



中华人民共和国国家标准

GB 1094.5—2008
代替 GB 1094.5—2003

电力变压器 第 5 部分：承受短路的能力

Power transformers—
Part 5: Ability to withstand short circuit

(IEC 60076-5:2006, MOD)

2008-09-19 发布

2009-06-01 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 | I |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 承受短路的能力的要求 | 1 |
| 3.1 总则 | 1 |
| 3.2 过电流条件 | 1 |
| 4 承受短路能力的验证 | 3 |
| 4.1 承受短路的耐热能力 | 4 |
| 4.2 承受短路的动稳定能力 | 5 |
| 附录 A (资料性附录) 承受短路动稳定能力的理论评估 | 11 |
| A.1 范围 | 11 |
| A.2 概述 | 11 |
| A.3 设计评审导则 | 11 |
| 附录 B (资料性附录) IEC 60076-5:2006 的系统短路视在容量 | 21 |
| 附录 C (资料性附录) 类似变压器的确定 | 22 |

前 言

本部分的第3章和第4章为强制性的,其余为推荐性的。

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: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。

本部分为GB 1094的第5部分。

本部分修改采用IEC 60076-5:2006《电力变压器 第5部分:承受短路的能力》(英文版)。

本部分根据IEC 60076-5:2006按修改采用的原则重新起草。

考虑到我国国情,在采用IEC 60076-5:2006时,本部分做了一些修改。有关技术性差异已编入正文中并在它们所涉及的条款的页边空白处用垂直单线标识。本部分与IEC 60076-5:2006的主要技术性差异如下:

- 引用了采用国际标准的我国标准,而非直接引用国际标准;
- 考虑到我国变压器短路阻抗值的具体情况,在3.2.2.3表1中增加了“注3:不同额定容量及电压等级的具体短路阻抗值,见相应的标准。”;
- 考虑到我国电网系统的具体情况,将3.2.2.4表2中的设备最高电压和短路视在容量按我国各电压等级电网的实际情况列出,而将IEC 60076-5:2006的相应规定列在附录B中,以方便对照。

为便于使用,本部分还对IEC 60076-5:2006做了下列编辑性修改:

- 删除了IEC 60076-5:2006的前言;
- 附录A注1的内容移到了脚注⁷⁾中;
- 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”。

本部分代替GB 1094.5—2003《电力变压器 第5部分:承受短路的能力》。

本部分与GB 1094.5—2003相比主要变化如下:

- 增加了“规范性引用文件”;
- 增加了“标称系统电压为750 kV的系统短路视在容量”;
- 增加了“承受短路动稳定能力的理论评估”的资料性附录内容。

本部分的附录A、附录B和附录C均为资料性附录。

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:沈阳变压器研究所、特变电工沈阳变压器集团有限公司、西安西电变压器有限责任公司、保定天威保变电气股份有限公司、上海市电力公司、特变电工衡阳变压器有限公司、北京华泰变压器有限公司、中电电气集团有限公司、广州骏发电气有限公司、山东达驰电气股份有限公司。

GB 1094.5—2008

本部分主要起草人：郭振岩、章忠国、陶丹、钟俊涛、王长征、张喜乐、姜益民、陈东风、王百升、徐子宏、樊建平、许长华。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB 1094.5—1971、GB 1094.5—1979、GB 1094.5—1985、GB 1094.5—2003。

电力变压器

第 5 部分：承受短路的能力

1 范围

GB 1094 的本部分规定了电力变压器在由外部短路引起的过电流作用下应无损伤的要求。本部分叙述了表征电力变压器承受这种过电流的耐热能力的计算程序和承受相应的动稳定能力的特殊试验和理论评估方法(参见附录 A)。

本部分适用于 GB 1094.1 所规定范围内的变压器。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB 1094 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB 1094.1—1996 电力变压器 第 1 部分:总则 (eqv IEC 60076-1:1993)

GB 1094.3—2003 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(IEC 60076-3:2000,MOD)

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

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

3 承受短路的能力的要求

3.1 总则

变压器及其组件和附件应设计制造成能在本部分 3.2 规定的条件下承受外部短路的热和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部分中称作“过电流”。

3.2 过电流条件

3.2.1 一般条件

3.2.1.1 需要特殊考虑的使用条件

下述情况对过电流大小、持续时间或发生频度有影响,需要进行特殊考虑并应在变压器技术规范中给予明确的规定:

- 阻抗很小的调压变压器,需要考虑所连接的限流装置的阻抗;
- 发电机变压器易受到因发电机与所连接系统失去同步而产生的较高的过电流;
- 直接与旋转电机(如电动机或同步调相机)连接的变压器,在系统故障条件下,呈发电状态运行的旋转电机向变压器供给电流;
- 专用变压器及安装在高故障率系统中的变压器(见 3.2.6);
- 故障时,非故障端子上出现高于额定值的运行电压。

3.2.1.2 关于增压变压器电流限值

当增压变压器与系统的合成阻抗导致短路电流值大到使设计耐受此过电流的变压器很困难或不经济时,制造方和用户应共同协商确定最大允许过电流值。此时,用户应采取使过电流限制到制造方

所确定的且标志在铭牌上的最大过电流值。

3.2.2 具有两个独立绕组的变压器

3.2.2.1 本部分将三相或三相组变压器的额定容量分为三个类别：

- I类:25 kVA~2 500 kVA;
- II类:2 501 kVA~100 000 kVA;
- III类:100 000 kVA 以上。

3.2.2.2 如无其他规定,对称短路电流(方均根值,见 4.1.2)应使用测出的变压器短路阻抗加上系统短路阻抗来计算。

对于 I 类变压器,如果系统短路阻抗等于或小于变压器短路阻抗的 5%,则在计算短路电流时系统短路阻抗应忽略不计。

短路电流的峰值应按 4.2.3 来计算。

3.2.2.3 表 1 给出了在额定电流(主分接)下的变压器短路阻抗最小值,如果需要更低的短路阻抗值时,则变压器承受短路的能力应由制造方和用户协商确定。

表 1 具有两个独立绕组的变压器的短路阻抗最小值

| 额定容量/kVA | 最小短路阻抗/% |
|----------------|----------|
| 25~630 | 4.0 |
| 631~1 250 | 5.0 |
| 1 251~2 500 | 6.0 |
| 2 501~6 300 | 7.0 |
| 6 301~25 000 | 8.0 |
| 25 001~40 000 | 10.0 |
| 40 001~63 000 | 11.0 |
| 63 001~100 000 | 12.5 |
| 100 000 以上 | >12.5 |

注 1: 额定容量大于 100 000 kVA 的短路阻抗值一般由制造方和用户协商确定。
 注 2: 在由单相变压器组成三相组的情况下,额定容量值适用于三相组。
 注 3: 不同额定容量及电压等级的具体短路阻抗值,见相应的标准。

3.2.2.4 为了获得设计和试验所需的对称短路电流值,应由用户在询价时提供变压器安装位置处的系统短路视在容量。

如果没有规定系统短路视在容量,则应按表 2 选取。

表 2 系统短路视在容量

| 标称系统电压/kV | 设备最高电压 U_m /kV | 短路视在容量/MVA |
|-----------|------------------|------------|
| 6,10,20 | 7.2,12,24 | 500 |
| 35 | 40.5 | 1 500 |
| 66 | 72.5 | 5 000 |
| 110 | 126 | 9 000 |
| 220 | 252 | 18 000 |
| 330 | 363 | 32 000 |
| 500 | 550 | 60 000 |
| 750 | 800 | 83 500 |

注 1: 如无规定,则认为系统零序阻抗与正序阻抗之比为 1~3。
 注 2: 如用户另有要求,系统短路视在容量也可按附录 B 的规定选取,但应在订货合同中规定。

3.2.2.5 对具有两个独立绕组的变压器,通常只考虑三相短路,这种考虑实质上能充分满足其他可能包括在内的故障类型(3.2.5注中所考虑的特殊情况除外)。

注:当绕组为曲折形联结时,单相对地故障电流可能比三相短路电流大。但是,在所涉及的两个心柱中,较高的电流值被限制在半个绕组中。进一步说,在其他星形联结绕组中的电流都小于三相短路时的电流。至于三相短路还是单相短路对绕组的动稳定产生更大的危害,与绕组的结构设计有关。制造方和用户应就考虑哪种短路类型达成协议。

