化指数的测量 (按 GB 50150) ;
- e) 绝缘油试验 (按 GB 50150) ;
- f) 套管试验 (按 10.3.1) ;
- g) 套管电流互感器试验 (按 10.3.17) ;
- h) 密封试验 (按 10.3.23) ;
- i) 辅助装置的检查 (按 10.3.24) ;
- j) 辅助回路绝缘试验 (按 10.3.25) ;
- k) 有载分接开关检查与试验 (按 10.3.26) ;

- l) 油泵及冷却器的运行试验（按 10.3.27）；
- m) 铁心及其夹件对地绝缘试验（按 10.3.29）；
- n) 绕组连同套管的绝缘介质损耗因数（ $\tan\delta$ ）及电容量测量（按 10.3.30）；
- o) 直流泄漏电流测量（按 10.3.31）；
- p) 频率响应特性或低压电抗测量（按 10.3.32）；
- q) 绕组连同套管的局部放电测量（按 10.3.33）；
- r) 冲击合闸试验（按 10.3.34）；
- s) 箱壳表面的温度分布测量（按 10.3.35）；
- t) 声级测量（按 10.3.36）。

10.3 试验要求和方法

10.3.1 套管试验

10.3.1.1 一般要求

套管制造单位应依照本标准、GB 1094.1、GB/T 4109、GB 50150、DL/T 596及IEC 65700的试验项目，对换流变压器的套管进行型式、逐个试验，并向用户提供试验报告。

10.3.1.2 网侧套管

套管应按GB/T 4109、本标准的规定进行型式、逐个试验。

10.3.1.3 阀侧绕组套管

套管一般应按IEC 65700和本标准的规定进行型式、逐个试验，或者，在缺乏适合的标准时，应由制造单位与用户就套管的交流和直流试验程序进行协商。在这些试验中，应将套管安装于能得到与运行中出现的电气作用强度条件近似或相同的结构件上。

10.3.2 空载损耗和空载电流的测量

在10%、90%、100%、110%和115%额定电压下进行测量，如果可能还应在120%额定电压下测量。试验时，应在换流变压器的主分接位置上进行，读数时应记下所有电压的波形系数。

10.3.3 负载损耗及阻抗测量

10.3.3.1 应在正弦波电流下进行负载损耗试验。应进行两次损耗测量阻抗电压（主分接）、短路阻抗和负载损耗（主分接、最大、最小分接）：一次是在额定频率下进行（同时进行低电压下的电抗值测量，向用户提交测量报告），另一次是在不低于150Hz的某一频率下进行，然后根据这些测量结果进行下述计算：

- a) 推算绕组内、外附加损耗的分布值；
- b) 推算运行中的负载损耗；
- c) 短路阻抗和负载损耗应校正到参考温度85℃时的值。与设计值相比，阻抗允许偏差为： $\pm$ 设计值 $\times 5\%$ 。

10.3.3.2 损耗测量方法按GB 1094.1的规定，令额定频率下的电流值等于额定电流值，频率更高时的电流值为10%至50%额定电流值。通过这两种频率下的测量，把附加损耗分解为两部分，其中一部分与绕组中的涡流损耗 P_{WE} 有关，另一部分与结构件中的杂散损耗 P_{SE} 有关。

注：当绕组电流中的谐波电流大于额定电流的10%时，这两部分损耗之间的比值可以假设为常数。

10.3.3.3 在两次不同频率 f_1 和 f_x 及其对应的电流 I_1 和 I_x 下测得的负载损耗，若以 P_1 和 P_x 表示，则 P_1 由式（7）计算， P_x 由式（8）计算：

$$P_1 = RI_1^2 + P_{WE1} + P_{SE1} \quad (7)$$

$$P_x = RI_x^2 + \left(\frac{I_x}{I_1}\right)^2 \left(\frac{f_x}{f_1}\right)^2 P_{WE1} + \left(\frac{I_x}{I_1}\right)^2 \left(\frac{f_x}{f_1}\right)^{0.8} P_{SE1} \quad (8)$$

