

ICS 29.180
CCS K 41

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 2293—2021

电力变压器现场空负载试验导则

Field test guide for no-load loss and load loss of power transformer

2021-04-26 发布

2021-10-26 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 一般要求	2
4.1 试验时机	2
4.2 试验顺序	2
4.3 试验环境	2
5 测量系统	2
5.1 总体要求	2
5.2 仪器仪表要求	2
6 试验电源	3
7 空载试验	3
7.1 试验准备	3
7.2 单相变压器	3
7.3 三相变压器	4
7.4 三相变压器分相试验	6
7.5 非额定工况校正	6
7.6 结果修正	7
8 负载试验	7
8.1 试验准备	7
8.2 单相变压器	7
8.3 三相变压器	8
8.4 三相变压器分相试验	9
8.5 三(多)绕组变压器	10
8.6 非额定工况校正	10
8.7 结果修正	11
9 试验结果判别	11
附录 A (资料性) 剩磁的判断及退磁方法	12
附录 B (资料性) 滤波补偿装置选型方法	13
附录 C (资料性) 试验报告模板	15

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由电力行业电力变压器标准化技术委员会（DL/TC 02）归口。

本文件起草单位：国网河南省电力公司电力科学研究院、国家电网有限公司直流技术中心、电力工业电气设备质量检验检测中心、中国电力科学研究院有限公司、国网电力科学研究院有限公司、国网江苏省电力公司电力科学研究院、国网湖北省电力公司电力科学研究院、国网山西省电力公司电力科学研究院、国网山东省电力公司电力科学研究院、广州供电局有限公司电力试验研究院、国家中低压输配电设备质量监督检验中心、西安西电变压器有限责任公司特变电工衡阳变压器有限公司、特变电工新疆变压器厂、广州西门子变压器有限公司、特变电工股份有限公司、特变电工沈阳变压器集团有限公司、重庆 ABB 变压器有限公司、江苏大唐国际吕四港发电有限责任公司、马鞍山当涂发电有限公司、大唐淮南洛河发电厂、大唐阳城发电有限责任公司、阳城国际发电有限责任公司、苏州工业园区海沃科技有限公司。

本文件主要起草人：王伟、赵磊、付超、郭慧浩、张淑珍、蔚超、鲁非、杨罡、王学磊、汪可、朱璐、李予全、何东升、姚伟、郭强、邹宇星、虞金华、吕晓东、贾贺强、刘丰、王烈钧、刘勇、路远进、宋承桓、梁峻伟、寇海荣、盛志平。

本文件为首次发布。

本文件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）。

电力变压器现场空负载试验导则

1 范围

本文件规定了电力变压器进行现场空载试验和负载试验的方法、仪器设备及试验结果判别等内容。

本文件适用于 6 kV 及以上电压等级的电力变压器。

换流变压器和 6 kV 以下电压等级的电力变压器可参照执行。

本文件不适用于低电压下的空负载损耗试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1094.1—2013 电力变压器 第 1 部分：总则

GB/T 2900.95—2015 电工术语 变压器、调压器和电抗器

JB/T 501—2006 电力变压器试验导则

3 术语和定义

GB/T 1094.1—2013、GB/T 2900.95—2015 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了某些术语和定义。

3.1

空载功率因数 no-load power factor

空载试验时，施加在变压器上的有功功率与视在功率的比值。空载功率因数 $\cos\varphi_0$ 可由公式（1）估算：

$$\cos\varphi_0 = 100\% \times P_{0e} / (I_0 S_r) \quad (1)$$

式中：

P_{0e} ——额定空载损耗，kW；

I_0 ——额定空载电流百分数；

S_r ——变压器额定容量，kVA。

3.2

负载功率因数 load power factor

负载试验时，施加在变压器上的有功功率与视在功率的比值。负载功率因数 $\cos\varphi_f$ 可由公式（2）估算：

$$\cos\varphi_f = 100\% \times P_{ke} / (S_r Z_{ke}) \quad (2)$$

式中：

P_{ke} ——额定负载损耗，kW；

Z_{ke} ——额定短路阻抗百分数。

3.3

绕组的额定电压 rated voltage of a winding

U_r

在处于主分接的带分接绕组的端子间或不带分接的绕组端子间，指定施加的电压或空载时感应出的电压。

对于三相绕组，是指线路端子间的电压；对于拟联结成星型三相组的单相变压器或接到线路与中性点之间的单相变压器，用相-相电压除以 $\sqrt{3}$ 来表示额定电压；对于要接到网络相间的单相变压器，用相-相电压表示额定电压。

[来源：GB/T1094.1—2013，3.4.3，有修改]

4 一般要求

4.1 试验时机

试验时机要求如下：

- a) 变压器质量监督要求开展现场抽检时。
- b) 解体运输式变压器现场组装后交接时。
- c) 变压器现场解体修复后交接时。
- d) 怀疑变压器存在缺陷时。
- e) 必要时。

4.2 试验顺序

试验应在绕组连同套管的绝缘电阻、铁心及夹件绝缘电阻、绕组直流电阻、电压比、绕组连同套管的介质损耗及电容量、绝缘油试验等试验均合格后方可进行。

4.3 试验环境

试验应在天气良好、环境温度为 $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、空气相对湿度不高于85%下进行。