3.2.3 多绕组变压器和自耦变压器

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。应考虑运行中可能产生的不同类型的系统故障,例如:与系统和变压器的接地有关的相对地故障和相间故障(见GB/T 13499—2002)。每个系统的特性(至少是短路视在容量值和零序阻抗与正序阻抗之比的范围)应由用户在询价时提出。

三相变压器的三角形联结稳定绕组应能承受运行中可能出现的、并与相关系统的接地条件有关的不同类型的系统故障所产生的过电流。

在由单相变压器组成三相组的情况下,除非用户确认会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处的短路。

注:将辅助绕组设计成能承受其端子上的短路可能是不经济的。此时,应采取合适的措施(如,采用串联电抗器,或在某些情况下采用熔断器)来限制过电流值。此外,也要注意防止变压器与其保护装置之间的线路部分发生短路故障。

3.2.4 增压变压器

增压变压器的阻抗值可能很小,因此,绕组中的过电流主要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。

如果增压变压器直接与一台变压器相连作电压幅值和/或相位移调节用,则此增压变压器应能承受由这两种设备合成阻抗所产生的过电流。

3.2.5 直接与其他电器相连接的变压器

当变压器直接与其他电器相连接时,这些电器的阻抗将限制短路电流。按制造方和用户之间的协议,可以将变压器、系统及与变压器直接相连电器的各自阻抗的总和计入在内。

如果发电机与变压器之间的连接良好,以至在此范围内的相间或两相接地故障的可能性可以忽略不计时,则上述规定也适用于发电机变压器。

注:如果发电机与变压器之间的连接状态如上所述,则对于中性点接地的星形—三角形联结的发电机变压器,在与星形联结绕组相连接系统发生相对地故障,或在发电机与系统不同步的情况下,就可能发生最严重的短路情况。

3.2.6 专用变压器和安装在故障率高的系统中的变压器

对于特殊使用场合(如电炉变压器和向牵引系统供电的变压器)或运行条件(如所连接系统的故障次数多),变压器承受频繁过电流的能力,应由制造方和用户专门协商确定。有关系统中非正常运行条件的情况,用户应事先向制造方提供。

3.2.7 分接开关

当变压器装有分接开关时,分接开关应能承受与绕组一样的短路过电流。但不要求有载分接开关具有切换短路电流的能力。

3.2.8 中性点端子

星形联结或曲折形联结绕组的中性点端子,应按可能流经这个端子的最大过电流设计。

4 承受短路能力的验证

本章的要求既适用于GB 1094.1所规定的油浸式电力变压器,也适用于GB 1094.11所规定的干式电力变压器。

4.1 承受短路的耐热能力

4.1.1 概述

变压器承受短路的耐热能力应通过计算的方式进行验证。计算按 4.1.2~4.1.5 的规定进行。

4.1.2 对称短路电流 I

对于具有两个独立绕组的三相变压器,对称短路电流方均根值 I 应按下式计算:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_1 + Z_s)} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

I——对称短路电流的方均根值,单位为千安(kA);

Z_s——系统短路阻抗,每相欧姆(Ω)(等值星形联结),按下式计算:

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

U_s——标称系统电压,单位为千伏(kV);

S——系统短路视在容量,单位为兆伏安(MVA)。

U 和 Z₁ 按以下规定:

a) 对于主分接:

U——所考虑绕组的额定电压 U_r,单位为千伏(kV);

Z₁——折算到所考虑绕组的变压器的短路阻抗¹⁾,每相欧姆(Ω)(等值星形联结),按下式计算:

$$Z_1 = \frac{z_1 \times U_r^2}{100S_r} \dots\dots\dots(3)$$

式中:

z₁——在参考温度、额定电流和额定频率下所测出的主分接短路阻抗,用%表示;

S_r——变压器的额定容量,单位为兆伏安(MVA)。

b) 除主分接外的其他分接:

U——所考虑绕组在相应分接的电压(另有规定除外)²⁾,单位为千伏(kV);

Z₁——折算到所考虑绕组在相应分接的短路阻抗,以每相欧姆(Ω)表示。

对于多绕组变压器、自耦变压器、增压变压器和直接与其他电器连接的变压器,其过电流计算分别按 3.2.3、3.2.4 或 3.2.5 进行。

所有变压器,除 3.2.2.2 所述情况外,都应考虑系统的短路阻抗。

注:曲折形联结的绕组,单相对地故障的短路电流可能明显大于三相短路时的故障电流。因此,在计算曲折形联结绕组的温升时应考虑此电流值的增大。

4.1.3 对称短路电流的持续时间

除另有规定,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,经制造方与用户协商后,短路电流持续时间可以小于 2 s。

4.1.4 每个绕组平均温度的最大允许值

当每个绕组分别按 4.1.2 和 4.1.3 施加规定持续时间的对称短路电流 I 后,其在任何分接位置下的平均温度 θ₁ 应不超过表 3 规定的最大值。

公式(4)和公式(5)中所用的绕组起始温度 θ₀ 应表示为最高允许环境温度与在额定条件下用电阻法测量的绕组温升之和。如果测出的绕组温升不适用时,则绕组起始温度 θ₀ 应为最高允许环境温度与

1) 此处用符号 Z₁ 和 z₁ 分别代替 GB 1094.1—1996 所采用的 Z 和 z,其目的是与本部分 4.2.3 内容一致,以免混乱。
2) 分接电压的定义见 GB 1094.1—1996 的 5.2。

绕组绝缘系统所允许的温升之和。

表 3 每个绕组在短路后的平均温度最大允许值

| 变压器的型式 | 绝缘系统温度/ ℃ (括号内为绝缘耐热等级) | 温度最大值/ ℃ | |
|--------|------------------------------|-------------|-----|
| | | 铜绕组 | 铝绕组 |
| 油浸式 | 105(A) | 250 | 200 |
| 干式 | 105(A) | 180 | 180 |
| | 120(E) | 250 | 200 |
| | 130(B) | 350 | 200 |
| | 155(F) | 350 | 200 |
| | 180(H) | 350 | 200 |
| | 200 | 350 | 200 |
| | 220 | 350 | 200 |

注 1: 当绕组由高抗拉强度的铝合金导线制成时,可由制造方和用户协商确定更高的温度最大值,但不得超过相应的铜绕组的温度。
注 2: 当油浸式变压器所使用的绝缘系统不是 A 级时,可由制造方和用户协商确定不同的允许温度最大值。

4.1.5 温度 θ_1 的计算

绕组短路后的平均温度 θ_1 应由下述公式计算:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 235)}{\frac{106\,000}{J^2 \times t} - 1} \quad (\text{铜绕组}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 225)}{\frac{45\,700}{J^2 \times t} - 1} \quad (\text{铝绕组}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

θ_1 ——绕组短路 t (s)后的平均温度,单位为摄氏度(℃);

θ_0 ——绕组起始温度,单位为摄氏度(℃);

J ——短路电流密度,单位为安每平方毫米(A/mm²),按对称短路电流的方均根值计算出;

t ——持续时间,单位为秒(s)。

注: 公式(4)和公式(5)是按绝热条件推导的,且仅对短路持续时间不超过 10 s 时才有效。公式中的系数是按表 4 中所列的参数得出的。

表 4 材料参数

| 参 数 | 材 料 | |
|--------------------------------|---------|---------|
| | 铜 | 铝 |
| 100 ℃时的比热/(J/kg·℃) | 398.4 | 928 |
| 100 ℃时的密度/(kg/m ³) | 8 894 | 2 685 |
| 100 ℃时的电阻率/(μΩ·m) | 0.022 4 | 0.035 5 |

4.2 承受短路的动稳定能力

4.2.1 概述

如果用户有要求,承受短路的动稳定能力应由下述两者之一来验证:

- 试验验证;
- 计算、设计和制造同步验证。

所用验证方法的选择,应由用户和制造方在订货前协商确定。

短路试验为特殊试验(见 GB 1094.1—1996 的 3.11.3),应在订货合同中规定。试验应按 4.2.2~4.2.7 的要求进行。

大容量变压器有时不能按本部分进行试验,如:受试验条件的限制。此时,试验条件应由用户和制造方协商确定。

当选择按计算、设计和制造同步验证时,要求用已做过短路试验的类似变压器或在有代表性的模型上的短路试验来证明。鉴别类似变压器的准则参见附录 C。

4.2.2 变压器在短路试验前的条件

4.2.2.1 除非另有规定,试验应在准备投入运行的新变压器上进行。短路试验时,保护用的附件,如气体继电器及压力释放装置应安装在变压器上。

注:对短路性能无影响的附件(如可拆卸的冷却器)可不安装。

4.2.2.2 短路试验前,变压器应按 GB 1094.1—1996 的规定进行例行试验,但在此阶段中,不要求做雷电冲击试验。

如果绕组带有分接,应在短路试验所在分接位置上测量电抗,必要时也对电阻进行测量。

所有电抗测量值的复验性应在±0.2%以内。

包括例行试验结果在内的试验报告,在短路试验开始前应备齐。

4.2.2.3 短路试验开始时,绕组的平均温度最好在 10℃~40℃ 之间(见 GB 1094.1—1996 的 10.1)。

短路试验期间,由于流过短路电流,绕组的温度可能升高。当布置 I 类变压器的试验线路时应考虑这种情况。

4.2.3 双绕组变压器的试验电流峰值 \hat{i}

试验应在被试相的电流达到最大非对称值时进行。

非对称试验电流的第一个峰值(kA),按下式计算:

$$\hat{i} = I \times k \times \sqrt{2} \dots\dots\dots (6)$$

式中,对称短路电流 I 按 4.1.2 确定。

k 为计算试验电流初始偏移的系数,而 $\sqrt{2}$ 则考虑了正弦波峰值对方均根值之比。

系数 $k \times \sqrt{2}$ (或称峰值因数)与 X/R 有关,其中:

X ——变压器的电抗与系统电抗之和($X_1 + X_s$),以 Ω 表示;

R ——变压器电阻与系统电阻之和($R_1 + R_s$),以 Ω 表示,其中 R_1 为参考温度下的电阻(见 GB 1094.1—1996 的 10.1)。

在短路电流计算中若包括了系统短路阻抗时,如无另行规定,应假定系统的 X_s/R_s 值等于变压器的 X_1/R_1 值。表 5³⁾ 列出了不同 X/R 值的峰值因数值,以供实际应用。

表 5 系数 $k \times \sqrt{2}$ 的值

| | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| X/R | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 14 |
| $k \times \sqrt{2}$ | 1.51 | 1.64 | 1.76 | 1.95 | 2.09 | 2.19 | 2.27 | 2.38 | 2.46 | 2.55 |
| 注:若 X/R 为 1~14 之间的其他值,则 $k \times \sqrt{2}$ 可用线性插值法求得。 | | | | | | | | | | |

3) 表 5 是按下列峰值因数公式得出的:

$$k \times \sqrt{2} = [1 + (e^{-\phi \cdot \sqrt{2} R/X}) \sin \phi] \times \sqrt{2}$$

式中:

e ——自然对数的底;

ϕ ——相位角,等于 $\arctg X/R$, 弧度。

注：当 $Z_s < 0.05Z_1$ 时，对主分接可用 x_1 和 r_1 代替 X_1 和 $R_1(\Omega)$ ，其中：

x_1 —— z_1 的电抗分量，%；

r_1 ——参考温度下 z_1 的电阻分量，%；

z_1 ——参考温度下的变压器短路阻抗，%。

如果无其他规定，当 $X/R > 14$ 时，系数 $k \times \sqrt{2}$ 假定为：

对 II 类变压器： $1.8 \times \sqrt{2} = 2.55$ ；

对 III 类变压器： $1.9 \times \sqrt{2} = 2.69$ 。

4.2.4 短路试验电流的非对称峰值和对称方均根值的允许偏差

如果短路试验电流的持续时间足够长，则包含第一个峰值 \hat{i} 的非对称电流将变化到对称电流方均根值 I (见 4.1.2)。

试验中所得到的电流峰值偏离规定值应不大于 5%，而对称电流偏离规定值应不大于 10%。

4.2.5 双绕组变压器短路试验程序

4.2.5.1 为了得到 4.2.4 所要求的试验电流，电源的空载电压可高于被试绕组的额定电压⁴⁾。绕组的短路可在变压器另一绕组施加电压之后(后短路)进行，亦可在施加电压之前(先短路)进行。

如果采用后短路，所施加的电压应不超过 1.15 倍绕组额定电压，但制造方和用户另有协议时除外。

如果对单同心式绕组的变压器采用预先短路，为了避免铁心饱和，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。否则，试验最初的几个周波中将会产生过大的励磁电流并叠加于短路电流上。

当现有的试验设备要求将电源接到内绕组时，应采取特别的措施，如：预先磁化铁心，以防止产生励磁涌流。

对交叠式绕组或双同心式绕组的变压器，应经制造方和用户协商后才能采用先短路的方法。

为防止危险的过热，前后两次施加过电流之间的时间间隔应适当，此时间间隔应由用户和制造方协商确定。

注：当对 I 类变压器试验时，可能需要考虑试验期间由于温度升高而引起的 X/R 的变化，并在试验回路中提供相应的补偿。

4.2.5.2 为了在被试相绕组中得到短路电流的起始峰值(见 4.2.3)，合闸时应使用同步开关来调节。

为了检查试验电流 \hat{i} 和 I ，应使用示波图记录。

为了在三个相绕组中的某个绕组上得到最大的非对称电流，应在该相绕组上的电压过零时合闸。

注 1：对于星形联结绕组，当相电压过零时合闸，可以得到最大的非对称电流。峰值电流 \hat{i} 的系数 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。在预先调整试验中，在线电压最大时合闸是确定系数 k 的一种方法。此时，可以从线电流的示波图中求出系数 k 。

确定三角形联结绕组相电流的另一种方法是将测量线电流的各电流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。

注 2：对星形—曲折形联结的恒磁通调压、且 $x_1/r_1 \leq 3$ (见 4.2.3) 的 I 类变压器，不使用同步开关进行三相同时合闸。对于其他的星形—曲折形联结的变压器，其合闸方式由制造方与用户协商确定。

4.2.5.3 试验电源的频率应是变压器的额定频率。如果用户与制造方之间有协议，允许用 50 Hz 的电源试验 60 Hz 的变压器和用 60 Hz 的电源试验 50 Hz 的变压器，只要能得到 4.2.3 和 4.2.4 所要求的试验电流值。

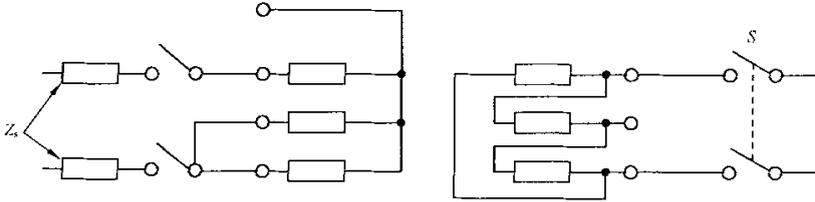
此程序要求试验电源的电压按变压器的额定电压进行适当调整。

4.2.5.4 对于三相变压器，只要满足 4.2.4 的要求，就应使用三相电源。如果情况与此不同，则可以使用下述单相电源。对于三角形联结的绕组，单相电压应施加在三角形的两个角上，试验时的电压应与三

4) 另一试验程序是对被试验的两个绕组同时施加两个相位彼此相反的电压，两个绕组可由同一电源或由两个独立的、但同步的电源施加电压。这种方法对防止铁心饱和是有利的，且将减少供电容量。

相试验时的相间电压相同。对于星形联结的绕组,单相电压应施加于一个线端与其余两个连在一起的线端之间,试验时,单相电压应等于三相试验时相间电压的 $\sqrt{3}/2$ 倍。