10.3.3.4 用上述两个等式可对两个附加损耗分量 P_{WE1} 和 P_{SE1} 进行估算。

10.3.3.5 用前述负载损耗规定的计算规则，可以推算出实际运行时的负载损耗。

10.3.3.6 运行时的总损耗等于空载损耗与推算出的运行时的负载损耗之和。

10.3.4 谐波损耗试验

按 IEC 61378-2 的要求进行，试验应针对主分接、最大、最小分接进行。

10.3.5 温升试验

10.3.5.1 对于换流变压器，在确定（通过计算和试验）其油、绕组和其它金属结构件在变压器运行时的温升时，应考虑谐波电流的影响。温升试验按本标准和 GB 1094.2、IEC 61378-2 的规定来确定温升特性。

10.3.5.2 试验目的如下：

- a) 确定顶层油温升；
- b) 确定绕组平均温升；
- c) 计算绕组热点温升；
- d) 确定附件及外壳的热点温升。

10.3.5.3 应对 GB 1094.2 所规定的油浸式变压器的试验程序做如下修改：

- a) 应按 6.9 计算总损耗来确定稳态条件下的顶层油温升。如果试验设备受到限制，可以将施加的功率损耗降低至不低于规定值的 80%（见 GB 1094.2）。试验结束时应对本试验所确定的温升进行校正；
- b) 顶层油温升确定后，接着用与额定运行条件下的负载损耗等效的 50Hz 正弦试验电流继续进行试验。这种条件应在绕组中持续 1h，在此期间应测量油和冷却介质的温度。试验结束时，应测定绕组的温升。

10.3.5.4 此等效的试验电流 I_{eq} 如式（9）所示：

$$I_{eq} = I_1 \left(\frac{I_{LN}^2 \times R + F_{WE} \times P_{WE1} + F_{SE} \times P_{SE1}}{I_1^2 \times R + P_{WE1} + P_{SE1}} \right)^{0.5} \quad (9)$$

式中：

$$F_{WE} = \sum_{h=1}^{25} k_h^2 \times h^2$$
$$F_{SE} = \sum_{h=1}^{25} k_h^2 \times h^{0.8}$$

10.3.5.5 进行温升试验时，应采用红外测温仪等设备测量箱壳表面的温度分布。在温升试验前、后及试验中，每隔 4 小时应进行油中气体分析试验。气体色谱分析装置对气体的最小检测值应达到表 2 的规定；温升试验前后绝缘油中产气率不应大于表 3 的规定；当超过规定时，应与用户协商，采取延长试验时间等方式解决。

表2 色谱分析装置气体最小检测值 单位：μl/l

CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
5	10	2	0.1	0.1	0.1	0.1

表3 油中气体绝对产气率 单位: ml/d

总烃	C ₂ H ₄	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	CO
20	4	<1	120

10.3.6 绝缘油试验

绝缘油试验应符合下列规定:

- a) 换流变压器油应符合 GB 2536 等标准的要求。试验项目包括油中含水量、油中溶解气体色谱分析、击穿电压、介质损耗因数、油中颗粒含量测量等;
- b) 套管中的绝缘油可不进行试验,但套管制造单位应提供套管中的绝缘油的各项试验报告(包括油中气体色谱分析);
- c) 在绝缘油注入前、后,换流变压器制造单位应提供油样的试验报告。现场验收新油时,应按规定进行油样试验;
- d) 在真空注油并按规定的时间静置以后,应从换流变压器本体的油样阀门中取油样,且至少进行下列试验,并达到以下要求:
 - 1) 击穿电压:不小于 70kV;
 - 2) tanδ (90℃):不大于 0.5%;
 - 3) 水分:不大于 10mg/L;
 - 4) 油中含气量:体积分数不大于 1%;
 - 5) 油中颗粒含量:过滤以后的油中,大于 5μm 的颗粒不多于 2000 个/100mL;
 - 6) 油中溶解气体色谱分析。

10.3.7 绝缘试验顺序

10.3.7.1 绝缘试验的目的是为了确认换流变压器是否按规定的网侧绕组和阀侧绕组的绝缘要求进行设计和制造。

10.3.7.2 绝缘试验应按下述顺序进行:

- a) 长时交流感应加压和局部放电测量(预试验);
- b) 雷电冲击试验;
- c) 操作冲击试验;
- d) 外施直流电压耐受试验;
- e) 极性反转试验;
- f) 外施交流耐压试验;
- g) 短时交流感应耐压试验;
- h) 长时交流感应耐压试验及局部放电测量(紧接 g)项试验后进行)。

10.3.7.3 应在上述试验的开始、中途和结束时分别抽取供分析用的油样。应对试验过程开始和试验过程结束时所抽取的油样进行对比分析,如果油样分析检测结果有差异,则还要对中途抽取的油样进行分析;在试验过程中的油样抽取,应在一些重要试验项目做完后,经用户与制造单位协商一致后进行。

10.3.7.4 试验中应按以下要求进行油样分析:

- a) 任何功率试验或电压试验前都应取油样;
- b) 绝缘试验前应取一次油样;
- c) 绝缘试验后应再次取一次油样;
- d) 长时间空载试验等应按有关的要求在试验期间取油样。

10.3.8 雷电冲击试验

10.3.8.1 雷电冲击试验包括全波和截波试验。雷电冲击试验应按 GB/T 1094.3、GB/T 1094.4 和 GB/T 16927.1 的试验方法，试验电压参照附录 A。

10.3.8.2 网侧绕组的试验电压应施加于每个端子上，每次试验一个端子。

10.3.8.3 对于阀侧绕组，有两种可用的方法进行试验：

- a) 应在绕组的每个端子施加冲击波，其余端子应直接接地。雷电冲击试验电压为试验中通过绕组两端的电压，试验电压值参照附录 A。
- b) 如果端子对地的绝缘水平规定值与通过绕组两端的绝缘水平不同时，试验应在绕组的每个端子上进行。可以考虑将绕组非被试端子通过一个适当的电阻接地。此电阻的选择应是使受冲击的端子上的对地电压值等于规定值时，绕组两端也能得到所需要的试验电压值。
- c) 当绕组对地和绕组两端的雷电冲击水平相同时，可只做 a) 中的试验。

10.3.8.4 对于并非所有端子均通过油箱或箱盖引出的绕组，其雷电冲击试验应由用户与制造单位协商确定。

10.3.8.5 对绕组线端上进行雷电冲击截波试验时，截波试验的截断系数应在 0.2~0.3 之间。

10.3.8.6 中性点端子雷电全波冲击试验时当一个绕组的中性点端子具有额定冲击耐受电压时，可由施加于绕组线端上的冲击试验来检验。

10.3.8.7 试验时，记录电压和电流的瞬变波形图，并根据这些波形图判断绝缘耐压试验是否合格。

10.3.9 操作冲击试验

操作冲击试验应满足下列要求：

- a) 当网侧绕组进行操作冲击试验时，应按 GB/T 1094.3 和 GB/T 1094.4 的试验方法，试验电压参照附录 A；
- b) 试验时，应谨慎地选择有载分接开关的分接位置，以使阀侧绕组上出现的试验电压不超过阀侧绕组的绝缘水平；
- c) 当操作冲击试验电压施加于阀侧绕组时，绕组各端子应连接在一起，操作冲击试验电压应施加于绕组与地之间。非被试绕组的端子应接地。

注：不要求在阀侧绕组两端之间进行操作冲击试验。

10.3.10 外施直流电压耐受试验

10.3.10.1 试验温度

在试验中，油温应为 10℃~30℃。

10.3.10.2 试验电压和极性

试验电压参照附录 A，且为正极性。

10.3.10.3 试验程序

外施直流电压耐受试验的程序应满足下列要求：

- a) 非被试端子应直接接地。所有套管端子应在试验开始前至少接地 2h，不允许对换流变压器绝缘结构预先施加较低的电压；
- b) 试验电压应在 1min 内升至规定的水平并保持 180min；
- c) 在整个外施直流电压耐受试验过程中，应进行局部放电测量；
- d) 局部放电测量按 GB/T 1094.3-2017 附录 A 的有关适用部分进行，测量仪器按 GB/T 7354 的规定；
- e) 如果在试验的最后 30min 内，记录到不小于 2000pC 的脉冲数不超过 30 个，且在试验的最后 10min 内，记录到不小于 2000pC 的脉冲数不超过 10 个，则应认为此试验结果通过验收，不必继续进行局部放电试验，如果此条件未满足，则可以将试验延长 30min；