5 测量系统

5.1 总体要求

测量系统主要包括互感器、电压表、电流表、功率测量仪等仪器仪表，测量仪器应当经过国家计量认证机构检验合格，并在规定的有效期内使用。

5.2 仪器仪表要求

5.2.1 对于空（负）载功率因数大于0.1的变压器，测量仪器仪表要求如下：

- a) 互感器精度不低于0.2级；
- b) 电压表、电流表精度不低于0.2级；
- c) 功率测量仪器精度不低于0.5级，功率因数范围与被试变压器空（负）载功率因数匹配。

5.2.2 对于空（负）载功率因数大于0.02但不大于0.1的变压器，测量仪器仪表要求如下：

- a) 互感器精度不低于0.01级；
- b) 电压表、电流表的最大允许误差为 $\pm 0.03\%$ ；
- c) 功率测量仪器精度不低于0.5级，功率因数范围与被试变压器空（负）载功率因数匹配。

5.2.3 对于空（负）载功率因数不大于0.02的变压器，测量仪器仪表要求如下：

- a) 互感器精度不低于0.01级；
- b) 电压表、电流表测量的最大允许误差为 $\pm 0.03\%$ ；
- c) 功率测量仪器相位差测量的最大允许误差为 $\pm 0.15^{\circ}$ ，功率因数范围与被试变压器空（负）载功率因数匹配。

6 试验电源

6.1 为保证空载试验时的电压波形要求，同时考虑到满足负载试验要求，电源装置容量 S 不宜小于被试变压器空载损耗的 5 倍，可按公式 (3) 进行估算：

$$S = 5 \times S_0 \times I_0 / 100 \quad (3)$$

6.2 励磁变压器（中间变压器）容量不宜小于电源装置容量的 1.15 倍，短路阻抗不宜大于 5%。

6.3 试验电源输出三相电压时，电压不平衡度不宜超过 2%，不应超过 5%。

6.4 试验电源频率与变压器额定频率一致，频率偏差不应大于 0.5%，试验电源电压波形中的谐波含量不应大于 5%，由公式 (4) 确定的电压波形校正因数 d 应在 $\pm 3\%$ 范围内：

$$d = (U' - U) / U' \quad (4)$$

式中：

U ——方均根值电压，kV；

U' ——平均值电压，kV。

7 空载试验

7.1 试验准备

- 7.1.1 110 kV 及以上电压等级油浸式变压器试验前、后应分别取油样开展油中溶解气体分析。
- 7.1.2 应测量被试变压器温度、环境温度与湿度。
- 7.1.3 试验时如果施加电压的绕组是带有分接的，则分接开关应处于主分接位置。
- 7.1.4 试验前宜先对变压器退磁，方法参见附录 A。
- 7.1.5 如有开口三角形连接绕组，试验时应使其闭合并接地。
- 7.1.6 试验时被试变压器的中性点、铁心、夹件、油箱（外壳）等均应可靠接地。
- 7.1.7 三相变压器空载损耗测量采用功率表时，宜使用三表法接线，以减小测量误差。
- 7.1.8 当被试变压器容量较大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 d 在 $\pm 3\%$ 范围内时，应在试验回路中增加滤波补偿装置，选型方法参见附录 B。
- 7.1.9 现场空载试验的报告模板参见附录 C 中表 C.1。

7.2 单相变压器

7.2.1 试验接线

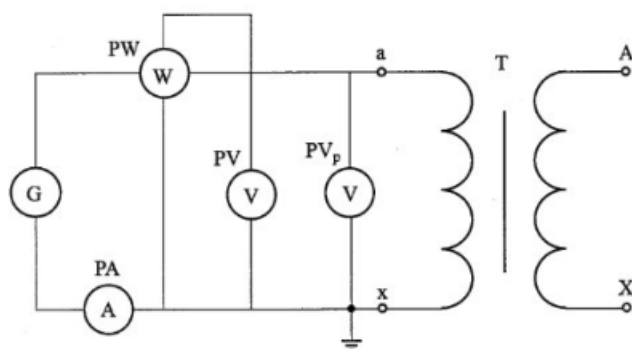
试验时从被试变压器一侧绕组（通常选取低压绕组）线端施加额定频率的对称正弦波电压，其余绕组开路。对于低压绕组电压为 1000 V 以下的单相变压器，试验接线如图 1 所示；对于低压绕组电压为 1000V 及以上的单相变压器，试验接线如图 2 所示。

7.2.2 试验要求

试验要求如下：

- a) 试验应在不大于 $0.3U_r$ 下接通电源，并与测量配合迅速、平稳升高电压。分别在 $0.9U_r$ 和 $1.0U_r$ 下，待各项试验数据稳定后，测量并记录试验电压平均值、电压有效值、空载电流、空载损耗、谐波含量、铁心接地电流、夹件接地电流等数据。试验完毕后应将电压迅速降至试验电压的 $1/3$ 以下，然后切断电源。
- b) 如有必要记录其他电压下的各项试验数据。

