

电 力 变 压 器

第五部分 承受短路的能力

Power transformers

Part 5: Ability to withstand short circuit

本标准参照采用国际标准 IEC 76-5 (1976) 《电力变压器 第五部分 承受短路的能力》。

1 对于承受短路能力的要求

1.1 概述

变压器应能在本标准第1.2条规定的条件下承受外部短路的热,动稳定效应而无损伤。

外部短路包括三相短路、相间短路、两相接地和相对地故障。这些故障在绕组中引起的电流在本标准中称作“过电流”。

1.2 过电流条件

1.2.1 具有两个独立绕组的变压器

1.2.1.1 三相或三相组变压器的额定容量分为三个类别:

第 I 类: 小于3150 kVA;

第 II 类: 3150 ~ 40000 kVA;

第 III 类: 40000 kVA 以上。

1.2.1.2 对称短路电流(有效值见本标准第2.1.2款)对于容量为第 II 类和第 III 类的变压器应使用变压器的短路阻抗加上系统的阻抗来计算。对于容量为第 I 类的变压器,如系统短路阻抗大于变压器短路阻抗的 5% 时,短路电流计算同上,否则系统短路阻抗忽略不计。短路电流的峰值应按照本标准第2.2.3款计算。

1.2.1.3 以额定电流(主分接)下的阻抗电压表示的变压器短路阻抗的典型值,在表 1 中给出。如果需要较低的阻抗电压值,则变压器承受短路的能力须经制造厂与使用部门协商确定。

表 1 具有两个独立绕组的变压器的典型的阻抗电压值

额定容量, kVA	阻抗电压, %
630 及以下	4.0
631 ~ 1250	5.0
1251 ~ 3150	6.25
3151 ~ 6300	7.15
6301 ~ 12500	8.35
12501 ~ 25000	10.0
25001 ~ 200000	12.5

注: ① 额定容量大于200 MVA 的变压器的典型阻抗电压应另行协商确定。

② 当三相组系由几台单相变压器组成时,额定容量的值适用于三相组。

③ 不同额定容量及电压等级的具体阻抗电压值,见相应国家标准的规定。

1.2.1.4 为了获得设计和试验所需的对称短路电流,应由使用部门提出系统的短路表观容量,当未提出时应按表2选取。

表 2 系统的短路表观容量

电压等级, k V	系统最高电压, k V	系统短路表观容量, M V A
6,10	6.9,11.5	500
35	40.5	1500
60	69	3000
110	121	8000
220	242	15000
330	363	30000
500	550	43300

1.2.2 多绕组变压器和带有稳定绕组的变压器及带有第三绕组的自耦变压器

绕组(包括稳定绕组和辅助绕组)中的过电流应根据变压器和系统的阻抗来确定。应该考虑到来自旋转电机或其他变压器以及不同型式的系统故障可能反馈的影响。这些系统故障可以在运行中产生,例如相对地和相间的故障,都与系统及变压器的接地条件有关。每个系统的特性(至少是短路水平和零序阻抗与正序阻抗之比的范围)应由使用部门在询价及订货时提出技术要求。

当变压器及系统的合成阻抗导致的过电流超过按表1及表2的数据所计算的值时,制造厂应将变压器可以承受的最大过电流通知使用部门。这时,使用部门应采取措施把短路电流限制到制造厂指明的过电流值。

三相变压器的稳定绕组应能承受由不同型式的系统故障产生的过电流,这些故障可以在运行中产生,它们与相关系统的接地条件有关。

对于多绕组变压器中的辅助绕组,设计成在端子上能承受短路的能力可能是不经济的。此时,必须采用适当的方法(如采用串联电抗器,或熔断器)来限制过电流的作用。尚应注意防止在变压器与其保护装置之间的线路上发生故障。

在由单相变压器组成三相组的情况下,除非使用部门已确定将采取特别保护措施以避免相间短路外,稳定绕组应能承受其端子上的短路电流。

1.2.3 增压变压器

增压变压器的阻抗值可以很低,所以绕组中的过电流主要是由变压器安装位置处的系统特性来确定。这些特性应由用户在询价及订货时提出。

当变压器与系统的合成阻抗导致的过电流超过按表1及表2的数据所计算的值时,制造厂应将变压器可承受的最大过电流通知使用部门。这时,使用部门应采取措施将短路电流限制到制造厂指明的过电流值。

