

DL

# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 2001 — 2019

## 换流变压器现场空载、 负载和温升试验导则

Guide for converter transformer on-site no-load test,  
load test and temperature rise test

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

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 .....                              | 2  |
| 4 符号和名称 .....                              | 2  |
| 5 总则 .....                                 | 2  |
| 6 空载试验 .....                               | 3  |
| 7 负载试验 .....                               | 6  |
| 8 温升试验 .....                               | 8  |
| 附录 A (资料性附录) 剩磁的判断及退磁方法 .....              | 10 |
| 附录 B (资料性附录) 空载试验用高压滤波补偿装置选型 .....         | 11 |
| 附录 C (资料性附录) 现场负载试验补偿电容塔典型设计 .....         | 13 |
| 附录 D (资料性附录) 换流变压器现场空载、负载和温升试验报告基本格式 ..... | 14 |

## 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》给出的规则编写。

本标准由中国电力企业联合委员会提出。

本标准由全国高电压试验标准化分技术委员会（DL/TC 02）归口。

本标准起草单位：国网湖北省电力有限公司电力科学研究院、中国电力科学研究院有限公司、国网河南省电力公司电力科学研究院、电力工业电气设备质量检验测试中心、中国南方电网超高压输电公司、国网陕西省电力公司电力科学研究院、南方电网科学研究院有限责任公司、ABB 重庆变压器有限公司、特变电工股份有限公司新疆变压器厂、保定天威保变电气股份有限公司、西安西电变压器有限责任公司、大唐珙春发电厂、苏州华电电气股份有限公司。

本标准主要起草人：周 凯、汪 涛、郭慧浩、张淑珍、王 伟、王 琦、伍 衡、李晓霞、雷园园、郑含博、吴秋平、姚红阳、董艳超、沈 红、曲光辉、刘晓庄。

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（北京市白广路二条一号，100761）。

# 换流变压器现场空载、负载和温升试验导则

## 1 范围

本标准规定了高压直流输电用油浸式换流变压器（以下简称换流变）进行现场空载、负载和温升试验的方法、试验设备、试验结果判定依据。

本标准适用于 $\pm 800\text{kV}$ 及以下电压等级高压直流输电用单相两绕组换流变现场空载、负载和温升试验。

单相三绕组换流变和 $\pm 1100\text{kV}$ 换流变可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB 1094.1-2013 电力变压器 第1部分：总则

GB 1094.2-2013 电力变压器 第2部分：液浸式变压器的温升

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/T 2900.95-2015 电工术语 变压器、调压器和电抗器

GB/T 7252 变压器油中溶解气体分析和判断导则

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/T 16927.3 高电压试验技术 第3部分：现场试验的定义及要求

GB/T 18494.2-2007 变流变压器 第2部分：高压直流输电用换流变压器

JB/T 501-2006 电力变压器试验导则

## 3 术语和定义

GB/T 2900.95-2015、GB 1094.1-2013和GB 1094.2-2013中界定的以及下列术语和定义适用于本标准。为了方便使用，以下重复列出了某些术语和定义。

### 3.1

**空载损耗** no-load loss

当额定频率下的额定电压（分接电压），施加到一个绕组的端子，其他绕组开路时，所吸取的有功功率。

[GB 1094.1-2013，定义3.6.1]

### 3.2

**空载电流** no-load current

当额定频率下的额定电压（分接电压），施加到一个绕组的端子，其他绕组开路时，流经该绕组线路端子的电流的方均根值。

[GB 1094.1-2013，定义3.6.2]

### 3.3

**负载损耗** load loss

在一对绕组中，当额定电流（分接电流）流经一个绕组的线路端子，且另一绕组短路时，在额定频率和参考温度下所吸取的有功功率，此时其他绕组（如有）应开路。

[GB 1094.1-2013, 定义3.6.3]

### 3.4

**总损耗 total loss**

空载损耗与负载损耗之和。

[GB 1094.1-2013, 定义3.6.4]

### 3.5

**短路阻抗 short circuit impedance**

在额定频率和参考温度下, 一对绕组中某一绕组端子之间的等效串联阻抗  $Z = R + jX(\Omega)$ , 确定此值时, 另一绕组的端子短路, 而其他绕组 (如果有) 开路。

[GB 1094.1-2013, 定义3.7.1]

### 3.6

**温升 temperature rise**

所考虑部件 (部位) 的温度 (例如: 绕组平均温度) 与外部冷却介质温度之差。

[GB 1094.2-2013, 定义3.3]

## 4 符号及名称

本标准中各种变量的符号和名称如下:

$I_1$  —— 额定电流 (A);

$f_1$  —— 额定频率, 即基波频率 (Hz);

$U$  —— 空载试验时方均根值电压表读数 (kV);

$U_{av}$  —— 空载试验时平均值电压表读数 (kV);

$d$  —— 波形校正因数;

$S$  —— 调压电源容量 (kW);

$I_0$  —— 换流变的空载电流 (%);

$S_n$  —— 换流变的额定容量 (kVA)。

$I_x$  —— 频率  $f_x$  下的负载损耗试验电流 (A);

$I_{LN}$  —— 所考虑绕组运行时的负载电流方均根值 (A);