- f) 延长 30min 的试验只允许进行一次，当在此 30min 内的不小于 2000pC 的脉冲数不超过 30 个，且在最后 10min 内的不小于 2000pC 的脉冲数不超过 10 个时，则应认为该试验合格；
- g) 外施直流耐压试验结束后，应进行充分的放电。否则，绝缘结构件中可能会有相当多的残余电荷，对以后的局部放电测量可能会有影响。

注1：推荐使用能对局部放电进行探测和定位的仪器，特别是能对换流变压器内部的局部放电和试验线路上的局部放电加以区分的仪器。

注2：局部放电测量是非破坏性的试验。当局部放电测量值不合格时，可不立即拒受被试产品，制造单位应进一步采取措施，且与用户就此进行协商、决定。

10.3.11 极性反转试验

10.3.11.1 试验温度

在试验中，油温应为 $10^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

10.3.11.2 试验电压

试验电压参照附录A。

10.3.11.3 试验程序

试验程序应符合下列要求：

- a) 非被试端子应直接接地。所有套管端子应在试验开始前至少接地 2h，不允许对换流变压器绝缘结构预先施加较低的电压。
- b) 双极性反转试验应进行两次极性反转，试验顺序应包括施加负极性电压 120min，然后施加正极性电压 120min，最后再施加负极性电压 60min。每次电压极性反转时，试验电压高于 1000kV 应在 2min 内完成，试验电压低于 1000kV 的应在 1min 内完成。
- c) 当电压达到 100%试验值时，极性反转结束。
- d) 极性反转试验结束后，应进行充分的放电。
- e) 局部放电测量应按 GB/T 1094.3-2017 附录 A 的有关适用部分进行，测量仪器按 GB/T 7354 的规定。应在整个极性反转试验过程中测量局部放电量。
- f) 如果在每次极性反转后的 30min 内，记录到不小于 2000pC 的脉冲数不超过 30 个，且在每次极性反转的最后 10min 内，记录到不小于 2000pC 的脉冲数不超过 10 个，则应认为通过试验。

10.3.12 外施交流耐压试验

外施交流耐压试验应满足下列要求：

- a) 试验电源频率应为 50Hz；
- b) 试验程序及方法应按 IEC 61378-2、GB/T 1094.3 的规定，同时试验电压参照附录 A 的规定；
- c) 试验中所有非被试端子均应接地；
- d) 局部放电测量按 GB/T 1094.3-2017 附录 A 的有关适用部分进行，测量仪器按 GB/T 7354 的规定；
- e) 试验持续时间为 1h，允许的局部放电量最大值应不超过 100pC。

10.3.13 感应电压试验

感应电压试验应满足下列要求：

- a) 应按 IEC 61378-2、GB/T 1094.3 规定的试验方法、施加时间等进行短时感应交流电压试验和长时感应交流电压试验（同时测量局部放电量），试验电压参考附录 A；
- b) 长时感应交流电压试验中，使用 U_m 为预加压电压，试验持续时间为 1h，允许的局部放电量最大值应不超过 100pC；

- c) 在感应电压试验中,应用超声探测仪探测单个随机高幅值放电脉冲。如果放电量不小于 2000pC 的放电脉冲数为每分钟超过 1 次,那么换流变压器应按 d) 的规定进行 1 次预处理,然后重新进行感应电压试验。
- d) 感应电压试验前,应考虑直流电阻测试、直流耐压等直流试验的影响,宜先对换流变压器施加额定频率(50Hz)的 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 电压(网侧绕组),进行 1h 励磁的预处理,以充分消除残余的直流电荷。

10.3.14 油流带电试验

油流带电试验应满足下列要求:

- a) 启动全部冷却器运转 4h,其间连续测量中性点对地的泄漏电流,然后在不停泵情况下作局部放电试验电压 $1.5U_m/\sqrt{3}$ (1000kV 试验电压 $1.3U_m/\sqrt{3}$),维持 30min,连续观察并测量局部放电量,放电量不大于 300pC;
- b) 若冷却器运转 4h 而中性点对地泄漏电流未达到稳定值,则应加长试验时间,达到稳定值为止。

注:油流带电试验应按有关的要求在试验期间取油样。

10.3.15 长时间空载试验

在工频 1.1 倍额定电压下 12h,同时启动全部运行的冷却器进行长时间空载试验。其间应无明显的局部放电的声、电信号,试验前后油中溶解气体总烃含量应无明显变化,并且无乙炔。

10.3.16 1 小时励磁测量

1 小时励磁测量试验应满足下列要求:

- a) 在完成全部绝缘试验之后,换流变压器还应经受 1 小时的励磁测量。其试验条件与原先的空载损耗和激磁电流测量一样。
- b) 在 110% 额定电压下保持 1 小时,然后在 110% 和 100% 额定电压下测量并记录换流变压器的励磁损耗。最后一次测到的励磁损耗结果应用来评价其损耗保证值。如果这次在额定电压下测到的励磁损耗值超过了早先测到的励磁损耗值的 4% 以上,那么制造单位应与用户协商,对试验结果进行评定。

10.3.17 套管电流互感器试验

应单独进行变比和极性检查、绝缘电阻、测量直流电阻、短时工频耐压试验、校验励磁特性。

10.3.18 有载分接开关动作试验

在换流变压器完成装配后,有载分接开关应进行如下的操作试验:

- a) 换流变压器不励磁,分接开关完成 10 个操作循环(1 个操作循环指从分接范围的一端到另一端,并返回到原始位置);
- b) 换流变压器不励磁,在 85% 的额定操作电压下完成 1 个操作循环;
- c) 换流变压器在额定频率和额定电压下,完成 1 个操作循环;
- d) 负载电流下的有载分接开关动作试验;
- e) 温升试验后,保持试验电流,操作有载分接开关完成 10 个操作循环,试验结束后,测量换流变压器绕组的直流电阻。

10.3.19 油箱机械强度试验

10.3.19.1 油箱真空残压试验

油箱中的真空残压应为 13.3 帕绝对气压或更低,通往抽真空装置的阀门应关断。大约 10 分钟之后,测量油箱中的真空残压,且应基本维持不变。

10.3.19.2 油箱压力试验

所有的油箱、焊缝、冷却器以及构成换流变压器所需的其它部件都应进行漏油及强度试验（试验时压力释放装置应拆除）。试验时油箱中注满油，压力不小于0.1MPa，从油箱顶上加压，在室温下保持12小时。压力试验应在温升试验完成后开始。如果发现渗漏，则应在止漏后重新开始试验。

注：压力试验在完全组装好的换流变压器上进行。只有在事先得到用户同意时，在各部件上进行的压力试验才是可行的。

10.3.20 无线电干扰水平测量

现场供货的端部屏蔽条件下，按CISPR规定进行测量。

10.3.21 风扇和油泵电机的吸取功率测量

按GB 1094.1的相关规定进行风扇及油泵的功率测量。

10.3.22 所有附件和保护装置的功能控制试验

附件和保护装置的功能控制试验应满足下列要求：

- a) 包括冷却装置、继电器、温度计、压力释放器等的功能控制检查和试验，按相关标准执行，提供试验报告。
- b) 按各装置标准规定的试验方法校验测量、保护和监测装置。同时，应符合产品技术条件的规定，其误差及变差，均应在产品相应等级的允许误差范围内。