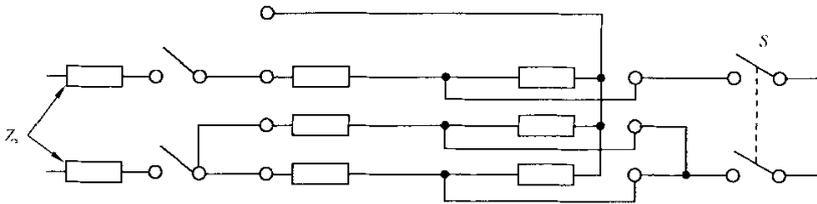
图 1 和图 2 给出了两种可能用来模拟三相试验的单相试验线路。



Z_s ——试验系统的阻抗。

S——后短路用的同步开关或先短路用的固定连接母线。

图 1 星形/三角形联结的变压器



Z_s ——试验系统的阻抗。

S——后短路用的同步开关或先短路用的固定连接母线。

图 2 星形/星形联结的自耦变压器

注 1: 单相电源试验主要用于 II 类或 III 类变压器,很少用于 I 类变压器。

注 2: 对于分级绝缘的星形联结绕组,必须检查中性点的绝缘是否能满足单相试验的要求。

注 3: 对于星形联结绕组,如果电源容量不足以进行上述的单相试验,而中性点可以利用且能承受相关的电流时,经制造方和用户协商,单相电源可施加于线端与中性点之间。这种试验接线方式可使不试相的相应端子方便地进行相互间的连接,以便较好地控制其上的电压,只要这样做是可行的且接线是正确的。

4.2.5.5 如无特殊规定,三相和单相变压器的试验次数按下述规定,它不包括小于 70%规定电流进行预先调整试验的次数。调整试验是用来检查合闸瞬间、电流调节、衰减和持续时间等方面的试验操作是否正确。

对于 I 类和 II 类的单相变压器,试验次数应为三次。如无另行规定,带有分接的单相变压器的 3 次试验,是在不同的分接位置上进行的,即:一次是在最大电压比的分接位置上,另一次是在主分接的位置上,再一次是在最小电压比的分接位置上。

对于 I 类和 II 类的三相变压器,总的试验次数应为 9 次,即:每相进行 3 次试验。如无另行规定,带有分接的三相变压器的 9 次试验是在不同的分接位置上进行的。即:在旁侧的一个心柱上的 3 次试验是在最大电压比的分接位置进行的;在中间心柱上的 3 次试验是在主分接位置进行的;在另一个旁侧的心柱上的 3 次试验是在最小电压比分接位置进行的。

对于 III 类变压器,其试验次数和试验所在分接位置通常需由制造方和用户协商确定。然而,为了尽可能严格模拟运行中可能发生的重复短路的效应,以便监测被试变压器的特性和对所测短路阻抗的可能变化做出有意义的判断,推荐的试验次数如下:

——对于单相变压器:3 次。

——对于三相变压器:9 次。

至于分接位置和试验程序,建议与 I 类和 II 类变压器相同。

每次试验的持续时间应为:

——对于 I 类变压器:0.5 s;

——对于Ⅱ类和Ⅲ类变压器:0.25 s。

其允许偏差为±10%。

4.2.6 多绕组变压器和自耦变压器的短路试验程序

对于多绕组变压器和自耦变压器,可以设想有各种各样的故障条件,见3.2.3。通常,与双绕组变压器的作为参考情况的三相短路(见3.2.2.5)相比,这些条件的性质更复杂。

为了用试验手段模拟某些故障现象,往往需要特殊的试验线路。通常,根据对所有可能出现故障情况下的短路电动力计算结果的分析来选择试验工况。

试验线路布置、电流值、试验顺序和试验次数通常由制造方和用户协商确定。

协议中的试验电流值和试验持续时间的允许偏差,建议与双绕组变压器一致,而试验顺序的选择按预计电动力的增大来确定。

4.2.7 故障检测和试验结果的判断

4.2.7.1 短路试验前,应按4.2.2要求进行测量和试验,对气体继电器(如果有)亦应进行观察。这些测量和试验均作为检测故障的依据。

4.2.7.2 每次试验(包括预先调整试验)期间,应对下列项目进行示波图记录:

- 施加电压;
- 电流(见4.2.5.2)。

此外,对被试变压器尚需进行外观检查和连续录像。

注1:可以使用补充的检测故障方法,以获得有关试验信息并使试验判断完善。这些方法有:记录油箱(将油箱绝缘起来)与地之间的电流,记录噪声与振动,记录在短路电流流过期间油箱内部不同位置的油压变化。

注2:试验时由于振动,可能引起气体继电器的偶然动作。这种现象对变压器承受短路的能力而言是无关紧要的,除非继电器中出现了可燃的气体。

注3:在励磁阶段中,油箱连接处可能出现短暂的火花放电,同时在励磁和短路阶段中,铁心框架接合处也可能出现内部火花放电。

4.2.7.3 每次试验后,应对试验期间所获得的示波图进行检查,同时观察气体继电器,并测量短路电抗。对于三相变压器,测出的电抗值应以每相为基准进行判断,在绕组为星形联结的情况下,可直接测出相对中性点的电抗;在绕组为三角形联结的情况下,可采用合适的方法从三角形联结绕组的接线图中推导出。

注1:可以使用补充的判断方法来判断试验结果,如绕组电阻的测量、低压冲击试验技术(对试验前和试验后分别录取的示波图进行比较)、频谱响应分析、传递函数分析、空载电流测量以及比较试验前和试验后溶解气体的分析结果。

注2:试验前和试验后所作测量结果之间的任何差异均可作为确定可能有缺陷的依据。特别是在连续试验的过程中,应注意观察每次试验后所测得的短路电抗的可能变化,此电抗值变化可能是递增的,也可能是趋于某个稳定值。

注3:为检查匝间故障,建议分别从高压侧和低压侧测量短路电抗。

4.2.7.4 试验后,应检查变压器外观和气体继电器(如果有)。应分析试验不同阶段中所测量的短路电抗值和所摄取的示波图,以找出试验过程中可能出现的异常迹象,尤其是短路电抗所显示的变化。

注1:如果绕组带有分接,试验后,应对短路试验时所用的各个分接位置进行电抗测量。

注2:在试验过程中,短路电抗的变化通常呈减小的趋势。电抗值也可能在试验后过了一段时间会有某些变化。因此,如果电抗变化大,以致超出了规定的限值,则可以以试验后立即测出的值为基准,再经过一定的时间间隔,对电抗值进行谨慎的重复测量,以确认这种变化是否保持住。在确定其是否符合标准时,要以最后测出的电抗值作为最终值。

在此阶段中,对Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类变压器所采用的程序是不同的。这些程序和电抗限值如下列项a)和项b)所述。

a) Ⅰ类和Ⅱ类变压器

除另有协议外,应将变压器吊心,检查铁心和绕组,并与试验前的状态相比较,以便发现可能出现的表面缺陷,如引线位置的变化、位移等,尽管这些变化不妨碍变压器通过例行试验,但可能会危及变压器

的安全运行。

重复全部例行试验,包括在 100%规定试验电压(见 GB 1094.3)下的绝缘试验。如果规定了雷电冲击试验,也应在此阶段中进行。但是,对于 I 类变压器,除绝缘试验外,其他重复例行试验可以不做。

如满足下述条件,则应认为变压器短路试验合格。

- 1) 短路试验的结果及短路试验期间的测量和检查没有发现任何故障迹象;
- 2) 重复的绝缘试验和其他例行试验合格,雷电冲击试验(如果有)合格;
- 3) 吊心检查没有发现诸如位移、铁心片移动、绕组及连接线和支撑结构变形等缺陷,或虽发现有缺陷,但不明显,不会危及变压器的安全运行;
- 4) 没有发现内部放电的痕迹;
- 5) 试验完成后,以欧姆表示的每相短路电抗值与原始值之差不大于:
 - 对具有圆形同心式线圈⁹⁾和交叠式非圆形线圈的变压器为 2%。但是,对于低压绕组是用金属箔绕制的且额定容量为 10 000 kVA 及以下的变压器,如果其短路阻抗为 3%及以上,则允许有较大的值,但不大于 4%。如果短路阻抗小于 3%,则应由制造方与用户协商,确定一个比 4%大的限值;
 - 对于具有非圆形同心式线圈的变压器,其短路阻抗在 3%及以上者为 7.5%。经制造方和用户协商,该 7.5%的值可以降低,但不低于 4%。

注 3: 对于具有短路阻抗小于 3%的非圆形同心式线圈的变压器,其电抗的最大变化不能用普通的方式加以规定。经验表明,对某些结构的变压器出现了达到 $(22.5 \sim 5.0 z_1)\%$ 的变化是可以接受的, z_1 是以百分数表示的短路阻抗。