$I_h$  ——  $h$  次谐波的电流 (A);

$I_{eq}$  —— 与绕组在运行中负载损耗等效的负载电流正弦电流方均根值 (A);

$h$  —— 谐波次数;

$U_r$  —— 换流变阀侧额定相电压 (kV);

$P_1$  —— 基波频率下的总负载损耗 (kW);

$P_{WE1}$  —— 基波频率下的绕组涡流损耗 (kW);

$P_{SE1}$  —— 基波频率下结构件 (不包括绕组) 的杂散损耗 (kW);

$P_N$  —— 总运行负载损耗 (kW);

- $f_h$  ——  $h$ 次谐波的频率 (Hz) ;
- $F_{WE}$  —— 绕组中涡流损耗附加系数;
- $F_{SE}$  —— 结构件杂散损耗附加系数;
- $k_h$  —— 电流  $I_h$  与额定电流  $I_1$  的比值;
- $R$  —— 包括内部引线在内的绕组直流电阻 ( $\Omega$ ) ;
- $P_{kt}$  —— 额定电流下的负载损耗 (kW);
- $U_{kt}$  —— 额定电流下的短路电压 (kV);
- $P_{kt}'$  —— 降低电流下测量的负载损耗 (kW);
- $U_{kt}'$  —— 降低电流下测量的短路电压 (kV);

## 5 总则

### 5.1 试验目的

换流变现场开展空载试验、负载试验或温升试验的目的如下:

- 通过测量额定电压下的空载损耗及空载电流,验证这两项指标是否在国家标准或者产品技术协议的允许范围内,检查和诊断换流变磁路中的缺陷。
- 通过测量短路阻抗和负载损耗,验证这两项指标是否在国家标准或产品技术协议内,同时还可以通过试验发现绕组以及漏磁回路结构的缺陷。
- 换流变温升试验是通过确定顶层油温升和绕组平均温升,验证试品在运行状态下所产生的最大总损耗与冷却装置平衡的温度是否符合有关标准的规定。

### 5.2 必要性

以下几种情况下,需在现场开展空载试验、负载试验或温升试验:

- 现场组装的换流变(温升试验有条件时可进行)。
- 现场修复的换流变(如更换或修复铁心以及怀疑变压器磁路存在缺陷时可开展空载试验;更换或修复绕组以及怀疑漏磁回路存在缺陷时可开展负载试验;怀疑换流变存在过热缺陷时可开展温升试验)。
- 必要时。

## 6 空载试验

### 6.1 试验方法

#### 6.1.1 空载试验对换流变和试验现场的要求

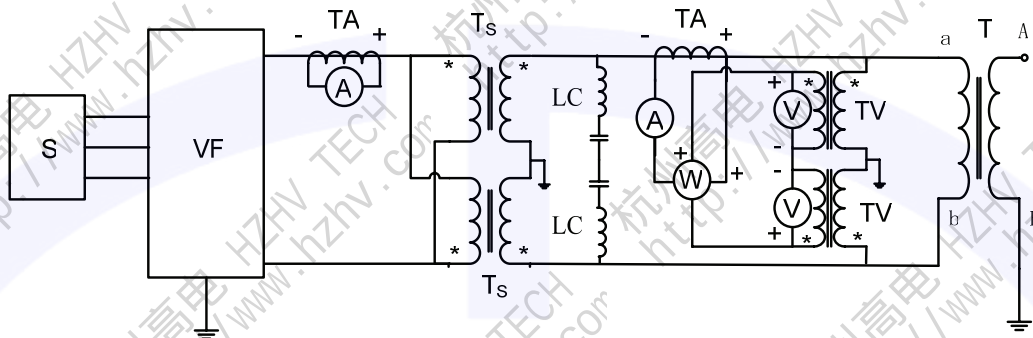
空载试验前换流变和试验现场应满足以下要求:

- 换流变油温应为  $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。
- 空载试验前换流变的变比与极性测量、直流电阻测量、绝缘特性测量、绝缘油试验等常规试验合格。
- 换流变油箱、铁心、夹件及其周围导体应可靠接地。

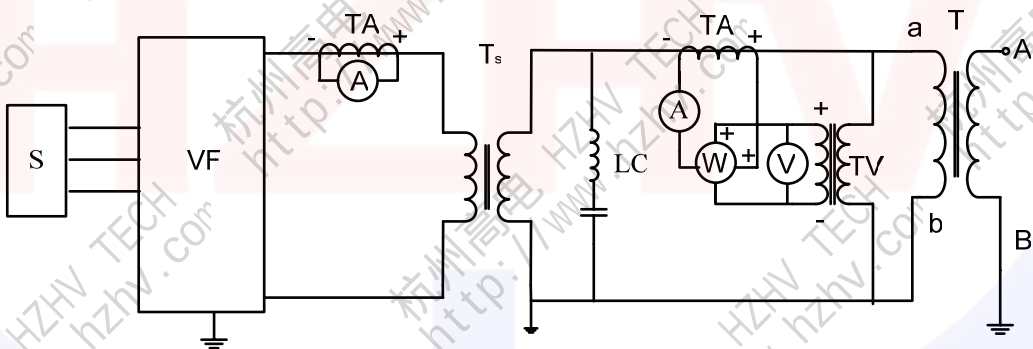
- d) 油经过了充分静置，静置时间按厂家要求。当制造厂无规定时， $\pm 800\text{kV}$  电压等级换流变须静置 96h 以上， $\pm 800\text{kV}$  以下电压等级换流变须静置 72h 以上。
  - e) 试验前应退磁，以消除剩磁对空载试验的影响。
- 注：铁心剩磁的退磁方法及判断方法参见附录 A。