10.3.23 密封试验

换流变压器装配完后，在储油柜油面以上施加0.03Mpa压力，至少持续12h，不应渗漏。

10.3.24 辅助装置的检查

根据产品使用说明书，对温度计、气体继电器、压力释放装置、油位指示器等进行检查。

10.3.25 辅助回路绝缘试验

冷却器油泵和风扇电机、有载分接开关的电机传动、信号电路及控制和辅助设备回路导线等用2500V兆欧表测量绝缘电阻，应无闪络及击穿现象。

10.3.26 有载分接开关的检查和试验

有载分接开关的检查和试验应满足下列要求：

- a) 手动操作 2 回（从最大分接到最小分接，再回到最大分接，称为 1 回），检查开关转动部分是否灵活；
- b) 测试开关指示的分接的位置是否正确（一般通过测变比确定）；
- c) 检查开关在各分接位置时的接触是否良好；
- d) 测量开关在各分接位置时线圈的直流电阻，各项性能应符合技术条件要求；
- e) 按开关使用说明书进行安装和其它试验，各项性能应符合技术条件要求；
- f) 在额定电压、额定频率和空载情况下，检查调压情况，其切换同步性和电压变化规律应符合产品规定；
- g) 有载分接开关并列运行时，应检查开关动作的同期性：手动操作 2 回（从最大分接到最小分接，再回到最大分接，称为 1 回），通过听开关动作声音等方法来检查开关动作的同期性；
- h) 注入有载分接开关油箱中的油应符合规定。

10.3.27 油泵及冷却器的运行试验

油泵及冷却器的运行试验应满足下列要求：

- a) 冷却器持续工作 24h，应无渗漏油和吸入空气；
- b) 油泵开动后应无异常声响和明显震动。

10.3.28 高频阻抗测量

应在用户与制造单位协商的频率范围下测量换流变压器的高频阻抗。

注：典型频率范围为：50Hz～5000Hz；30kHz～50kHz。

10.3.29 铁心及其夹件对地绝缘试验

铁心及其夹件对地绝缘的试验应满足下列要求：

- a) 进行器身检查的换流变压器，应测量可接触到的螺栓、夹件对铁轭、铁芯、油箱的绝缘电阻；
- b) 不做器身检查的换流变压器，应通过接地端分别测量夹件对铁芯、夹件和铁芯对油箱的绝缘电阻；
- c) 铁心、夹件对地绝缘电阻用不低于 2500V 的兆欧表测量，持续时间为 1min，不应小于 500MΩ。

10.3.30 绕组连同套管的绝缘介质损耗因数（tanδ）及电容量测量

10.3.30.1 换流变压器完成组装且充好油之后，应根据 GB 50150 规定测量各绕组对地、各绕组之间、套管的绝缘介质损耗因数及电容量。

10.3.30.2 在试验报告中，应包括测量结果和测量时的油温。绕组介质损耗因数应在油面温度 10°C～40°C 之间用电桥进行测量。

10.3.30.3 例行试验时，测量结果应符合下列规定：

- a) 套管的 tanδ 值不应大于套管出厂试验值的 130%；
- b) 绕组连同套管的 tanδ 值不应大于 0.5%；
- c) 当测量温度与产品出厂试验温度不符合时，按 GB 50150 换算到同一温度时的数值进行比较。

10.3.30.4 现场交接验收试验时，测量结果应符合下列规定：

- a) tanδ 值不应大于产品出厂试验值的 130%；
- b) 当测量温度与产品出厂试验温度不符合时，按 GB 50150 换算到同一温度时的数值进行比较。

10.3.31 直流泄漏电流测量

按照 DL/T 596 的规定，应在绕组连同套管的绝缘电阻、介质损耗因数（tanδ）和电容量测量等试验合格后进行。并符合下列要求：

- a) 试验在末端进行；
- b) 试验电压为 60kV；
- c) 读取 1min 时的泄漏电流值；
- d) 泄漏电流值不应大于 30μA (20°C)。

10.3.32 频率响应特性或低压电抗测量

用频率响应特性、低压电抗法或其它方法测量换流变压器的绕组结构情况，记录测量结果，作为换流变压器发生短路故障时诊断绕组是否变形的参考。

10.3.33 绕组连同套管的局部放电测量

绕组连同套管局部放电的测量应符合下列规定：

- a) 按 GB/T 1094.3、GB/T 7354 和 DL/T 596 的规定进行；
- b) 试验电源频率不小于 100Hz，施加 $1.5U_n/\sqrt{3}$ 电压 60min，放电量不大于 100pC。