注 4: 对设备最高电压 U_m 不高于 52 kV 的属于 II 类上限范围的变压器应特别注意,上述电抗变化的限值可能需要调整。

如果上述任何一项短路试验合格的条件没有满足,则应视需要拆卸变压器,以确定其异常的原因。

b) III 类变压器

应将变压器吊心,检查铁心和绕组,并与试验前的状态相比较,以便能够发现可能的表面缺陷,如引线位置的变化、位移等。尽管这些变化不妨碍通过例行试验,但可能会危及变压器的安全运行。

重复全部例行试验,包括在 100%规定试验电压(见 GB 1094.3)下的绝缘试验。如果规定了雷电冲击试验,也应在此阶段中进行。

如果满足下述条件,则应认为变压器短路试验合格。

- 1) 短路试验的结果及短路试验期间的测量和检查没有发现任何故障迹象;
- 2) 重复的例行试验合格,雷电冲击试验(如果有)合格;
- 3) 吊心检查没有发现诸如位移、铁心片移动、绕组及连接线和支撑结构变形等缺陷,或虽发现有缺陷,但不明显,不会危及变压器的安全运行;
- 4) 没有发现内部放电的痕迹;
- 5) 试验完成后,以欧姆表示的每相短路电抗值与原始值之差不大于 1%。

如果电抗变化范围在 1%~2%之间,应经用户与制造方协商一致后,方可验收。此时,可能要求做更详细的检查。必要时还要拆卸变压器,以确定其异常的原因。但建议拆卸前应先采取一些补充的诊断方法(见 4.2.7.3 的注 1)。

注 5: 由于 III 类变压器的价格和全面检查变压器内部各部分状态的经济影响,建议对绕组引线的位置、分接、垫块的垂直度和端部绝缘件外形等进行录像,以便对试验前和试验后变压器内部各部分作准确的比较。出于这种原因,检查绕组的轴向压紧力可能是有用的。如有必要,可由双方当事人之间相互达成接受现已存在的小位移和小变化的协议,只要它们不影响变压器运行的可靠性。

- 5) 圆形线圈包括所有绕在圆柱体上的线圈,即便如此,仍有偏离圆柱体形状的可能,例如,用金属箔卷制的线圈,由于引线的存在,有局部偏离圆柱体形状的可能。

附录 A (资料性附录)

承受短路动稳定能力的理论评估

A.1 范围

本附录给出了一些指导性原则,以便根据电力变压器性能设计的计算和考虑以及根据工厂生产实践,对变压器承受短路动稳定的能力进行理论上的评估。

注:关于电力变压器承受短路动稳定能力的技术争论方面的补充信息,见国际大电网会议(CIGRE)209 论文《电力变压器的短路特性》(2002 年 8 月)。

A.2 概述

电力变压器承受短路动稳定能力的理论评估,是由对其主要机械强度特征进行设计评审构成的。为此,需提供有关电磁设计数据单、短路电流计算、电磁力计算和机械力计算等资料以及图样、材料规范、制造经验和工艺规程等全部必要的技术资料。它们可汇编为变压器电磁设计和机械设计专用的文件或汇编为制造方技术文件的某个组成部分。

设计评审应检查在规定的短路故障条件下,产品设计中所出现的最大临界机械力和应力的数值,并将这些数值或是与一台短路试验合格的、且被认为与该待评估变压器相类似⁶⁾的参考变压器的相对应数值进行比较,或是对照制造方的短路强度设计规范对该待评估变压器进行检查。在设计评审中,绕组的支撑结构、夹紧装置及制造工艺也是要考虑的内容。

本附录所述的设计评审,主要用于Ⅱ类或Ⅲ类变压器。

对于Ⅰ类变压器,通常是属于大批量购买的产品,其评估方式最好是在其中的一台或两台产品上进行短路承受能力试验。对于大批量订货产品中一台或两台产品进行短路承受能力试验,通常被认为是一种最快捷并最经济的确认短路性能的方式。不过,对这类变压器也可采用包括设计评审在内的评估方式来确定其短路性能。

至于Ⅱ类或Ⅲ类变压器,制造方要按类似条件在其出厂产品文件档案中找出一台作为对比用的参考变压器,有时是不容易的。此时,可将待评估变压器的每一个特征(见附录 C)同时与台数不多的、且短路试验已合格的变压器进行对比,至少有一台参考变压器具有相同的相应特征。

例如,欲对一台具有降低容量的三角形联结第三绕组的三相自耦变压器进行评估,可分两个部分进行,即:

- 按均有串联绕组和公共绕组:与一台无第三绕组的三相自耦变压器的设计数据进行对比;
- 按均有第三绕组:与一台也具有降低容量的第三绕组(它也已进行了短路试验)的三相变压器进行对比。

A.3 设计评审导则

A.3.1 概述

设计评审应包含下列步骤:

- a) 按相应的技术文件对变压器进行鉴别。
- b) 选择下列两种方式之一对变压器进行评估:

6) 关于类似变压器的定义见附录 C。

- 与短路试验已合格的变压器进行对比,或
- 检查制造方的短路强度设计规范。

c) 公布设计评审结果并对评估变压器做出正式确认。

A.3.2 关于待评估变压器的信息

制造方需为设计评审提供下列资料:

- a) 计算所需的电磁设计数据单。
- b) 铁心窗口内的绕组和绝缘整体布置图或草图,并标明所用材料的型号。
- c) 作用于每个绕组上的短路电流值计算(包括峰值和对称电流方均根值)。它们是考虑了规定的运行工况要求、短路故障类型及带分接绕组的分接位置等而得出的。
- d) 主要的短路力计算(在最大峰值电流下的相应峰值),这些计算是根据短路故障类型、分接位置和设计考虑的各绕组的几何位置和相对位置得出的。如果为了计算漏磁场和电磁力而对绕组、铁心和油箱采用了简化的几何布置图,则要给出与此有关的全部信息。

心式变压器的轴向短路力和壳式变压器的幅向短路力均很容易受到具有磁势极性符号相反的绕组之间的相对位置的影响,制造方应规定其制造偏差造成的位移量以及计算短路力的绕组外形图(对称平面和边界条件)。

下列电磁力应予以考虑:

1) 对于心式变压器:

- 每个实体绕组的内向幅向力或外向幅向力;
- 每个实体绕组的最大轴向压缩力(F_c^*)⁷⁾;
- 每个实体绕组的最大轴向端部推力(向上/向下);
- 每个心柱上的公共压环或压板(如果使用了)及铁心夹件上的最大轴向力;
- 每个低压绕组出线头处的推力(T_i^*)⁸⁾。

2) 对于壳式变压器:

- 铁心窗口内和窗口外的每个线圈和绕组堆上的轴向力;
- 线饼上的幅向力;
- 相间楔形块上及顶住铁心和油箱加强结构压块上的总力;
- 铁心叠片上的总力;
- 油箱加强结构上的总力。

对于每个实体绕组,在设计中要对所考虑绕组的分接位置和短路类型下的最严重的作用力条件进行确定。至于变压器整体结构,要考虑在系统中出现最大无功功率下发生短路故障时所产生的力。

c) 绕组导线及与其机械相连的各种结构件在短路力作用下的基本机械应力计算。以下各种机械应力应予以考虑:

1) 对于心式变压器:

- 外绕组上的平均环形拉伸应力(σ_t^*)⁹⁾;
- 连续式、螺旋式或单层式内绕组上的平均环形压缩应力(σ_c^*)¹⁰⁾;