- c) 整个试验过程应持续监视试验电源电压、电流波形，在试验电压不大于 $1.0U_r$ 时，应保证电压波形中的谐波含量不大于 5%，电压波形校正因数 d 在 $\pm 3\%$ 范围内。
- d) 当电压波形存在畸变，即平均值电压与方均根值电压不同时，试验电压应以平均值电压为准。



说明：

G —— 电源；

PW —— 功率测量仪；

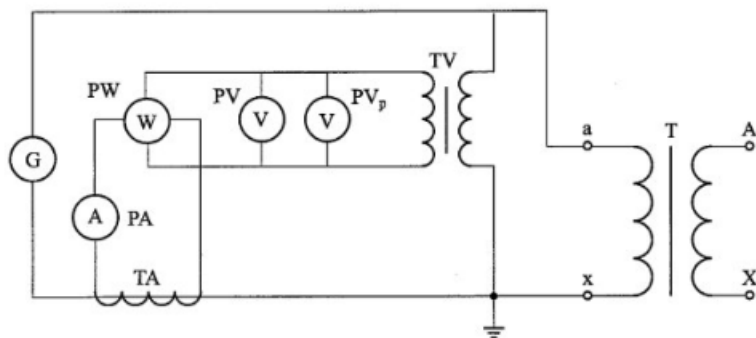
PV —— 电压表；

PV_p —— 平均值电压表；

PA —— 电流表；

T —— 被试变压器（下同）。

图 1 单相变压器空载损耗及空载电流试验接线图（不使用互感器）



说明：

TV —— 电压互感器；

TA —— 电流互感器。

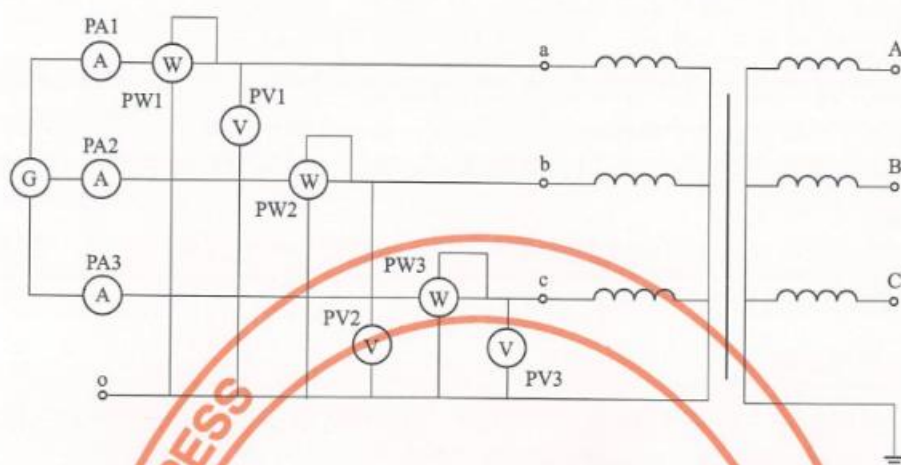
图 2 单相变压器空载损耗及空载电流试验接线图（使用互感器）

7.3 三相变压器

7.3.1 试验接线

试验时从被试变压器一侧绕组（通常选取低压绕组）线端施加额定频率的对称正弦波电压，其余绕组开路。从 D 或 Y 联结绕组励磁时，电压应在各相端子间测量；从 YN 或 ZN 联结绕组励磁时，电