10.3.34 冲击合闸试验

冲击合闸试验应满足下列要求:

- a) 根据 GB 50150 标准规定, 在额定电压下进行换流变压器的冲击合闸试验;
- b) 冲击合闸 5 次, 应无异常现象;
- c) 冲击合闸宜在换流变压器网侧绕组进行;
- d) 第 1 次合闸后, 带电运行时间不小于 30min, 其后每次合闸后的带电运行时间可以逐次缩短, 应无异常现象。

10.3.35 箱壳表面的温度分布测量

采用红外测温仪等设备测量箱壳表面的温度分布, 检查有无过热点及其分布。

10.3.36 声级测定

声级测定应符合下列规定:

- a) 应在额定电压、额定频率及所有冷却器开启情况下, 按 GB/T 1094.10 及本标准规定的测量方法和要求进行测量;
- b) 现场交接验收试验中, 应在额定工况及所有冷却器开启情况下, 按照 GB/T 1094.10 规定的测量方法和要求, 测量距离换流变压器轮廓线 2m 处的噪声水平和敏感地点的实际噪声水平。

行业标准信息服务平台

附录 A

(资料性附录)

换流变压器的额定值与技术参数

A. 1 系统条件

系统条件的额定值如下:

- a) 交流系统最高运行电压: 送端 800kV, 受端高端 550kV, 受端低端 1100kV;
- b) 交流系统额定频率: 50Hz;
- c) 交流系统中性点接地方式: 直接接地;
- d) 直流系统标称电压: $\pm 1100\text{kV}$;
- e) 直流系统最高运行电压: 1122kV。

注: 以上为换流变压器所连接系统的参数, 本附录中参数依据该数据得到。

A. 2 换流变压器的绝缘水平

$\pm 1100\text{kV}$ 单相双绕组换流变压器的阀侧绝缘水平见表A. 1。

表A. 1 典型换流变压器绝缘水平

名称		阀侧绕组 (kV 或 kV, DC)			
		Y1	$\Delta 1$	Y2	$\Delta 2$
雷电全波 LI	端 1	2300	1980	1350	1240
	端 2	2300	1980	1350	1240
雷电截波 LIC (型式)	端 1	2530	2175	1485	1360
	端 2	2530	2175	1485	1360
操作波 SI	端 1	—	—	—	—
	端 2	—	—	—	—
	端 1+端 2	2100	1840	1250	1175
交流长时感应+局放	端 1 (U1)	239	414	239	414
	端 1 (U2)	211	365	211	365
交流长时外施+局放	端 1+端 2	1297	987	676	366
直流长时外施+局放	端 1+端 2	1791	1353	914	475
直流极性反转+局放	端 1+端 2	1386	1021	655	289

A. 3 换流变压器套管端子允许载荷

换流变压器套管端子允许载荷见表A. 2。

表A. 2 换流变压器套管端子允许载荷

	水平纵向	水平横向	垂直方向
--	------	------	------

网侧	3000N	2000N	2000N
阀侧	3000N	3000N	3000N
中性点	2000N	2000N	1500N
注：静态安全系数不小于2.5，动态安全系数不小于1.67，至少承受扭矩400N·m。			

A. 4 换流变压器套管电流互感器

换流变压器套管电流互感器的配置及要求跟据工程要求，包括但不限于表A.3。

表A.3 换流变压器套管电流互感器

装设位置	网侧 套管	中性点 套管	阀侧套管							
			Y1 套管		Δ 1 套管		Y2 套管		Δ 2 套管	
数量（组）										
线圈数量 （个）			与 阀 相 连套管	与 中 性 点 相连套管	首 端 套管	尾端 套管	与 阀 相 连套管	与 中 性 点 相连套管	首 端 套管	尾端 套管
准确级	从引出端子至变压器本体分别为：									
电流比										
二次容量										