1.2.4 直接与其他电器相连的变压器

当变压器直接与其他电器相连接时,这些电器的阻抗也将限制短路电流。对变压器、系统及变压器直接相连的电器的阻抗之总和可加以考虑,这一点须由制造厂和使用部门协商确定。

如果发电机与变压器之间的连接使得相间或两相接地故障的可能性在这范围内可以忽略不计时,则上述说明也适用于发电机用变压器。

注:如果发电机与变压器系按上述情况连接,同时采用中性点接地的星形-三角形联结的发电机用变压器,那么当连接到星形联结绕组的系统发生线对地故障时,就可能发生最严重的短路情况。

1.2.5 特殊变压器

变压器承受由于运行方式或特殊使用场合(如电炉变压器及牵引变压器)所引起的频繁过电流的

能力, 应由制造厂与使用部门协商确定。

1.2.6 分接变换装置

当变压器有分接变换时, 则分接变换装置应和绕组一样能够承载由短路产生的同样的过电流。

1.2.7 中性点端子

星形联结或曲折形联结的中性点端子, 应按可能流经这个端子的最大过电流设计。

2 承受短路的能力的验证

2.1 承受短路的耐热能力

2.1.1 概述

变压器承受短路的耐热能力应根据计算验证。

2.1.2 双绕组变压器对称短路电流 I 值

三相变压器对称短路电流有效值按下式计算:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} (Z_t + Z_s)}$$

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}$$

式中: I ——对称短路电流, kA;

Z_s ——系统阻抗, 每相欧姆;

U_s ——系统额定电压;

S ——系统短路表观容量, MVA。

U 和 Z_t 按以下规定:

a. 对于主分接

U 为所考虑的绕组的额定电压 U_N , 以 kV 表示。

Z_t 为折算到所考虑绕组的变压器的短路阻抗, 按下式计算:

$$Z_t = \frac{U_z \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N}$$

式中: Z_t ——短路阻抗, 每相欧姆;

U_z ——折算到参考温度时额定电流下的阻抗电压, 以百分数表示;

S_N ——变压器的额定容量, MVA。

b. 除主分接外的其他分接

U 为所考虑绕组在相应分接的分接电压 (kV)。

Z_t 为折算到所考虑的绕组在相应分接的短路阻抗, 以每相欧姆表示。

对于第 I 类容量的变压器, 如果系统的短路阻抗等于或小于变压器短路阻抗的 5%, 则在计算中将其忽略不计。

2.1.3 对称短路电流 I 的持续时间

当使用部门未提出其他要求时, 用于计算承受短路耐热能力的电流 I 的持续时间为 2 s。

注: 对于自耦变压器和短路电流超过 25 倍额定电流的变压器, 经制造厂与使用部门协商后, 采用的短路电流的持续时间可以小于 2 s。

2.1.4 最高平均温度 θ_1 的最大允许值

以线圈的起始温度 θ_0 为基础, 其值为最高允许环境温度与额定条件下电阻法测量的线圈温升之和 (如果这一温升值没有得到时, 亦可采用与线圈绝缘耐热等级相对应的温升), 当按 2.1.2 款所计算的电流值和 2.1.3 款的持续时间承载后, 线圈任意分接的最高平均温度 θ_1 不得超过表 3 中规定的 θ_2 值。

表 3 短路后，线圈平均温度 θ_2 的最大允许值

变压器型式	绝缘的耐热等级	θ_2	
		铜	铝
油 浸 式	A	250℃	200℃

2.1.5 温度 θ_1 的计算

短路后，线圈达到的最高平均温度 θ_1 由下面公式计算而得到：

$$\theta_1 = \theta_0 + a \cdot J^2 \cdot t \cdot 10^{-3}$$

式中： θ_1 ——最高平均温度，℃；

θ_0 ——线圈的起始温度（℃），它是冷却介质的最高温度与线圈温升限值之和。例如，对于空气冷却的油浸式变压器 θ_0 为105℃，水冷却的油浸式变压器则为95℃；