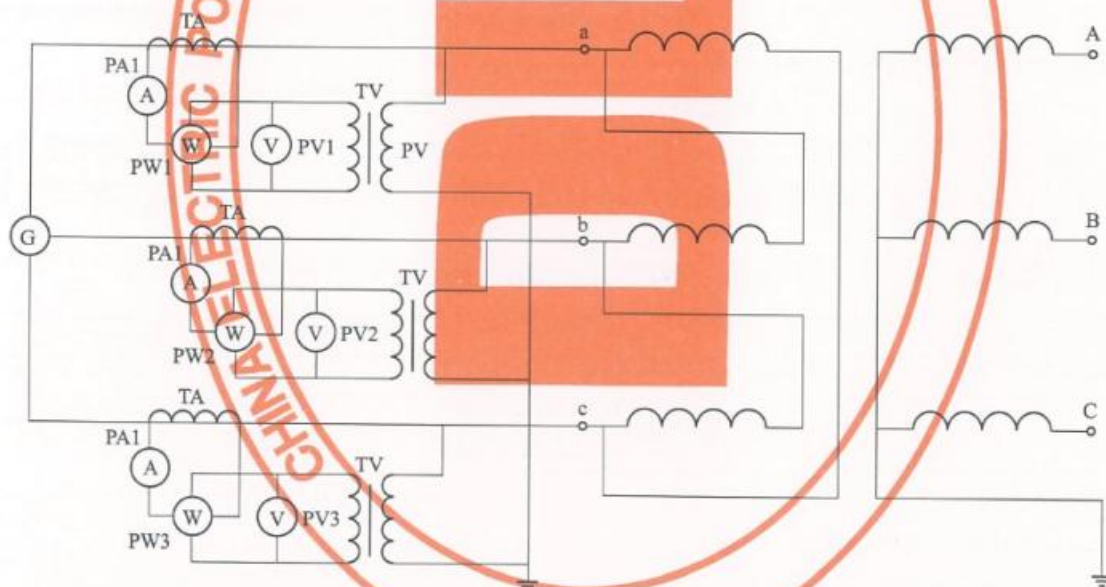
压应在相和中性点端子间测量。试验接线如图 3、图 4 所示。



注：此图为 YN 或 ZN 联结绕组励磁。

电压表 PV 兼具方均根值及平均值测量功能。

图 3 三相变压器空载损耗及空载电流试验接线图（不使用互感器）



注：此图为 D 或 Y 联结绕组励磁。

电压表 PV 兼具方均根值及平均值电压测量功能。

图 4 三相变压器空载损耗及空载电流试验接线图（使用互感器）

7.3.2 试验要求

试验要求如下：

- a) 试验应在不大于 $0.3U_r$ 下接通电源，并与测量配合迅速、平稳升高电压。分别在 $0.9U_r$ 和 $1.0U_r$ 下，待各项试验数据稳定后，测量并记录试验电压平均值、电压有效值、空载电流、空载损耗、谐波含量、铁心接地电流、夹件接地电流等数据。试验完毕后应将电压迅速降至试验电压的 $1/3$ 以下，然后切断电源。

- b) 如有必要记录其他电压下的各项试验数据。
- c) 整个试验过程应持续监视试验电源电压、电流波形, 在试验电压不大于 $1.0U_r$ 时, 应保证电压波形中的谐波含量不大于 5%, 电压波形校正因数 d 在 $\pm 3\%$ 范围内。
- d) 当电压波形存在畸变, 即平均值电压与方均根值电压不同时, 试验电压应以平均值电压为准。
- e) 试验过程中三相电压不平衡度小于等于 2% 时, 以三个线电压的平均值为准施加电压; 当三相电压不平衡度大于 2% 小于 5% 时, 分别以 a-b、b-c、c-a 为准施加电压, 试验数据取三次试验的平均值。
- f) 空载电流是流经三相端子电流的算术平均值, 当采用功率表测量损耗时, 空载损耗是三功率表的代数和。

7.4 三相变压器分相试验

7.4.1 当对三相变压器某一相的空载损耗有怀疑时, 或者缺乏必要设备无法同时对三相变压器进行空载试验时, 可进行单相空载试验, 试验过程按 7.3.2 执行。

7.4.2 当励磁绕组为三角形联结时, 施加电压 $U=U_r$, 分三次试验: a-b 两端施加电压, b-c 两端短路, 测量空载损耗 P_{0ab} 和空载电流 I_{0ab} ; b-c 两端施加电压, a-c 两端短路, 测量空载损耗 P_{0bc} 和空载电流 I_{0bc} ; a-c 两端施加电压, a-b 两端短路, 测量空载损耗 P_{0ac} 和空载电流 I_{0ac} 。

总空载损耗可按公式 (5) 计算:

$$P_0 = (P_{0ab} + P_{0ac} + P_{0bc}) / 2 \quad (5)$$

空载电流百分数可按公式 (6) 计算:

$$I_0 = 0.289 \times (I_{0ab} + I_{0bc} + I_{0ac}) / I_r \times 100\% \quad (6)$$

7.4.3 当励磁绕组为星形联结时, 施加电压 $U=2U_r/\sqrt{3}$, 分三次试验: 从 a-b 两端施加电压, c-0 短路, 测量 P_{0ab} 和 I_{0ab} ; 从 b-c 两端施加电压, a-0 短路, 测量 P_{0bc} 和 I_{0bc} ; 从 a-c 两端施加电压, b-0 短路, 测量 P_{0ac} 和 I_{0ac} 。

总空载损耗可仍按公式 (5) 计算; 空载电流百分数可按公式 (7) 计算:

$$I_0 = 0.33 \times (I_{0ab} + I_{0bc} + I_{0ac}) / I_r \times 100\% \quad (7)$$

7.4.4 试验数据中 $P_{0ac} = K_p P_{0ab} = K_p P_{0bc}$, 其中 K_p 是由铁心的几何尺寸决定的参数, 可按照公式 (8) 计算:

$$K_p = \frac{H + 2M_0(S_1/S_2)}{H + M_0(S_1/S_2)} \quad (8)$$

式中:

H ——被试变压器铁心窗高, mm;

M_0 ——被试变压器铁心柱中心距离, mm;

S_1 ——被试变压器铁心柱截面积, cm^2 ;

S_2 ——被试变压器铁轭截面积, cm^2 。

三次测量的空载数据不符合以上规律 ($P_{0ac} = K_p P_{0ab} = K_p P_{0bc}$) 时, 变压器磁路中可能存在局部缺陷。

注 1: K_p 计算值仅供参考, 应以原始出厂数据作为判断依据。

注 2: 三相五柱式变压器进行单相空载试验时铁心柱中的磁通是额定磁通, 但上下铁轭及旁轭中的磁通并非额定磁通, 三次单相空载试验时铁轭及旁轭中的磁通是变化的, 不能由三次单相空载的试验结果得到变压器的空载损耗。