6.1.2 试验接线

换流变现场空载试验接线示意图见图 1。被试换流变的加压侧宜为阀侧，现场空载试验有对称加压和非对称加压两种方式。阀侧绕组为 D 接线方式的换流变宜采用对称加压方式，如图 1a) 所示；阀侧绕组为 Y 接线方式的换流变压器宜采用非对称加压方式，如图 1b) 所示。



a) 对称加压方式接线



b) 非对称加压方式接线

图中：

- S —— 电源；
- VF —— 调压电源；
- Ts —— 升压变压器；
- LC —— 滤波补偿装置；
- T —— 被试换流变压器；
- TA —— 电流互感器；
- TV —— 电压互感器；
- A —— 功率分析仪的电流测量；
- V —— 功率分析仪的电压测量；
- W —— 功率分析仪的功率测量；
- A、B —— 换流变压器网侧绕组首、尾端；
- a、b —— 换流变压器阀侧绕组首、尾端。

图1 换流变压器现场空载试验接线示意图

### 6.1.3 空载试验施加的电压

空载试验施加的电压应满足以下要求：

- 按出厂试验标准开展空载试验时，应依次在  $0.5U_r$ 、 $0.6U_r$ 、 $0.7U_r$ 、 $0.8U_r$ 、 $0.9U_r$ 、 $0.95U_r$ 、 $1.0U_r$ 、 $1.05U_r$ 、 $1.1U_r$  和  $1.15U_r$  的电压下测量空载电流和空载损耗。实际施加的电压与指定测量点可以有偏差，但偏差不宜超过 1%。  
注：现场修复的换流变，空载试验电压及加压程序应由制造厂与用户协商确定。
- 额定电压下的空载损耗测量时，应保证电压波形的总谐波含量  $THDu$  不大于 5%。若  $THDu$  大于 5%，应按照协议确认试验的有效性。
- 空载试验时应使用方均根值电压表与平均值电压表并联。试验电压以平均值电压表读数为准（该电压表的刻度具同一平均值的正弦波方均根值）。
- 若波形校正因数  $d$  的绝对值在 3% 以内，则此试验电压波形满足要求。若  $d$  的绝对值大于 3%，应按照协议确认试验数据的有效性。
- 试验频率应为  $50 \pm 0.5\text{Hz}$ 。
- 空载损耗  $P_0$  应按式 (1) 进行校正：

$$P_0 = P_m (1 + d) \quad (1)$$

式中：

$P_m$  为实测空载损耗；

$$d = (U' - U) / U' \times 100\%$$

## 6.2 试验设备

### 6.2.1 调压电源

调压电源应满足以下要求：

- 调压电源应具有长时稳定工作的能力。
- 现场空载试验用调压电源宜采用大功率变频调压电源。
- 当采用高压大功率变频调压电源作为空载试验的调压电源时，宜在电源的输出端接  $\Gamma$  型滤波器。
- 输出频率应涵盖 50Hz。
- 调压电源的容量应足够大，电源阻抗应足够小，应能保证当空载电流谐波总含量不大于 100% 时，电源输出电压的波形总畸变率不超过 5%。调压电源的容量应不小于换流变空载容量的 10 倍，可通过式 (2) 计算得出：

$$S \geq 0.1 I_0 S_n \quad (2)$$

### 6.2.2 试验变压器

试验变压器应满足以下要求：

- 试验变压器容量应与调压电源容量匹配，低压侧电压应与调压电源输出额定电压相匹配，高压侧应与换流变压器阀侧绕组电压相匹配。
- 用于 D 接换流变对称加压接线法空载试验的两台试验变压器各型号参数宜保持一致，其中任意一台应能够用于 Y 接换流变的空载试验。试验变压器高压侧电压宜为  $1.2U_r$ 。
- 试验变压器的高压侧输出额定电流宜不小于被试换流变压器的  $1.15U_r$  电压下的空载电流。
- 试验变压器的短路阻抗不宜大于 5%。

### 6.2.3 滤波补偿装置

滤波补偿装置的设备选型及使用应满足以下要求：

- a) 当空载电流的谐波含量超过 100%，而调压电源或升压变压器容量有限，无法保证电压波形校正因数在 $\pm 3\%$ 范围内，应考虑采用滤波补偿装置。
- b) 滤波补偿装置是由固定电容器和可调电感串联组成的无源滤波器，其谐振频率为 3 次、5 次等奇次谐波频率，宜同时采用 3 次和 5 次滤波器，必要时可考虑 7 次及以上的奇次谐波滤波器，与试验回路的连接方法如图 1 所示。
- c) 加装谐波滤波器时，应监测升压变压器的低压侧或者高压侧的电流。加装的电流互感器及测量仪表的精度及频率范围应满足 6.2.4 的要求。
- d) 滤波补偿装置中的电容、电感的额定电压、额定电流、工作频率、电感调节范围等参数选择可参考附录 B。