J ——短路电流密度，A/mm²；

t ——持续时间，s；

a —— $1/2 (\theta_2 + \theta_0)$ 的函数，见表4。

表 4 对应于 $1/2 (\theta_2 + \theta_0)$ 函数的 a 值

$\frac{1}{2} (\theta_2 + \theta_0), \text{℃}$	a	
	铜 线 圈	铝 线 圈
140	7.41	16.5
160	7.80	17.4
180	8.20	18.3
200	8.59	19.1
220	8.99	—
240	9.39	—
260	9.78	—

2.1.6 多绕组变压器和带有稳定绕组的变压器及带有第三绕组的自耦变压器的对称短路电流 I 值过电流按1.2.2款的规定计算。每一个线圈的最高平均温度按2.1.3、2.1.4及2.1.5款计算,其值不应超过表3中列出的最大允许值。

2.2 承受短路的动稳定能力

2.2.1 概述

变压器承受短路的动稳定能力由试验或参考类似变压器的试验来验证。

短路试验是特殊试验，按下述各款进行。

容量为第Ⅲ类的变压器一般不能按照本标准进行试验。

多绕组变压器和自耦变压器的试验条件，通常由制造厂与使用部门协商确定。

2.2.2 短路试验前变压器的条件

2.2.2.1 如无其他规定，试验应在可投入运行的新变压器上进行。短路试验期间，对变压器性能不产生影响的附件（例如可拆卸的冷却器）可以不安装。

2.2.2.2 应在做完GB 1094.1—85《电力变压器 第一部分 总则》规定的出厂试验之后再再进行短路试验。

如绕组带有分接, 必须在短路试验所在的分接位置上测量电抗, 需要时也对电阻进行测量。
所有电抗测量达到的复验性应在±0.2%以内。

试验报告包括出厂试验的结果, 在短路试验开始前应备齐。

2.2.2.3 短路试验开始时, 线圈的平均温度应在0~40℃。

2.2.3 双绕组变压器的短路电流峰值 \hat{i}

非对称试验电流的第一个峰值按下式计算:

$$\hat{i} = IK\sqrt{2}$$

式中: 对称短路电流 I 按本标准第1.2.1.2项和2.1.2款确定。

系数 $K\sqrt{2}$ 由 X/R 的比值确定。

其中: X 为变压器的电抗与系统的电抗之和($X_t + X_s$), 以 Ω 表示。

R 为变压器的电阻与系统的电阻之和($R_t + R_s$), 以 Ω 表示。

如无其他规定, 系数 $K\sqrt{2}$ 限制到 $1.8\sqrt{2} = 2.55$ 。

表5规定了对于不同 X/R 值的 $K\sqrt{2}$ 值。

表5 系数 $K\sqrt{2}$ 的值

X/R	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10	>14
$K\sqrt{2}$	1.5.1	1.64	1.76	1.95	2.09	2.19	2.27	2.38	2.46	2.55

注: X/R 在1~14之间的其他值可由线性插入法确定。

对于第I类容量的变压器且 $Z_s < 0.05Z_t$ 时(见1.2.1.2项和2.1.2款), X 和 R 仅与变压器(X_t 和 R_t)有关。当 $Z_s > 0.05Z_t$ 时, X 和 R 与变压器和系统有关($X_t + X_s$ 和 $R_t + R_s$)。

注: 当 $Z_s < 0.05Z_t$ 时, 可用 U_x 和 U_r 代替 X_t 和 R_t (用于主分接)。

其中: U_z 为参考温度下变压器的阻抗电压, 以百分数表示;

U_x 为 U_z 的无功分量, 以百分数表示;

U_r 为参考温度下的 U_z 的有功分量, 以百分数表示。

2.2.4 双绕组变压器的短路试验电流的值和持续时间

非对称电流的第一个峰值 \hat{i} (如果短路试验电流的持续时间足够长的话)将变化到对称电流 I 。

试验中所得到的峰值电流偏离规定值应不大于5%, 而对称短路电流偏离规定值应不大于10%。
短路试验电流的持续时间按本标准第2.2.5.4项的规定。

2.2.5 双绕组变压器短路试验方法

2.2.5.1 为了按2.2.4款的要求得到试验电流, 电源的空载电压可高于施加电压绕组的额定电压。
绕组的短路可在变压器另一绕组施加电压之后亦可在施加电压之前(预先短路)进行, 前者电压不应超过绕组额定电压的1.15倍。