7.5 非额定工况校正

7.5.1 当电压波形校正因数 d 在 $\pm 3\%$ 范围内时, 空载损耗应按公式 (9) 进行校正:

$$P_0 = P_m(1+d) \dots\dots\dots (9)$$

式中:

P_0 ——校正后的空载损耗, kW;

P_m ——实测空载损耗, kW。

7.5.2 当电压波形校正因数 d 超出 $\pm 3\%$ 范围时, 应按事先商定的协议确认试验的有效性。

7.5.3 空载损耗可不作温度校正。

7.6 结果修正

7.6.1 空载试验时仪表损耗和线路损耗会对结果造成影响, 当其不能忽略时应从测量损耗中扣除。

7.6.2 仪表损耗包括电压表和功率测量仪器的电压线圈以及电压互感器等测量仪器仪表的损耗, 仪表损耗可使用相同的试验线路, 断开试品, 施加试品额定电压, 直接由功率测量仪器读取。

7.6.3 空载试验时如测量电压取自试品, 测量功率中没有线路损耗。如测量电压通过互感器取得, 应扣除线路损耗, 线路损耗可采用下列计算方法:

- a) 断开试品、将试验线路的端部短路, 施加三相试验电流的平均值, 从功率测量仪器读取;
- b) 试验电流的二次方与三相试验线路的电阻进行乘积得出。

8 负载试验

8.1 试验准备

8.1.1 试验前、后对油浸式变压器应分别取油样开展油中溶解气体分析。

8.1.2 油浸式变压器液体温度及绕组温度应接近环境温度, 测量顶层液体温度和底部液体温度, 两者之差不宜超过 5 K, 以其平均值作为液体平均温度, 绕组温度认为与液体平均温度相同。干式变压器内部温度传感器测得的绕组温度与环境温度相差不大于 2 °C。

8.1.3 试验时如果施加电压的绕组是带有分接的, 则各相应处于同一分接位置。

8.1.4 短路阻抗和负载损耗应在主分接测量, 对于调压范围超过 $\pm 5\%$ 的变压器还应测量两个极限分接的数据。

8.1.5 试验前应测量绕组直流电阻, 测量过程中应记录绕组端子温度、绕组温度等数据; 测量中应注意将自感效应的影响降到最低程度。

8.1.6 电压互感器测量电压的两根引线, 应使用绝缘线从施加电压的两个线端直接引出。

8.1.7 短路连接排截面积不宜小于引出线端子截面积, 电流密度宜选择 $2 \text{ A/mm}^2 \sim 3 \text{ A/mm}^2$ 。

8.1.8 当被试变压器容量较大而试验电源或升压变压器容量有限时, 应在试验回路中增加电容补偿装置。

8.1.9 现场负载试验报告模板参见附录 C 中表 C.2。

8.2 单相变压器

8.2.1 试验接线

试验时将被试绕组中的低压绕组短路, 从高压绕组施加额定频率的正弦波电流, 非被试绕组开路。负载试验的测量线路接线与空载试验相同, 如图 5、图 6 所示。如采用功率分析仪等专用仪器, 接线方法按照仪器说明书进行。测量中无须进行电压波形校正。

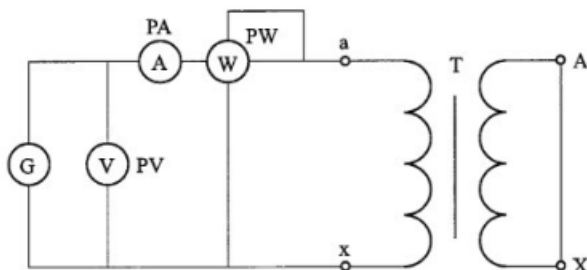


图5 单相变压器短路阻抗和负载损耗试验接线图（不使用互感器）

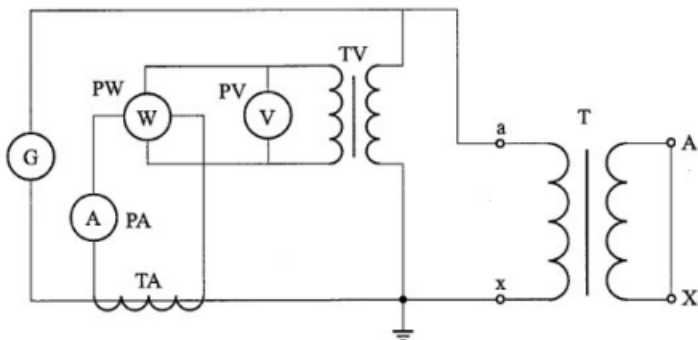


图6 单相变压器短路阻抗和负载损耗试验接线图（使用互感器）

8.2.2 试验要求

试验要求如下：

- 从不超过 10% 额定电流下尽可能迅速地升至额定电流，如受现场试验条件限制，则至少应升至 50% 额定电流，分别记录电压有效值、负载电流、负载损耗、谐波含量、变压器油温、绕组温度等数据。试验完成后应将电流迅速降到零。
- 不同容量的绕组间测量时，施加电流应以较小容量的额定电流为准，试验结果中负载损耗应注明容量，短路阻抗应折算到大容量一侧。