#### 6.2.4 测量用互感器与仪表

测量用互感器与仪表应满足以下要求：

- a) 空载试验应采用不低于 0.02 级的电流及电压互感器。
- b) 宜采用功率分析仪测量。
- c) 空载试验所用功率分析仪等仪表的精度不应低于 0.1 级。功率测量应采用功率因数不大于 0.01 的低功率因数功率表。
- d) 测量仪表应在校验周期内。

#### 6.3 空载试验结果判定依据

空载试验的结果判定依据如下：

- a) 空载损耗值和空载电流符合合同要求，否则应由制造方与用户协商解决。
- b) 应在空载试验前、后各进行一次油中溶解气体色谱分析，色谱分析结果满足 GB/T 7252 的要求且试验前后无明显变化。

注：现场修复的换流变，其空载损耗值由制造方与用户协商确定。

### 7 负载试验

#### 7.1 试验方法

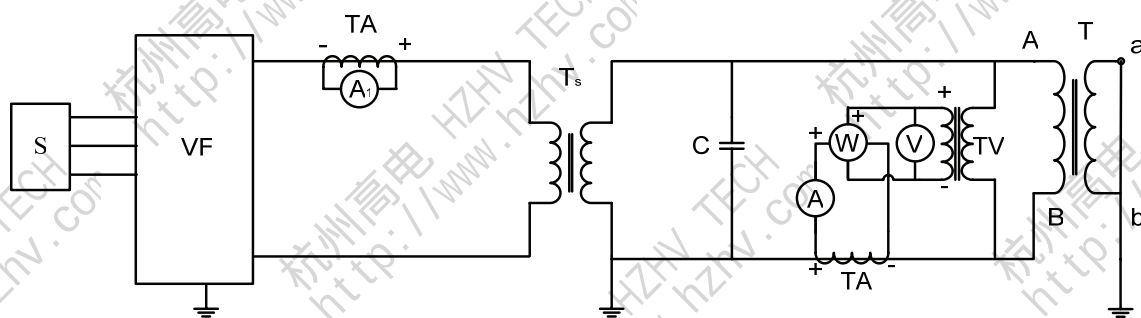
##### 7.1.1 负载试验对换流变和试验现场的要求

负载试验前换流变和试验现场应满足以下要求：

- a) 换流变油温应为  $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。
- b) 负载试验前换流变的变比与极性测量、直流电阻测量、绝缘特性测量、绝缘油试验等常规试验合格。
- c) 换流变油箱、铁心、夹件应可靠接地。
- d) 若需长时间进行负载试验时，应先核算换流变冷却条件是否满足试验要求。

##### 7.1.2 试验接线

负载试验宜在换流变网侧绕组的线端施加电流，阀侧绕组应短路并接地。在试验变压器的高压侧，应并联合适容量的无功补偿电容器。试验接线示意图如图 2 所示。



图中：

- S —— 电源；
- VF —— 调压电源；
- T<sub>s</sub> —— 升压变压器；
- C —— 补偿电容器；
- T —— 被试换流变压器；
- TA —— 电流互感器；
- TV —— 电压互感器；
- A —— 电流表或功率分析仪的电流测量；
- V —— 电压表或功率分析仪的电压测量；
- W —— 瓦特表或功率分析仪的功率测量；
- A、B —— 换流变压器网侧绕组首、尾端；
- a、b —— 换流变压器阀侧绕组首、尾端。

图2 负载试验接线示意图

### 7.1.3 注意事项

为减小测量误差，负载试验中应注意如下事项：

- a) 试验引线及短路连接线应按额定条件考虑线径，不宜过小，对铜质导线，推荐选择电流密度为  $2\text{A}/\text{mm}^2 \sim 3\text{A}/\text{mm}^2$ 。
- b) 电压互感器测量电压的两根引线，应使用绝缘线直接从网侧绕组的两个线端引出，不得就近连接到无功补偿电容器的端部。
- c) 负载损耗的测量应分别在主分接和两个极限分接上进行，并测试短路阻抗。
- d) 为避免绕组发热对试验结果产生明显误差，试验测量宜迅速进行；同时准确记录试验时的平均油温。
- e) 试验接线中所测得的功率包括仪表损耗和线路损耗，当它们达到不容忽略时，应从测量损耗中减去。

### 7.2 试验设备

负载试验设备应满足以下要求：

- a) 负载试验所用的互感器及测量仪表宜与空载试验的共用。
- b) 负载试验所用的调压电源容量以及试验变压器的容量宜不小于被试换流变压器负载损耗的 2 倍。
- c) 负载试验调压电源输出频率应能涵盖 50Hz 和另一不低于 150Hz 的某一频率（宜为 200Hz）。
- d) 补偿电容器组宜采用可移动快装式电容塔，方便运输和拆装，仅需通过改变接线方式，即可获得所需试验参数。补偿电容塔典型设计参见附录 B。