7) 本附录中所用的上标符号“*”表示与预计短路电流最大峰值相关的物理量(力或应力)。

8) 作用于低压绕组出线头处推力的定义和计算见 A.3.3.2.2。

9) 关于平均环形拉伸应力的计算,对于具有一个或多个有一定幅向宽度的冷却油道的连续式和螺旋式绕组,可以将其看成是无油道的长条实心环体结构。

10) 关于平均环形压缩应力的计算,对于具有一个或多个有一定幅向宽度的冷却油道的连续式和螺旋式绕组,可以将其看成是无油道的长条实心环体结构。

- 多层式内绕组上的等值平均环形压缩应力($\sigma_{c,eq}^*$)¹¹⁾;
 - 在用撑条和垫块构成绕组内具有幅向宽度的轴向冷却油道时,导线在撑条间和垫块间的跨度内的幅向弯曲应力(σ_{cr}^*);
 - 在连续式和螺旋式绕组中幅向垫块之间的跨度内的轴向弯曲应力(σ_{ba}^*);
 - 在连续式和螺旋式绕组中幅向垫块上的压缩应力(σ_{sp}^*)¹²⁾;
 - 多层式绕组中导线纸绝缘上的压缩应力(σ_{pi}^*);
 - 端部层叠式绝缘结构件上的压缩应力(σ_{es}^*)和端圈上的压缩应力(σ_{cr}^*);
 - 公共压环或压板(如果使用了)上的压缩应力(σ_{pr}^*);
 - 夹紧结构中的拉杆(拉板条)上的拉伸应力(σ_{rod}^*)。
- 2) 对于壳式变压器:
- 在线饼垫块之间的跨度内的导线上的轴向弯曲应力(σ_{ba}^*);
 - 线饼中导线纸绝缘上的压缩应力(σ_{pi}^*)和线饼垫块上的压缩应力(σ_{sp}^*);
 - 相间楔形块上的压缩应力(σ_{iw}^*)和顶住铁心及油箱加强结构压块上的压缩应力(σ_{pb}^*);
 - 铁心叠片上的拉伸应力和弯曲应力(σ_{di}^*);
 - 油箱加强结构件上的拉伸应力和弯曲应力(σ_{tr}^*)。

对于每个实体绕组和结构零件,应考虑由短路力引起的最严重的应力条件。

f) 有关绕组固定结构和器身(线圈及铁心)夹紧布置的图样、草图或计算机输出,例如:

- 1) 对于心式变压器:
 - 铁心柱固定的幅向支撑件的布置、端部层叠式绝缘构件、公共压环或压板(如果使用了)、整个器身(线圈和铁心)夹紧装置等。
 - 2) 对于壳式变压器:
 - 线圈端头和相间的轴向夹紧装置、压块、填充件和楔形块以及绕组与铁心之间的绝缘隔屏等;
 - 铁心顶住油箱的支撑件,支撑铁心、油箱加强结构及其他紧固铁心叠片的弹簧装置等。
 - 3) 通用方面:
 - 确保绕组出头、接到套管的低压连接线或母线以及接到分接开关的引线等紧固的措施;
 - 施加轴向预加负荷的方式。
- g) 有关材料和生产工艺方面的质量保证和质量控制的说明,特别是下述生产工艺方面:
- 1) 在卷线筒上的导线卷制和其拉力控制,以及绕组、线段(层)的尺寸和弹性固定的控制、规定偏差范围内的装配、油浸渍及干燥、预负荷(夹紧力)的施加,绕组支撑件、引线和夹紧装置的紧固并可靠等;
 - 2) 专用于壳式变压器:采用相间楔形块、压块使线圈在铁心窗口内和窗口外均顶住铁心和油箱加强结构的夹紧和压紧。
- h) 变压器的主要外部组件,特别是高压套管(尤其是斜置于升高座上的高压套管)的检查。

A.3.3 变压器评估

A.3.3.1 概述

在变压器评估中,有两种方法可供选用。一种是将其与一台短路试验合格的参考变压器进行对比(见 A.3.3.2);另一种方法则是对制造方正常生产中所采用的短路强度设计规范文件进行检查

- 11) 在具有两层且各层厚度相等的情况下,其等值平均环形压缩应力等于各层环形压缩应力的算术平均值。在具有三层或更多层的情况下,此应力假定为各层压缩应力的算术平均值的 1.1 倍。
- 12) 幅向垫块上的压缩应力是通过考虑被裸导线所覆盖的面积并忽略裸导线四周圆倒角的影响而计算出来的。

(见 A.3.3.3)。

A.3.3.2 与参考变压器进行对比的评估法

A.3.3.2.1 参考变压器的确认

满足下列各项要求并适合于按规定条件作对比用的变压器称为参考变压器。

- 其性能参数被认为与待评估变压器相类似；
- 其设计所用的计算方法和机械力耐受准则基本上与待评估变压器相同；
- 其生产中所依据的操作规范、质量保证和质量控制规范基本上与待评估变压器相同；
- 设计中所采用的短路强度技术规范的有效范围包括了这两台变压器的性能参数。

参考变压器应是短路试验合格的变压器。

参考变压器的确认步骤如下：

- 检查是否适用于上述对比的目的；
- 检查短路试验报告；
- 确认主要电磁设计数据、所作的计算和设计所采用的机械力耐受准则；
- 确认生产操作规范、质量保证和质量控制规范。

A.3.3.2.2 对比性评估

对比性评估应从对两台变压器的绕组、主要绝缘结构和夹紧装置、特别是它们各自可见的机械力耐受性能的检查 and 对比开始。通过此对比性评估，就有可能从原则上得出待评估变压器的基本机械结构强度与参考变压器相同的结论。

然后，对两台变压器相对应的力和应力的计算值(见 A.3.2)进行对比。为此，建议采用表 A.1 或表 A.2 来进行此对比工作。涉及待评估变压器和参考变压器任何力或应力的数值，应分别填入标有“act”(实际)和“ref”(参考)的栏内。设计时所考虑的短路条件下产生的最大力或应力，应既用于每个实体绕组和相关的零部件，也用于变压器的整体机械结构。

经过相互对比，如果待评估变压器的填入表 A.1 或表 A.2 内的力或应力的数值，没有一个超过参考变压器相对应的力或应力数值的 1.2 倍，则认为待评估变压器能承受规定条件下的短路的动稳定效应。但对于心式变压器，还需增加下述更严格的力和应力的限值要求。

- 连续式、螺旋式和单层式绕组上的平均环形压缩应力

$$\sigma_{c,act}^* \leq 1.1 \sigma_{c,ref}^*$$

- 多层式绕组上的等值平均环形压缩应力

$$\sigma_{c,eq,act}^* \leq 1.1 \sigma_{c,eq,ref}^*$$

- 低压绕组出头处的推力¹³⁾

$$T_{f,act}^* \leq 1.1 T_{f,ref}^*$$

A.3.3.3 对制造方的短路强度设计规范进行检查的评估法

A.3.3.3.1 制造方短路强度设计资料的确认

待评估变压器设计所依据的短路强度规范应具有足够的经验基础。这就意味着，这些规范是在对一些实际变压器的短路试验结果进行分析的基础上编制的，或是在对一些有代表性的变压器模型(融入了长期无短路故障运行的变压器的间接经验而制作的)的试验结果进行分析的基础上编制的，或是在对上述两种试验结果同时进行分析的基础上编制的。制造方应提供下列信息：

- 已生产并已进行了短路试验的变压器统计表，其内容包括变压器主要技术参数数据，如：额定容量、额定电压、分接范围和短路阻抗等。

13) 作用于低压绕组出线头处的推力(kN)，通常假定为绕组上的平均环形压缩应力(kN/mm²)与该出线头截面积(mm²)的乘积，此推力可能使绕组呈螺旋状向上绷紧变形。在个别场合下，当低压绕组是外绕组时，此应力具有拉力性质，从而使该绕组有松散的趋势。

- 模型的试验结果(如果进行了)及其对设计规范的影响。
- 制造方在其正常设计和生产过程中所使用的有关电力变压器短路强度技术标准的内容。
- 有关变压器短路性能方面的现场运行记录和现场运行的故障率。
- 变压器的生产台数及其良好运行的年数。

上述信息应能证明制造方已经拥有了正确的短路强度设计规范。

A.3.3.3.2 检查程序

检查程序应从对变压器的绕组结构、主要绝缘结构和夹紧装置的检查开始。通过这些检查,应能得出待评估变压器所采用的绕组和主绝缘结构以及夹紧装置与制造方在已生产的那些短路性能良好的变压器上所采用的是一致的结论。

下一步是将作用在变压器上的各种力和应力(见 A.3.2)的计算值与制造方在实际设计中所采用的相应的许用值或极限值进行对比¹⁴⁾。对于不同的生产单位,这些数值可能是不同的。为此,建议使用表 A.1 或表 A.2。将任何有关待评估变压器的力或应力值填入标有“act(实际)”的相应栏内。将制造方作为设计规范的许用力或应力、极限力或应力数值填入标有“all(许用)”或“crit(极限)”的相应栏内。按设计中考虑的各种短路条件下所得到的最大力或应力数值应分别用于每个实体绕组及与其相关的零部件和整体结构。