在单同心式线圈的变压器预先短路时, 为了避免铁心的饱和, 应将电压施加于远离铁心的一个绕组, 而将靠近铁心的绕组短路。不然的话, 试验最初的几个周波中将会产生过大的磁化电流并叠加于短路电流上。

对交叠式线圈或者双同心式线圈的变压器, 经制造厂与使用部门协商后, 才能使用预先短路的方法。

2.2.5.2 为了在被试的相线圈中获得短路电流的起始峰值, 合闸时应使用同步开关来调节。

为了验证试验电流 \hat{i} 和 I 值, 这些电流应使用示波图加以记录。

为了在三个相线圈中的一个线圈中获得最大的非对称电流, 应在该相线圈的电压过零时合闸。

注: ① 对于星形联结绕组, 当相电压过零合闸时, 可以得到最大的非对称值。峰值电流 \hat{i} 的系统 K , 可根据线电流的示波图确定。对于三角形联结绕组的三相试验, 这个条件可以在线电压过零时合闸得到。在预先调整

试验期间,以最大调试验电压过零时合闸是确定系数 K 的一种方法。此时,可以从线电流的示波图中找到系数 K 。确定三角形联结绕组相电流的另一个方法是将测量线电流的各个互感器的二次绕组适当地相互连接。可利用示波图记录相电流值。

- ② 对属于第Ⅰ类容量星形-曲折形联结的恒磁通调压的变压器,当 $U_x/U_r \leq 3$ (见2.2.3款)时,三相可同时合闸而不使用同步开关。对于其他的星形-曲折形联结的变压器,合闸的方式须经制造厂与使用部门协商确定。

2.2.5.3 对于三相变压器,试验时应使用三相电源,只要满足本标准第2.2.4款的要求即可。如情况与此不同,则下述单相电源可以使用。对于三角形联结的绕组,单相电源应施加在三角形的两个角上,试验期间该单相电源的电压应等于三相试验时的相间电压。对于星形联结绕组,单相电源施加于一个线端与其余两个连在一起的线端上。试验期间,单相电压必须等于三相试验时相间电压的 $\sqrt{3}/2$ 倍。

注:① 单相电源主要用于第Ⅱ类和第Ⅲ类容量变压器的短路试验,很少用于第Ⅰ类容量变压器的短路试验。

② 对于分级绝缘的星形联结变压器,需要检查中性点绝缘是否能满足单相试验的要求。

③ 对于星形联结绕组,如采用上述的单相试验,电源容量不足而中性点是可以利用时,则经制造厂与使用部门协商一致后,单相试验可以在线端与中性点间进行。

2.2.5.4 在没有特定的技术规范的情况下,对于单相变压器应进行三次试验,其中一次为100%最大非对称电流,其他二次应不低于75%最大非对称电流值;对于三相变压器,每相的试验次数均为三次,其中一次应为100%最大非对称电流。不包括用小于70%的规定电流进行的预先调整试验。该试验用来检验试验装备的固有特性,如合闸时间、电流调整、衰减及持续时间。

对于第Ⅰ类容量的变压器,每次试验的持续时间为0.5s,其容许偏差为 $\pm 10\%$ 。单相变压器如无其他规定,应在不同的分接位置上做三次短路试验,即一次在最大电压比分接上,一次在主分接上,一次在最小电压比分接上。

对于三相变压器当采用单相电源时,应做九次短路试验,每一铁心柱上进行3次。如无其他规定,带有分接的变压器的短路试验,对每一铁心柱应在不同分接位置上进行。即在旁侧的一个铁心柱上,用最高电压比的分接位置进行3次;在中间心柱上,用主分接位置进行3次;在另一个旁侧的铁心柱上,用最低电压比的分接进行3次。当采用三相电源时,应做3次短路试验,并应在三个铁心柱的不同分接位置上进行。

对于第Ⅱ类和第Ⅲ类容量的变压器,其试验次数、每次试验的持续时间以及试验所在分接位置均须由制造厂与使用部门协商确定。

2.2.6 故障探测和短路试验结果的判断

2.2.6.1 短路试验前,应按本标准第2.2.2款要求进行测量和试验,气体继电器(如果有)亦应观察。这些测量和试验用作寻找故障的参考。

2.2.6.2 每次试验期间(其中包括预备试验)应对以下项目进行示波图记录:

施加电压(线端间);