### 7.3 非额定条件下的负载试验

7.3.1 负载损耗及短路阻抗的测量,应在 60%~100%额定电流下进行。当试验电流  $I'$  不等于额定电流  $I_r$  时,可按式 (3) 和式 (4) 将负载损耗和短路电压校正到额定电流。

$$P_{kt} = P_{kt}' \left( \frac{I_r}{I'} \right)^2 \quad (3)$$

$$U_{kt} = U_{kt}' \left( \frac{I_r}{I'} \right) \quad (4)$$

7.3.2 当试验频率不等于额定频率时(其偏差小于 1%),负载损耗可以认为近似相等,短路阻抗按 JB/T 501-2006 中 14.9 条的规定进行折算。

#### 7.4 运行中的负载损耗

7.4.1 为推测运行条件下换流变压器的损耗,要求进行两次损耗测量,一次是在额定频率下进行,另一次是在不低于 150Hz 的某一频率下进行。然后根据测量结果进行计算,推算绕组内、外附加损耗的分布值和推算运行中的负载损耗。

7.4.2 损耗测量方法按 GB 1094.1 中的规定,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。

7.4.3 在两次不同频率  $f_1$  和  $f_X$  及其对应的电流下测得负载损耗  $P_1$  和  $P_X$ ,可用式 (5) 和 (6) 对两个附加损耗分量进行估算。则有:

$$P_1 = RI_1^2 + P_{WE1} + P_{SE1} \quad (5)$$

$$P_X = RI_X^2 + \left( \frac{I_X}{I_1} \right)^2 \left( \frac{f_X}{f_1} \right)^2 P_{WE1} + \left( \frac{I_X}{I_1} \right)^2 \left( \frac{f_X}{f_1} \right)^{0.8} P_{SE1} \quad (6)$$

7.4.4 根据给定的负载电流的谐波频谱来计算实际运行中的负载损耗值,谐波频谱应由用户提供。根据给定的谐波频谱,运行中的负载损耗可作如下计算:

$$P_N = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \times F_{WE} + P_{SE1} \times F_{SE} \quad (7)$$

式中:

$$I_{LN} = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} I_h^2} \quad (\text{至少应计算至 25 次谐波分量});$$

$$F_{WE} = \sum_{h=1}^{25} k_h^2 \times h^2; \quad (k_h = \frac{I_h}{I_1}, h = \frac{f_h}{f_1})$$

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

#### 7.5 负载试验结果判定依据

7.5.1 短路阻抗和负载损耗应折算到参考温度 80℃,折算方法按照 JB/T 501-2006 中 14.4 条和 14.6 条的规定。

7.5.2 负载试验的合格依据如下:

- 计算出的运行中的负载损耗值作为损耗评估的保证值。
- 短路阻抗和运行中的负载损耗保证值应满足标准或合同要求,否则应由制造方与用户协商解决。
- 应在负载试验前、后各进行一次油中溶解气体色谱分析,色谱分析结果满足 GB/T 7252 的要求且试验前后无明显变化。

注：现场修复的换流变，其负载损耗值及短路阻抗值应由制造方与用户协商确定。

## 8 温升试验

### 8.1 温升试验对换流变和试验现场的要求

温升试验前换流变和试验现场应满足以下要求：

- 温升试验应在室内完成，试验的地点应清洁宽敞，在试品周围 3m 内不得有墙壁、热源及外来辐射等干扰。
- 换流变的变比与极性测量、直流电阻测量、绝缘特性测量、绝缘油试验等常规试验合格；且已完成空载损耗、负载损耗和谐波损耗的测量。
- 温升试验时换流变的冷却装置应安装完好，油箱、铁心、夹件应可靠接地。

### 8.2 试验方法

8.2.1 温升试验采用短路法，试验接线方法同负载试验接线方法，接线示意图见图 2。

8.2.2 对于换流变，在确定（通过计算和试验）其油、绕组和其他金属结构件在变压器运行状态下的温度时，应考虑谐波的影响。

8.2.3 换流变温升试验程序应对 GB 1094.2 的规定做如下修改：

- 应根据换流变运行状态下的最大总损耗（包括空载损耗、运行中的负载损耗、直流偏磁损耗和降噪损耗）来确定稳态条件下的顶层油温升。如果试验设备受到限制，可以将施加的损耗降低至不低于规定值的 80%，并应在试验结束时，对本试验所确定的温升进行校正。
- 顶层油温升确定后，继续用与额定运行条件下的负载损耗等效的 50Hz 正弦试验电流进行试验。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。试验结束时应确定绕组的温升。等效试验电流计算方法见式（8）。

$$I_{eq} = I_1 \left( \frac{I_{LN}^2 \times R + F_{WE} \times P_{WE1} + F_{SE} \times P_{SE1}}{I_1^2 \times R + P_{WE1} + P_{SE1}} \right)^{0.5} \quad (8)$$

式中：

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

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

8.2.4 试验程序按照 GB 1094.2-2013 中 7.3 规定；顶层油温升确定方法按照 GB 1094.2-2013 中 7.5 规定；绕组平均温升方法按照 GB 1094.2-2013 中 7.6 规定；绕组热点温升确定方法按照 GB 1094.2-2013 中 7.10 规定；油中溶解气体分析按照 GB 1094.2-2013 中附录 A 规定。