A. 5 换流变压器阀侧套管末屏电压分压器

换流变压器阀侧套管末屏电压分压器的配置及要求跟据工程要求，包括但不限于表A.4。

表A.4 换流变压器阀侧套管末屏电压分压器

装设位置	阀侧 Y1 套管	阀侧 Δ 1 套管	阀侧 Y2 套管	阀侧 Δ 2 套管
数量				
准确级				
分压比				
二次容量				

A. 6 换流变压器就地控制系统的输入/出信号

A 6.1 换流变压器就地控制系统输入/出信号的配置及要求，应据工程要求，包括但不限于表 A.5 的内容。

表A.5 换流变压器就地控制系统的输入/出信号

换流变压器就地控制系统的输出/输入信号	站控		极控		直流系统 保护输入	TFR 输入	备注
	输	输	输入	输出			

			入	出					
输出信号	开关量	绕组温度高跳闸							信号按相给出
		油温高跳闸							
		换流变重瓦斯							
		分接开关重瓦斯							
		压力释放							
		冷却器全停							
		绕组温度高报警							
		油温高报警							
		换流变轻瓦斯							
		分接开关轻瓦斯							
		冷却器故障							
		电源故障							
		油位高报警							
		油位低报警							
		就地控制回路其它报警							
	模拟量	换流变绕组温度							
		换流变油箱底层油温							
		换流变油箱顶层油温							
		变压器油气体监测							
		换流变网侧套管 CT 电流							
		阀侧 Y 套管 CT 电流							
		阀侧 Δ 套管 CT 电流							
		中性点套管 CT 电流							
	分接头位置	分接开关分接头状态信号（形式为开关量或模拟量或 ASII 码或串口）							
		分接头已调到最高位置							
		分接头已调到最低位置							
		分接头调节中							
输入信号	分接头	分接头上调							
		分接头下调							
	冷却器	投冷却器（按组）							
		切冷却器（按组）							

A 6.2 换流变压器就地控制系统应包括如下功能：

- a) 换流变压器就地控制系统，开关量应采用无源接点，模拟量采用 4mA~20mA 模拟量形式。
- b) 对表 A.5 中所列的信号，应能可靠地送出或接收。所有开关量输出信号均应双套配置，模拟量输出信号则应配置四套，以满足控制保护系统要求。应配置相应的温度传感器、瓦斯继电器、压力释放装置等，包括但不限于如下设备：
 - 1) 温度检测器：若为电阻型，在 25℃时的电阻温度系数为 0.00385，且在 25℃时的电阻值为 100 欧姆，测量误差应小于±2K；若为毛细管型，测量误差应小于±5K。提供油温、油温高报警。

- 2) 绕组温度指示器: 用来指示绕组热点温度同时也用于冷却装置控制。提供绕组温度、绕组温度高报警。
 - 3) 油位指示器: 观察油位的指示器, 指示器应具有最低油位和最高油位报警接点。
 - 4) 压力释放装置: 在油箱压力释放装置上应供给指示释放的接点, 当接点闭合将传送释放信号。
 - 5) 气体继电器: 能够在变压器运行中以轻重瓦斯的报警和跳闸信号反映变压器内部故障。
 - 6) 分接头分接开关气体继电器: 能够在变压器运行中以轻重瓦斯的报警和跳闸信号反映变压器分接开关内部故障。
- c) 换流变压器分接头的就地控制及与远方控制的接口, 包括与极控自动调节和站控的手动调节之间的接口, 并应提供就地/远方控制选择开关或相应的功能。
- d) 冷却器的控制, 包括但不限于如下功能:
- 1) 可手动启动, 包括就地控制及与远方控制的接口;
 - 2) 也可自动启动, 利用绕组温度指示装置的接点来启动控制装置, 使风扇电机运转和停止;
 - 3) 每台风扇电机均应由各自的热过负荷装置保护以防止过负荷和单相运行;
 - 4) 油泵和风扇电机的任何故障均应提供故障指示;
 - 5) 用于每组冷却器电源引线的二台主回路开关应有热过流跳闸元件, 提供过电流和过负荷保护并且还具有反相和断相故障检测能力。
-

行业标准信息服务平台