电流(见2.2.5.2项的注)。

另外,对被试变压器尚须进行目测检查。

注:可以使用补充寻找故障的方法,例如,用附加线圈法取得辐射的杂散磁通的示波记录,从噪声得来的信息。

还有,特别是采用记录油箱(将油箱绝缘起来)与地之间电流的方法。

2.2.6.3 每次试验后,应对试验期间取得的示波图记录和气体继电器加以观察,并需测量短路电抗。

注:① 可以使用补充寻找故障的方法,如测量电阻,将脉冲电压的示波图与起始阶段得到的示波图相比较(重复脉冲示波图法),以及空载试验的测量(用于寻找匝间短路故障)等。

② 试验前后所作测量结果间的差异可作为确定可能有缺陷的依据。在连续试验过程中,应特别注意观察每次试验后测量电抗的变化,这一电抗值可能是递增的也可能趋向于达到一个稳定的值。

2.2.6.4 试验完成后,应检查变压器和气体继电器(如果有),应分析短路电抗测量结果和试验的不同阶段所提取的示波图,以寻找出试验过程中出现的异常现象,尤其是短路电抗所显示的变化。

在这个阶段,对于第Ⅰ类和第Ⅱ或第Ⅲ类变压器应采用下述不同的方法。

a. 第Ⅰ类变压器

重复全部出厂试验。

除非经制造厂与使用部门协商,规定有较高的电压值外,出厂绝缘试验电压应为原试验电压值的85%。

然后将变压器吊心,检查器身,以便能够发现可能的表面缺陷。如引线位置变动,尽管这种变动不妨碍变压器通过出厂试验,但它可以危及变压器的安全运行。

如满足下面的三条要求,则认为变压器经短路试验合格。

(a) 重复出厂试验全部合格;

(b) 短路试验的结果,短路试验期间的测量和吊心检查没有发现缺陷(如线圈、连接线和支撑件结构等的明显位移、变形或放电痕迹);

(c) 在试验完成后测量的电抗值和原先的测量值之差:

对具有圆形同心式线圈的变压器不大于2%,然而在低压线圈是用金属箔绕制的变压器及对于阻抗电压为3%或以上的变压器,可取不大于4%的值。

对于具有非圆形的同心式线圈的变压器,其阻抗电压为3%或以上者不大于7.5%,经制造厂与使用部门协商7.5%的值可以降低,但不低于4%。

注:对于阻抗电压低于3%的非圆形同心式线圈的变压器,其电抗的最大变化范围不能用普通的方法加以规定。

对某些结构的经验表明,达到 $(22.5 \sim 5U_x)\%$ 的变化对这种变压器是可接受的, U_x 是以百分数表示的阻抗电压。

如果满足了短路试验合格的三条要求,则将变压器恢复到它的起始状态。同时为证明变压器适于运行所需要的任何进一步的出厂试验则在产品出厂前重复进行。

如果这三条要求中任何一条不合格,则根据情况,需要拆卸变压器以确定上述条件的变化原因。

b. 第Ⅱ类和第Ⅲ类变压器

重复出厂试验通常是在短路试验之后进行的,但是根据制造厂与使用部门之间的协议它可以推迟到检查完成后再进行。除非经制造厂与使用部门协商,规定有较高的电压值外,则重复出厂绝缘试验的电压值应为原试验电压值的85%。

注:如果变压器最初是按GB 1094.3—85《电力变压器 第三部分 绝缘水平和绝缘试验》方法2进行的绝缘试验,则感应耐压试验所施加的电压应由制造厂与使用部门协商确定。

变压器应进行吊心,检查器身,如果满足下面两条的要求,则认为变压器经短路试验合格。第一,短路试验期间的测量,短路电抗的测量,同时在吊心检查中都没有发现表面缺陷(如线圈连线和支撑结构等的位移、变形或放电痕迹);第二,重复出厂试验合格。对电抗测量值的任何差异的判断,需经制造厂与使用部门协商决定。

如上述证明短路试验合格的两条要求中任何一条不合格,应对变压器进行更详细的检查。必要时,应将变压器部分或全部拆卸。

附加说明:

本标准由中华人民共和国机械工业部和水利电力部提出。

本标准由沈阳变压器研究所和水利电力部电力科学研究院负责起草。

本标准主要起草人王肇平、凌愍。

自本标准实施之日起,原GB 1094—79《电力变压器》中有关内容作废。