### 8.3 温升试验结果判定依据

温升试验的合格依据如下：

- 顶层油温升和绕组温升满足合同要求，特殊情况下应由制造方与用户协商解决。
- 油箱热点温度不宜过高。
- 应在温升试验前、后各进行一次油中溶解气体色谱分析，色谱分析结果满足 GB/T 7252 的要求且试验前、后无明显变化。

注：现场修复的换流变，其温升限值应由制造方与用户协商确定。



**附录 A**  
**(资料性附录)**  
**剩磁的判断及退磁方法**

**A.1 总则**

换流变可能会由于绕组直流电阻测量等原因造成换流变压器铁心的剩磁。换流变压器铁心剩磁可能导致励磁电流发生畸变和有效值增加，空载损耗也会增加，影响试验测量的准确性。因此有必要在进行换流变空载试验前判定是否存在剩磁，必要时采取退磁措施。

**A.2 换流变压器剩磁的判定**

**A.2.1 低电压空载电流判定法**

铁心剩磁后导致空载电流发生畸变，同样的励磁电压下，空载电流会发生变化。通过测量换流变压器低电压空载电流与出厂试验值比较，可判断换流变铁心剩磁状态。当实测空载电流与出厂值相差不大时则可认为换流变压器铁心无明显剩磁，否则说明换流变压器铁心有明显剩磁。

**A.2.2 励磁特性曲线判定法**

在升压过程中依次记录对应电压的空载电流和空载损耗，在降压过程中再次测量，对比两者结果如果出现一致性偏差（后者比前者总是偏小），则说明存在剩磁。

**A.3 退磁方法**

**A.3.1 交流退磁法**

实验证实，通过对铁心的反复交流励磁可以起到铁心退磁的效果，该方法称交流退磁方法。在试验频率下，将空载试验电压反复由零升高到额定电压左右，然后逐渐降压到零。在此过程中运用励磁特性曲线判定法判断换流变是否仍有剩磁，直至完成退磁。

**A.3.2 直流退磁法**

合适的直流励磁也可以起到铁心退磁的效果，该方法称为直流退磁法。直流去退磁方法需要较为复杂的控制才能保证退磁效果，因此一般需要专用仪器才能完成。目前有专用的变压器铁心直流去退磁装置，部分直流电阻测试仪也具有智能退磁功能。

## 附录 B

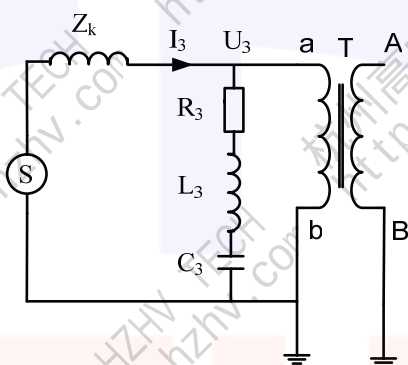
(资料性附录)

## 空载试验用高压滤波补偿装置选型

## B.1 总则

高压滤波补偿装置由固定电容器和可调电感组成，一般需配置三次和五次滤波装置。

下面给出三次滤波装置的选型方法，五次滤波装置选型可参照。高压滤波补偿装置的计算模型如图 B.1。



图中：

S —— 电源；

$Z_k$  —— 升压变压器阻抗；

$R_3$  —— 可调电感的电阻；

$L_3$  —— 可调电感；

$C_3$  —— 固定电容器；

$U_3$  —— 高压三次滤波器承受的三次谐波电压；

$I_3$  —— 被试变压器的三次谐波电流分量；

A、B —— 换流变压器网侧绕组首、尾端；

a、b —— 换流变压器阀侧绕组首、尾端。

图 B.1 高压滤波补偿装置的计算模型

B.2 确定所述高压三次滤波器的电阻  $R_3$ 、电感  $L_3$  和电容  $C_3$ 

三次滤波器的电阻，电感，电容部分可由式 (B.1)、式 (B.2) 和式 (B.3) 确定：

$$\frac{3Z_K}{R_3 + 3Z_K} \times I_3 \times R_3 = U_3 < 3\% \times U_0 \quad (\text{B.1})$$

$$Q = \frac{\omega_0 L_3}{R_3} \quad (\text{B.2})$$

$$3\omega_0 L_3 = \frac{1}{3\omega_0 C_3} \quad (\text{B.3})$$

式中：

$U_0$  —— 被试变压器试验电压的基波分量；

$\omega_0$  —— 为试验电压基波角频率；

Q ——为高压滤波器的品质因数, Q 的取值范围是 40~100, 一般取值 50。

### B.3 固定电容器和可调电感的额定电流 $I_N$ 的确定

固定电容器和可调电感串联使用, 其电流包含基波电流分量和三次谐波电流分量。固定电容器和可调电感的额定电流  $I_N$  由式 (B.4) 和式 (B.5) 确定:

$$I_N = \sqrt{I_0^2 + I_3^2} \quad (\text{B.4})$$

$$I_0 = U_0 / (1/\omega_0 C_3 - \omega_0 L_3) = 9U_0 / 8\omega_0 C_3 \quad (\text{B.5})$$

式中:

$I_3$  ——基波电流分量。

### B.4 固定电容器的额定电压 $U_{LN}$ 和可调电感的额定电压 $U_{CN}$ 的确定

固定电容器和可调电感所承受的电压包含基波分量和三次谐波分量。固定电容器的额定电压  $U_{CN}$  和可调电感的额定电压  $U_{LN}$  可由式 (B.6)、式 (B.7)、式 (B.8) 和式 (B.9) 确定:

$$U_{c3,0} = 1/9 U_{L3,0} = 1/8 U_0 \quad (\text{B.6})$$

$$U_{c3,3} = U_{L3,0} = 3\omega_0 C_3 L_3 \quad (\text{B.7})$$

$$U_{CN} > U_{c3,3} + U_{c3,0} \quad (\text{B.8})$$

$$U_{LN} > U_{L3,3} + U_{L3,0} \quad (\text{B.9})$$

式中:

$U_{c3,0}$  ——固定电容承受的基波电压分量;

$U_{c3,3}$  ——固定电容承受的三次谐波电压分量;

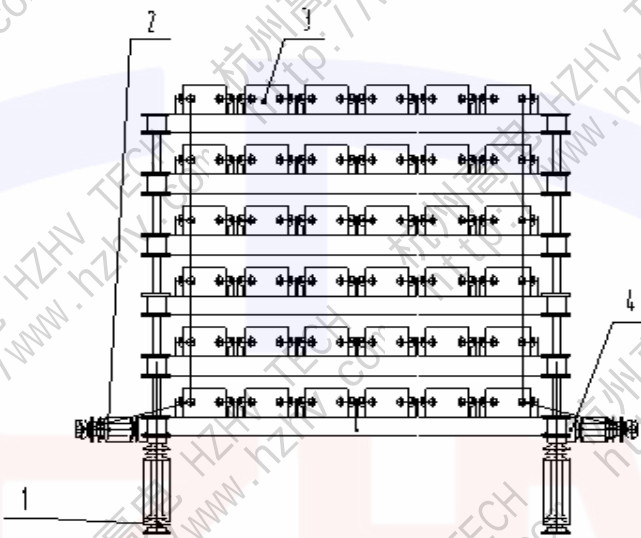
$U_{L3,0}$  ——可调电感承受的基波电压分量;

$U_{L3,3}$  ——可调电感承受的三次谐波电压分量。

附录 C  
(资料性附录)

现场负载试验补偿电容塔典型设计

换流变压器现场负载及温升试验补偿电容塔采用可移动快装式电容塔，方便运输和拆装，仅需通过改变接线方式，即可获得所需试验参数。图 C 给出了补偿电容塔典型设计的结构示意图。该补偿电容塔采用集装箱式外壳，便于运输和使用，可根据不同的试验电压及补偿容量灵活选择所使用电容器数量及接线方式，其中金属支柱可根据情况更换为支柱绝缘子。



- 图中：
- 1—支柱绝缘子
  - 2—支柱绝缘子
  - 3—并联电容器
  - 4—金属支柱

图 C 负载试验补偿电容塔典型设计图

## 附录 D (资料性附录)

### 换流变压器现场空载、负载和温升试验报告基本格式

#### D.1 空载试验报告

空载试验报告基本格式如表D.1所示。

表D.1 空载试验报告

| 一、变压器参数                            |               |                |                     |                     |                          |                          |
|------------------------------------|---------------|----------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| 试品名称                               |               |                | 试品型号                |                     |                          |                          |
| 出厂序号                               |               |                | 额定容量                |                     |                          |                          |
| 额定电压                               |               |                | 额定电流                |                     |                          |                          |
| 联接组别                               |               |                | 冷却方式                |                     |                          |                          |
| 绝缘水平                               |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 二、绝缘试验前空载损耗及空载电流测量 $f=50\text{Hz}$ |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 绕组组施加电压                            |               |                | 空载电流                |                     | 空载损耗                     |                          |
| U (%)                              | 平均值电压 U<br>kV | 有效值电压 U'<br>kV | I <sub>0</sub><br>A | I <sub>0</sub><br>% | 实测值 P <sub>m</sub><br>kW | 校正值 P <sub>0</sub><br>kW |
| 50                                 |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 60                                 |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 70                                 |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 80                                 |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 90                                 |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 95                                 |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 100                                |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 105                                |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 110                                |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 115                                |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 三、绝缘试验后空载损耗及空载电流测量 $f=50\text{Hz}$ |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 100                                |               |                |                     |                     |                          |                          |
| 110                                |               |                |                     |                     |                          |                          |

## D.2 负载试验报告

## D.2.1 负载损耗的测量

负载损耗测量报告基本格式如表D.2所示。

表D.2 负载损耗测量报告

| 容量: ____ MVA |    | 实测值           |         |          | 结果          |           |
|--------------|----|---------------|---------|----------|-------------|-----------|
| 频率: 50 Hz    |    | 平均油温: ____ °C |         |          | 参考温度: 80 °C |           |
| AB/ab        | 分接 | 电压<br>kV      | 电流<br>A | 功率<br>kW | 负载损耗<br>kW  | 阻抗电压<br>% |
|              |    |               |         |          |             |           |
|              |    |               |         |          |             |           |
|              |    |               |         |          |             |           |
| 容量: ____ MVA |    | 实测值           |         |          | 结果          |           |
| 频率: 200 Hz   |    | 平均油温: ____ °C |         |          | 参考温度: 80 °C |           |
| AB/ab        | 分接 | 电压<br>kV      | 电流<br>A | 功率<br>kW | 负载损耗<br>kW  | 阻抗电压<br>% |
|              |    |               |         |          |             |           |
|              |    |               |         |          |             |           |
|              |    |               |         |          |             |           |