8.3 三相变压器

8.3.1 试验接线

试验时一般将被试绕组中的低压绕组短路，从高压绕组施加额定频率的正弦波电流，非被试绕组开路。负载试验的测量接线与空载试验相同，接线示意图如图 7、图 8 所示，图 8 为使用互

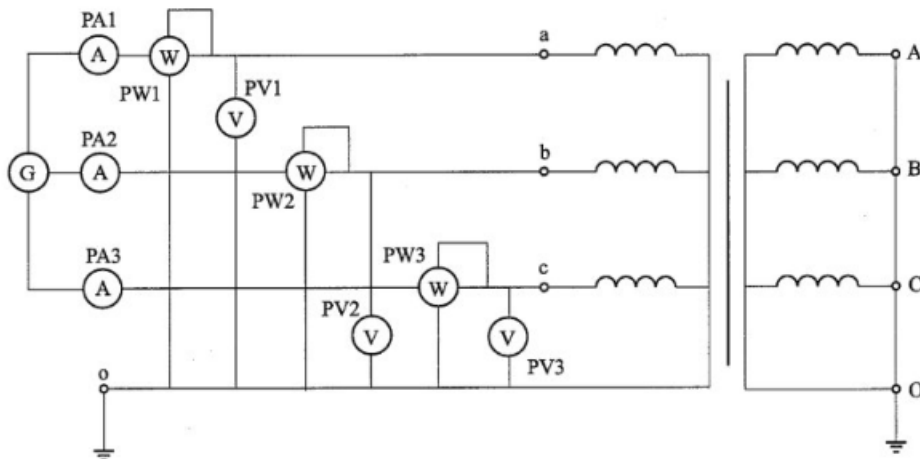


图7 三相变压器短路阻抗和负载损耗试验接线图（不使用互感器）

传感器的接线方式。如采用功率分析仪等专用仪器，接线方法按照仪器说明书进行。测量中无须进行电压波形校正。

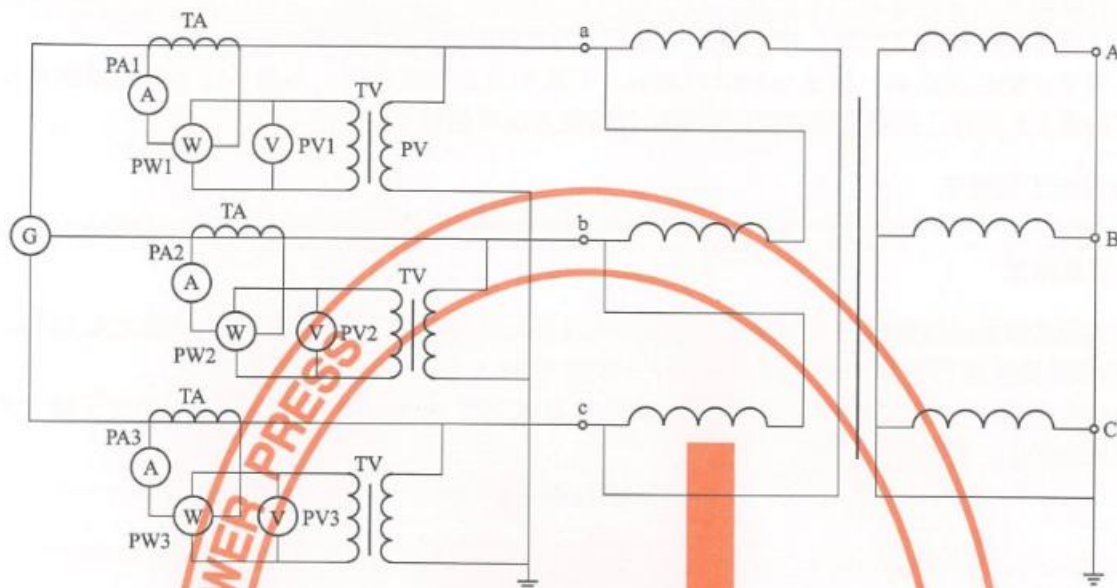


图8 三相变压器短路阻抗和负载损耗试验接线图（使用互感器）

8.3.2 试验要求

试验要求如下：

- 从不超过 10% 额定电流下尽可能迅速地升至额定电流，如受现场试验条件限制，则至少应升至 50% 额定电流，分别记录试验电压有效值、负载电流、负载损耗、谐波含量、变压器油温、绕组温度等数据。试验完成后应将电流迅速降到零。
- 短路阻抗测量时应以三相电流的算术平均值为准，不同容量的绕组间测量时，施加电流应以较小容量的额定电流为准，试验结果中负载损耗应注明容量，短路阻抗应折算到大容量一侧。

8.4 三相变压器分相试验

8.4.1 对三相变压器绕组是否存在缺陷及产品结构合理性存在怀疑时，作为诊断性试验，可以对三相变压器进行单相负载试验，试验接线可参照 8.2.1，试验过程按 8.2.2 执行。

8.4.2 当施加电压侧绕组为 YN 联结、另一侧为 yn 或 d 联结时，可以轮流在一个相绕组（例如 AO、BO、CO）施加额定电流（施加电流不应超出中性点引出线实际载流能力），而另一侧三相短路，三次测量的阻抗压降平均数乘以 $\sqrt{3}$ 就等于三倍的压降，三次负载损耗之和应相当于三相测量的负载损耗。