注:在心式变压器中,应特别注意作用在绕组上的环形压缩应力的重要性。绕组受到这种环形压缩应力时,可能会由于在相邻两支撑件之间的跨度内的导线向内过度弯曲(强制翘曲),或由于稳定性丧失而导致绕组周围一处或几处的导线幅向严重变形(自由翘曲)而损坏。

典型的强制翘曲一般在其内表面有比较硬的支撑件的绕组中发生。

自由翘曲是一种更常见的塌陷模式,当结构中的压缩应力一旦达到极限值,它便会突然发生。

规定自由翘曲的极限压缩应力值是一项非常复杂的任务,这是由于绕组本身的非均匀特性和生产工艺对其有影响的缘故。

由于上述理由,所以目前尚无法给出绕组极限环形压缩应力的专用计算公式。

有关电力变压器短路承受能力的翘曲和其他技术问题的补充信息,见国际大电网会议(CIGRE)209 论文《电力变压器的短路特性》(2002 年 8 月)。

当有下列检查结果,即:填入表 A.1 或表 A.2 中的力和应力值中,没有一项超过制造方设计中采用的相应最大许用力或应力值,并且也不超过制造方认可的相应极限值的 0.8 倍时,则认为该变压器能承受住规定条件下的短路动稳定性效应。

作为指导用,下面所列出的许用力和应力限值是根据以往的经验并考虑到各种限制因素,如:材料性能、偏差、机械设计细节和生产工艺等确定的。然而,不管怎样,还不能把它们当作标准限值,且还可有条件地在设计中超过它们,只要制造方能表明其所采用的更高值具有充分的经验和文件证明即可。

a) 对于心式变压器

- 连续式绕组、螺旋式绕组及多层式绕组中每一层上的平均环形拉伸应力¹⁵⁾

$$\sigma_{t,act}^* \leq 0.9 \cdot R_{p0.2}$$

- 连续式绕组、螺旋式绕组及单层式绕组上的平均环形压缩应力

(i) 对于常规导线和非自粘性的 CTC_S¹⁶⁾

$$\sigma_{c,act}^* \leq 0.35 \cdot R_{p0.2}$$

(ii) 对于自粘性导线和 CTC_S

$$\sigma_{c,act}^* \leq 0.6 \cdot R_{p0.2}$$

14) 许用值是指结构所能承受的不会损害其强度和功能的力和应力值;极限值是指使结构产生永久变形、丧失稳定性或发生塌陷的力或应力值。

15) 验证应力 $R_{p0.2}$ 是指当负荷持续增加到按非比例拉伸达到计量长度的 0.2% 时的拉伸应力。

16) CTC_S 是连续换位导线的简称。

- 多层式绕组的等值平均环形压缩应力
 - (i) 对于常规导线和非自粘性的 CTC_s

$$\sigma_{c,eq,act}^* \leq 0.35 \cdot R_{p0.2}$$
 - (ii) 对于自粘性组合导线和自粘性的 CTC_s

$$\sigma_{c,eq,act}^* \leq 0.6 \cdot R_{p0.2}$$
 - 在撑条或垫块之间的跨度内的导线幅向弯曲应力

$$\sigma_{br,act}^* \leq 0.9 \cdot R_{p0.2}$$
 - 在幅向垫块之间的跨度内的导线轴向弯曲应力

$$\sigma_{ba,act}^* \leq 0.9 \cdot R_{p0.2}$$
 - 与导线倾斜相关的每个实体绕组上的最大轴向压缩力¹⁷⁾

$$F_{c,act}^* \leq 0.8 F_{tilt}^*$$
 - 幅向垫块的压缩应力¹⁸⁾
 - (i) 导线为纸包绝缘时

$$\sigma_{sp,act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
 - (ii) 导线为纯漆包绝缘时

$$\sigma_{sp,act}^* \leq 120 \text{ MPa}$$
 - 层式绕组中导线纸绝缘的压缩应力

$$\sigma_{pi,act}^* \leq 35 \text{ MPa}$$
 - 纸板卷制端圈的压缩应力

$$\sigma_{cr,act}^* \leq 40 \text{ MPa}$$
 - 纸板层压端圈的压缩应力

$$\sigma_{cr,act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
 - 纸板制成的公共压环或压板(如果用了)的压缩应力

$$\sigma_{pr,act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
 - 夹紧结构中的拉杆(板形拉条)的拉伸应力¹⁹⁾

$$\sigma_{rod}^* \leq R_{el}$$
- b) 对于壳式变压器
- 线圈垫块之间的跨度内导线轴向弯曲应力

$$\sigma_{ba,act}^* \leq 0.9 \cdot R_{p0.2}$$
 - 垫块及导线纸绝缘的压缩应力

$$\sigma_{pi,act}^*, \sigma_{sp,act}^* \leq 35 \text{ MPa}$$
 - 纸板制成的相间楔形块和压紧块的压缩应力

$$\sigma_{iw,act}^*, \sigma_{pb,act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
 - 纤维增强塑料或层压木制成的相间楔形块和压紧块的压缩应力

$$\sigma_{iw,act}^*, \sigma_{pb,act}^* \leq 120 \text{ MPa}$$
 - 铁心叠片上的拉伸和弯曲应力

$$\sigma_{cl,act}^* \leq R_{el}$$
 - 油箱增强结构的拉伸和弯曲应力

$$\sigma_{tr,act}^* \leq R_{el}$$

17) 关于 F_{tilt}^* , 见本附录末尾处的注 1。

18) 适用于预压纸板制造的垫块。

19) R_{el} 为材料的较低屈服应力, 它实际上等于 $R_{p0.2}$ 。

- 铁心叠片搭接面积上的压力²⁰⁾

$$P_{act} \geq P$$

A.3.4 设计评审结果及对待评估变压器的确认

如有下列结论,则认为本设计评审可信:

- 经检查,规范的要求充分包括了实际系统条件;
- 设计充分包括了规范中的内容;
- 设计评审已按 A.3.1 和 A.3.2 进行,且确认了所有的已算出的力和应力;
- 已按 A.3.3.2 或 A.3.3.3 对所考虑变压器进行了评估,且由表 A.1 或表 A.2 所列的值来看,显然满足了本附录中所列的短路力和应力的准则;
- 从机械设计和生产工艺来看,足以判定其能够为所要求的变压器短路性能提供保证。

要求用户正式确认按本附录所规定的准则对变压器所作的设计评审已取得了可信的结果。由此,应由供需双方共同签署一份合适的鉴定书。

用户签名并不意味着免除制造方对变压器在规定运行工况下的短路动稳定承受能力和无不符合方面出现问题时应负的责任。

在设计评审期间交给用户的信息,具有制造方的知识产权的性质,应予以保密。

表 A.1 心式变压器中的力和应力的对比

| 力或应力的类型 | 低压绕组 | | | | 中压绕组 | | | | 高压绕组 | | | | 分接绕组 | | | |
|------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|
| | act. | ref. | all. | crit. |
| 连续式、螺旋式和多层式绕组上的平均环形拉应力(MPa) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 连续式、螺旋式和单层式绕组上的平均环形压缩应力(MPa) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 多层式绕组的等值平均环形压缩应力(MPa) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 位于撑条或垫块之间的导线幅向弯曲应力(MPa) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 在幅向垫块之间的跨度内的导线轴向弯曲应力(MPa) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 作用于低压绕组出头处的推力(kN) | | | | | | | | | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 作用于每个实体绕组上的最大压缩力(kN) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 绕组最大轴向压缩力及倾斜时的极限值(对比列出)(kN) | | — | — | | | — | — | | | — | — | | | — | — | |
| 每个实体绕组的最大轴向端部推力 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ——向上(kN) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ——向下(kN) | | | | | | | | | | | | | | | | |

20) 关于 P,见本附录末尾处的注 2。

表 A.1 (续)

| 力或应力的类型 | 低压绕组 | | | | 中压绕组 | | | | 高压绕组 | | | | 分接绕组 | | | |
|--|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| | act. | ref. | all. | crit. | act. | ref. | all. | crit. | act. | ref. | all. | crit. | act. | ref. | all. | crit. |
| 导线纸绝缘和幅向垫块的压缩应力(kN) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 端部层压块绝缘构件和端环上的压缩应力(MPa) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 公共压环(或压板)上的压缩应力(MPa) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | crit. | | | |
| 拉紧杆(拉条)上的拉伸应力(MPa) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | crit. | | | |
| 每个心柱的夹紧力(kN) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | — | | | |
| 注 1: act. ——与待评估实际变压器有关的力或应力计算值。 注 2: ref. ——与参考变压器有关的力或应力计算值。 注 3: all. ——许用力或许用应力值(按制造方设计规范)。 注 4: crit. ——极限力或极限应力值(按制造方设计规范)。 | | | | | | | | | | | | | | | | |