## D.2.2 短路阻抗测量（网侧施加电流）

短路阻抗测量报告基本格式如表D.3所示。

表D.3 短路阻抗测量报告

| 频率       | 50Hz      | 油温 ____ °C |                   |
|----------|-----------|------------|-------------------|
| 分接<br>位置 | 实加电流<br>A | 实测电压<br>kV | 短路阻抗 (80 °C)<br>% |
| 1        |           |            |                   |
| 2        |           |            |                   |
| 3        |           |            |                   |
| 4        |           |            |                   |
| 5        |           |            |                   |
| 6        |           |            |                   |
| ..       |           |            |                   |
| ..       |           |            |                   |
| ..       |           |            |                   |
| 最大分接     |           |            |                   |

## D.2.3 运行中负载损耗计算报告

运行中负载损耗计算包括谐波电流计算和总损耗计算。表D. 4和表D. 5分别给出了计算报告格式。

表D. 4 谐波电流及次数

| h  | $I_h$ | $k_h=I_h/I_1$ | $k_h^2 \times h^2$ | $k_h^2 \times h^{0.8}$ | $I_h^2$     |
|----|-------|---------------|--------------------|------------------------|-------------|
| 1  |       |               |                    |                        |             |
| 5  |       |               |                    |                        |             |
| 7  |       |               |                    |                        |             |
| 11 |       |               |                    |                        |             |
| 13 |       |               |                    |                        |             |
| 17 |       |               |                    |                        |             |
| 19 |       |               |                    |                        |             |
| 23 |       |               |                    |                        |             |
| 25 |       |               |                    |                        |             |
| 29 |       |               |                    |                        |             |
| 31 |       |               |                    |                        |             |
| 35 |       |               |                    |                        |             |
| 37 |       |               |                    |                        |             |
| 41 |       |               |                    |                        |             |
| 43 |       |               |                    |                        |             |
| 47 |       |               |                    |                        |             |
| 49 |       |               |                    |                        |             |
|    |       |               |                    |                        |             |
|    |       |               | $F_{WE}$           | $F_{SE}$               | $I_{LN}(A)$ |
|    |       |               |                    |                        |             |

表D. 5 总负载损耗计算

| 分接 | 容量 (MVA) | 损耗 (kW) |       |                   |        | $P_{WEI}(kW)$ | $P_{SEI}(kW)$ |
|----|----------|---------|-------|-------------------|--------|---------------|---------------|
|    |          | $P_I$   | $P_X$ | $P_{WEI}+P_{SEI}$ | $I^2R$ |               |               |
|    |          |         |       |                   |        |               |               |
|    |          |         |       |                   |        |               |               |
|    |          |         |       |                   |        |               |               |

| 分接 | $I_{LN}^2 R_{80^\circ C}$<br>(kW) | $P_{WE1} \times F_{WE} (kW)$ | $P_{SE1} \times F_{SE} (kW)$ | $P_N (kW)$ |
|----|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------|
|    |                                   |                              |                              |            |
|    |                                   |                              |                              |            |
|    |                                   |                              |                              |            |

\*涡流损耗 $P_{WE1}$ 和杂散损耗 $P_{SE1}$ 由下两式解得:

$$P_1 = I_1^2 \times R + P_{WE1} + P_{SE1}$$

$$P_X = R \times I_X^2 + (I_X/I_1)^2 \times (f_X/f_1)^2 \times P_{WE1} + (I_X/I_1)^2 \times (f_X/f_1)^{0.8} \times P_{SE1}$$

### D.3 温升试验报告基本格式

温升试验报告基本格式如表D.6所示。

表D.6 温升试验报告

| 试验条件                           |          |      |     |
|--------------------------------|----------|------|-----|
| 试验容量                           | ___%额定容量 | 试验方法 | 短路法 |
| 冷却类型                           |          | 环境温度 |     |
| 输入端                            |          | 短路端  |     |
| 频率                             |          | 分接位置 |     |
| 试验时间                           |          | 稳定时间 |     |
| 变压器性能数据                        |          |      |     |
| 线圈                             |          | A-B  | a-b |
| 额定容量                           | kVA      |      |     |
| 分接额定电流                         | A        |      |     |
| 80℃运行损耗(包括谐波)                  | kW       |      |     |
| 空载损耗                           | kW       |      |     |
| 直流偏磁损耗和降噪损耗                    | kW       |      |     |
| 总损耗                            | kW       |      |     |
| 绕组温升等效电流                       | A        |      |     |
| 测量结果                           |          |      |     |
| 线圈                             |          | A-B  | a-b |
| 顶层油温升                          | K        |      |     |
| 绕组平均温升                         | K        |      |     |
| 绕组热点温升                         | K        |      |     |
| 油箱热点温升                         | K        |      |     |
| 注: 开___个油泵和___个风扇, 风机转速___转/分。 |          |      |     |