8.4.3 当施加电压侧绕组为 Y 联结、另一侧为 y 或 d 联结时，可轮流在每个双相上（例如 A、B 之间）施加额定电流，而另一侧三相短路，依次测量阻抗压降和负载损耗；允许将单次测量的结果换算到三相数据，其阻抗压降应乘以 $\sqrt{3}/2$ ，总的负载损耗应为三次负载损耗之和的一半。

8.4.4 当施加电压侧绕组为 D 联结、另一侧为 yn、y 或 d 联结时，可轮流在供电侧每个双相上施加 $\sqrt{3}/2$ 额定电流，依次短路一相线圈（例如 A、B 之间施加电流，B、C 之间短接），另一侧绕组三相短路，依次测量阻抗压降和负载损耗；允许将单次测量的结果换算到三相数据，其阻抗压降等于三次测量的平均数，其负载损耗等于三次负载损耗之和的一半。

8.4.5 独立绕组的三个单相绕组的负载损耗应基本相等；自耦联结绕组的三个单相绕组，一般 B 相的负载损耗较其他两相略大。

8.5 三（多）绕组变压器

8.5.1 负载损耗和短路阻抗通常是指一对绕组的负载损耗和短路阻抗。三绕组变压器其短路阻抗及负载损耗应在成对的绕组间测量，并计算出各绕组对的短路阻抗和负载损耗。

8.5.2 对于多绕组变压器，绕组也应成对选取，其原则与三绕组相同。单相多绕组变压器试验及测量方法可按照 8.2 执行，三相多绕组变压器试验及测量方法可按照 8.3 执行。

8.6 非额定工况校正

8.6.1 短路阻抗

当试验电流无法达到额定电流时，首先按公式（10）计算电阻温度换算系数，再按公式（11）、公式（12）对短路阻抗进行折算并校正到 JB/T 501—2006 中 14.4 表 10 所列的参考温度。

额定容量 100 MVA 及以上或额定电压 220 kV 及以上或 $\cos\varphi_f$ 小于 0.2 的大型电力变压器，其阻抗受温度影响较小，可不进行校正。

$$K_t = (T + \theta) / (T + t) \quad (10)$$

$$Z_{kt} = \frac{U_{kt}}{U_r} \times \frac{I_r}{I_k} \times 100 \quad (11)$$

$$Z_k = \sqrt{Z_{kt}^2 + \left(\frac{P_{kt}}{10S_r} \right)^2 \times (K_t^2 - 1)} \quad (12)$$

式中：

K_t ——电阻温度换算系数；

T ——常数，铜为 235，铝为 225；

θ ——参考温度，℃；

t ——绕组温度，℃。

Z_{kt} ——绕组温度为 t ℃时的短路阻抗，%；

U_{kt} ——绕组温度为 t ℃时通过电流 I_{kt} 时的短路电压，kV；

U_r ——施加电压侧的额定电压，kV；

I_r ——施加电压侧的额定电流，A；

I_k ——施加电压侧的实际电流，A；

Z_k ——参考温度时的短路阻抗，%；

P_{kt} —— t ℃时的负载损耗值，W；

S_r ——额定容量，kVA。

短路阻抗也可采用每相欧姆数表示，也应校正到参考温度，可按公式（13）计算：

$$Z_i = \frac{Z_k U_r^2}{100 S_r} \quad (13)$$

式中：

Z_i ——短路阻抗，Ω；

U_r ——施加电压侧的额定电压，kV；

S_r ——绕组的额定容量，kVA；

Z_k ——参考温度下绕组的短路阻抗，%。

8.6.2 负载损耗

试验电流未达额定电流时，首先按公式（14）将试验电流下的负载损耗 P_1 校正到额定电流工况下

的负载损耗 P_2 。

$$P_2 = \left(\frac{I_r}{I_k} \right)^2 \times P_1 \dots\dots\dots (14)$$

式中：

I_r ——施加电压侧的额定电流，A；

I_k ——施加电压侧的实际电流，A。

环境温度下负载损耗换算到参考温度的方法详见 GB/T 1094.1—2013 附录 G。

8.7 结果修正

8.7.1 仪表损耗包括电压表和功率测量仪器的电压线圈以及电压互感器等测量仪器仪表的损耗，仪表损耗可使用相同的试验线路，断开试品，施加电压等于被试变压器达到额定短路电流时所加的电压，直接由功率测量仪读取。

8.7.2 线路损耗的数值可以从以下两种方法之一求得：

- a) 断开试品、将试验线路的端部短路，施加试验电流，从功率测量仪器读取。
- b) 用试验电流的二次方与三相试验线路的电阻相乘得出。

8.7.3 大型变压器低压侧短路电流大，由短路连接引入的电阻损耗应在试验结果中加以校正。

9 试验结果判别

9.1 空载及负载损耗以订货合同或技术协议中的约定为准。如技术协议或订货合同无明确要求，各项试验数据应符合相关标准的要求。

9.2 作为诊断性试验，对于单相变压器的相间和三相变压器的两个边相空载电流差异不应超过 10%；对于单相变压器的相间和三相变压器的两个边相空载损耗差异不应超过 10%；测量结果与历次相比，不应有明显差异。