表 A.2 壳式变压器中的力和应力的对比

| 力或应力的类型 | 低压绕组 | | | | 中压绕组 | | | | 高压绕组 | | | | 分接绕组 | | | |
|--|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| | act. | ref. | all. | crit. | act. | ref. | all. | crit. | act. | ref. | all. | crit. | act. | ref. | all. | crit. |
| 线圈垫块之间的跨度内的导线轴向弯曲应力(MPa) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 导线纸绝缘和垫块上的压缩应力(MPa) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 相间楔形块和压紧块上的总力(kN) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | crit. | | | |
| 铁心叠片上的总力(kN) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | crit. | | | |
| 油箱加强结构件上的总力(kN) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | crit. | | | |
| 相间楔形块和压紧块上的压缩应力(MPa) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | crit. | | | |
| 由幅向力作用于铁心叠片上的拉伸应力/弯曲应力(MPa) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | crit. | | | |
| 由轴向力作用于油箱加强结构件上的拉伸应力/弯曲应力(MPa) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | crit. | | | |
| 叠片搭接面积上的压力(MPa) | act. | | | | ref. | | | | all. | | | | crit. | | | |
| 注 1: act. ——与待评估实际变压器有关的力或应力计算值。 注 2: ref. ——与参考变压器有关的力或应力计算值。 注 3: all. ——许用力或许用应力值(按制造方设计规范)。 注 4: crit. ——极限力或极限应力值(按制造方设计规范)。 | | | | | | | | | | | | | | | | |

注 1: 对于心式变压器, 当实体绕组受到过大的轴向压缩力时, 可能会丧失其机械稳定性的能力。此时, 绕组发生“倾斜”, 即在绕组幅向宽度内同一排各相邻导线出现了整体向同一方向倾斜。另一方面, 沿轴向相邻的下面一排导线组则整体向相反的方向倾斜。由此便认为绕组导线组呈“曲折形”变形。

因此, 要求作用在绕组上的最大轴向压缩力 F_a^* 要小于因导线发生倾斜时诱发塌陷的极限力 F_{lim}^* 。因而也应在这两个力之间有一个足够的安全裕度。

必须区分下述两种情况:

- a) 对于采用自粘性的 CTC_S 导线卷制的连续式、螺旋式和层式绕组, 与倾斜有关的最大轴向压缩力不是制约设计的因素。事实上, 这种绕组导线特别能抗倾斜, 且与铜材的工作硬度无关。因此, 不必对此进行检验;
- b) 对于采用导线或非自粘性的 CTC_S 导线卷制成的连续式、螺旋式和层式绕组, 需要按下式计算其相应的极限倾斜力 F_{lim}^* :

$$F_{\text{lim}}^* = \left[K_1 \cdot E_0 \cdot \frac{n \cdot b_{\text{eq}} \cdot h^2}{D_{\text{mw}}} + K_2 \cdot \frac{n \cdot X \cdot b_{\text{eq}}^3 \cdot \pi \cdot D_{\text{mw}} \cdot \gamma}{h} \right] \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kN})$$

式中:

E_0 ——铜的弹性模数, 为 1.1×10^5 MPa;

n ——在用扁导线时, 为绕组幅向宽度中导线数或组合导线数; 在用 CTC_S 导线时, 它等于 $g \cdot (f-1)/2$ 。

其中:

g 为绕组幅向宽度中的 CTC_S 数,

f 为单根 CTC_S 导线中的导线根数;

b_{eq} ——用扁线时, 为导线幅向宽度 (mm),

用自粘性组合导线时, 为单根导线幅向宽度的 2 倍 (mm),

用非自粘性的 CTC_S 导线时, 为单根导线幅向宽度 (mm);

D_{mw} ——绕组的平均直径 (mm);

$X = \frac{c \cdot z}{\pi \cdot D_{\text{mw}}}$ 为连续式、螺旋式绕组的垫块覆盖系数,

其中:

c 为幅向垫块宽度 (沿圆周方向) (mm),

z 为在圆周上的幅向垫块数;

X ——对于层式绕组, 为 1;

h ——如果导线是扁线, 则为导线的高度 (mm),

如果是两根轴向并排的且用纸包为一体的导线, 则为单根导线高度的 2 倍 (mm),

如果是 CTC_S 导线, 则为单根导线的高度 (mm);

γ ——导线形状常数,

对于标准圆角半径导线, 为 1.0,

对于全圆角半径导线, 为 0.85;

K_1 ——扭曲项系数, 为 0.5;

K_2 ——分层叠置项系数 (N/mm³),

当是单根或双根导线时, 为 45,

当是非自粘性 CTC_S 导线时, 为 22;

K_3 ——计及铜工作硬度等级的系数 (见表 A.3);

K_4 ——计及动态倾斜的系数 (见表 A.4)。

表 A.3 系数 K_3 值

| $R_{p0.2}$ /MPa | K_3 |
|-----------------|-------|
| 退火的 | 1.0 |
| 150 | 1.1 |
| 180 | 1.2 |
| 230 | 1.3 |
| >230 | 1.4 |

表 A.4 系数 K_4 值

| 导线类型 | 绕组形式 | |
|------------------------|---------|-----|
| | 连续式,螺旋式 | 层式 |
| 单根或双根 | 1.2 | 1.1 |
| 非自粘性的 CTC _s | 1.7 | 1.3 |

应注意上述 F_{sh} 的计算公式是指动态倾斜且是按半经验方法得到的。此力的实际极限值也与绕组结构和导线绝缘的性质及厚度有关。

注 2: 为了夹紧铁心,施加于铁心叠片搭接面上的压力 P 必须至少为:

$$P = \frac{F^* \cdot 10^3}{2 \cdot S \cdot a \cdot t \cdot h} \quad (\text{MPa})$$

式中:

F^* ——作用于端部铁轭上的短路力峰值(kN);

S ——铁心叠片的角搭接处面积(mm^2);

a ——粘合系数(标么值);

t ——铁心单位厚度(mm^{-1})的叠片张数;

h ——铁心厚度(mm)。

附录 B
(资料性附录)

IEC 60076-5:2006 的系统短路视在容量

IEC 60076-5:2006 的系统短路视在容量见表 B.1 的规定。

表 B.1 IEC 60076-5:2006 中的系统短路视在容量

| 设备最高电压 U_m / kV | 短路视在容量/MVA | |
|----------------------|------------|--------|
| | 欧洲现用值 | 北美现用值 |
| 7.2;12;17.5;24 | 500 | 500 |
| 36 | 1 000 | 1 500 |
| 52;72.5 | 3 000 | 5 000 |
| 100;123 | 6 000 | 15 000 |
| 145;170 | 10 000 | 15 000 |
| 245 | 20 000 | 25 000 |
| 300 | 30 000 | 30 000 |
| 362 | 35 000 | 35 000 |
| 420 | 40 000 | 40 000 |
| 525 | 60 000 | 60 000 |
| 765 | 83 500 | 83 500 |

注：如无规定，则认为系统零序阻抗与正序阻抗之比为 1~3。

附 录 C
(资料性附录)
类似变压器的确定

如果一台变压器与另一台被当作参考变压器的下列特征相同,则该台变压器被看作与参考变压器相类似:

- 运行方式相同,如为发电机升压变压器、配电变压器、联络变压器;
 - 设计结构相同,如为干式、油浸式、带有同心式绕组的心式、交叠式、壳式、圆形线圈、非圆形线圈;
 - 主要绕组的排列和几何分区顺序相同;
 - 绕组导线材质相同,如为铝、铝合金、软铜或硬铜、金属箔、圆线、扁线、连续换位导线和环氧树脂粘接(如果用);
 - 主要绕组类型相同,如为螺旋式、连续式、层式、饼式;
 - 短路时吸取的容量(额定容量/短路阻抗标么值)为参考变压器的30%~130%之间;
 - 短路时轴向力和绕组应力不超过参考变压器的120%;
 - 制造工艺过程相同;
 - 固定和支撑方式相同。
-