9.3 作为诊断性试验，对于不同容量及电压等级的变压器，短路阻抗要求分别如下：

- a) 额定容量 100 MVA 以上或额定电压 220 kV 及以上变压器，初值差不超过 ±1.6%；三相之间的最大相对互差不应大于 2%。
- b) 其余容量及电压等级变压器，初值差不超过 ±2%；三相之间的最大相对互差不应大于 2.5%。

注：初值差定义为（当前测量值—初值）/初值×100%。初值指代表状态量原始值的试验值。初值可以是出厂值、交接试验值、早期试验值、更换主要部件或解体性检修之后的首次试验值等。

9.4 空载、负载试验前后油中溶解气体含量数据应无明显差别。

附录 A

(资料性)

剩磁的判断及退磁方法

A.1 剩磁的判断

A.1.1 低电压空载电流判断法

铁心剩磁会导致空载电流发生畸变,通过比较低电压空载电流测量值与出厂试验值之间的差异,可判断铁心内剩磁状态。当实测空载电流与出厂值相差不大时,可认为变压器铁心无明显剩磁,否则怀疑变压器铁心存在明显剩磁,需进行退磁操作。

A.1.2 升压、降压过程损耗对比判断法

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,如果降压过程中的数据明显低于升压过程,则说明存在剩磁。升压、降压过程可等效为退磁过程,会削弱铁心内剩磁。

A.1.3 谐波分析判断法

分析低电压空载试验中电流信号的谐波成分,若无其他干扰源的情况下电流信号中存在明显的偶数次谐波,则说明铁心内存在剩磁,需开展退磁操作。

A.1.4 小信号激励注入判断法

对空载状态变压器绕组分别施加正反向小信号电压激励,间隔相同时间测量电流大小,比较正反向激励下电流大小。若电流相差较大,表明铁心内存在明显剩磁,且剩磁方向与产生较大电流的电压信号方向相同,需开展退磁操作。

A.2 退磁方法

A.2.1 交流退磁法

通过对变压器绕组施加交流励磁进行铁心退磁的方法,称为交流退磁法。在试验频率下,将空载试验电压反复由 0 升高到额定电压左右,然后逐渐降压到零,在此过程中采用损耗对比判断法判断变压器剩磁情况。

A.2.2 直流退磁法

通过对变压器绕组施加正、反向交替直流激励进行铁心退磁的方法,称为直流退磁法。正、反向交替的直流激励通常施加于高压绕组,激励幅值不断减小。直流退磁法需要专用仪器,为保障退磁效果,退磁过程中铁心磁通的变化宜直观显示。

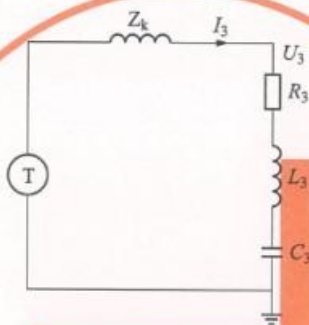
附录 B

(资料性)

滤波补偿装置选型方法

B.1 滤波补偿装置构成

空载试验用滤波补偿装置由固定电容器和可调电感组成, 本附录仅介绍三次滤波补偿装置的选型方法, 五次滤波补偿装置可以参照执行。滤波补偿装置的计算模型见图 B.1。



说明:

T —— 被试变压器, 即为本图中的谐波源;

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 —— 高压三次滤波补偿装置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, 由制造厂提供。

图 B.1 滤波补偿装置的计算模型

B.2 滤波补偿装置各部分参数计算方法

三次滤波补偿装置的电阻, 电感, 电容部分可由公式 (B.1) ~ 公式 (B.3) 确定:

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

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

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

式中:

U_0 —— 被试变压器试验电压的基波分量;

Q —— 为高压滤波补偿装置的品质因数, 取值范围是 40 ~ 100, 一般取值 50。

B.3 固定电容器和可调电感额定电流计算方法

固定电容器和可调电感串联使用, 因此二者额定电流一致, 其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 由公式 (B.4)、公式 (B.5) 确定:

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

$$I_0 = U_0 / (1 / \omega_0 C_3 - \omega_0 L_3) = 9U_0 / 8\omega_0 C_3 \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

I_0 ——被试变压器的基波电流分量。

B.4 固定电容器和可调电感额定电压的计算方法

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} 可由公式 (B.6) ~ 公式 (B.9) 确定:

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

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

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

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

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)
试验报告模板

电力变压器现场空载和负载试验报告模板如表 C.1 和 C.2 所示。

表 C.1 电力变压器现场空载试验报告模板

试品信息						
产品名称			产品型号			
产品容量			额定电压			
额定电流			制造日期			
联结组标号			试品冷却方式			
制造厂家			温度			
测量日期			湿度			
项目单位			工程名称			
施加电压			空载电流		空载损耗(kW)	
U_r (%)	平均值电压 U (kV)	有效值电压 U' (kV)	I_0 (A)	I_0 (%)	实测值 P_m	校正值 P_0
50						
60						
70						
80						
90						
95						
100						
105						
试验结果:						
试验单位:			试验人员:			

