

ICS 29.180

CCS K 41



团 体 标 准

T/CEATEC XXX—2026

非晶合金变压器抗短路绕组结构设计 与验证规范

Specification for design and verification of short-circuit resistant winding
structures in amorphous alloy transformers

(征求意见稿)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 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 总体设计原则	2
4.1 设计目标	2
4.2 基本设计原则	2
4.3 设计流程	2
5 绕组结构设计	2
5.1 绕组基本参数选择	2
5.2 安匝分布设计	3
5.3 绕组支撑与固定结构	3
5.4 绕组制造工艺要求	3
6 机械强度校核	4
6.1 短路电流计算	4
6.2 辐向力计算	4
6.3 轴向力计算	5
6.4 支撑结构强度校核	5
7 抗短路能力验证	5
7.1 验证方法	5
7.2 验证条件	5
7.3 验证判定准则	6
7.4 验证报告	6

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

非晶合金变压器抗短路绕组结构与验证规范

1 范围

本文件规定了非晶合金变压器抗短路绕组结构与验证的总体设计原则、绕组结构设计、机械强度校核、抗短路能力验证。

本文件适用于非晶合金变压器抗短路绕组的设计、制造及验证。

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 电力变压器 第1部分：总则

GB/T 1094.5 电力变压器 第5部分：承受短路的能力

GB 20052 电力变压器能效限定值及能效等级

GB/T 25446 油浸式非晶合金铁心配电变压器 技术参数和要求

DL/T 911 电力变压器绕组变形的频率响应分析法

3 术语和定义

GB/T 1094.1、GB/T 25446 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

抗短路能力 short-circuit withstand capability

变压器在规定的短路条件下（包括最大峰值电流和对称电流有效值），承受短路电流产生的热效应和机械动力的能力，且在短路后不出现绕组变形、绝缘损伤或性能劣化。

3.2

漏磁场 leakage magnetic field

变压器绕组中电流产生的未完全耦合到另一绕组的磁通所对应的磁场，是短路电磁力的来源。

3.3

安匝平衡 ampere-turn balance

在变压器绕组轴向高度上，各位置的总安匝数分布均匀，不平衡安匝数最小化的状态。良好的安匝平衡是减小轴向电磁力的关键。

3.4

辐向力 radial force

短路电流作用下，作用于绕组径向方向（垂直于绕组轴线）的电磁力，使绕组产生向外扩张或向内压缩的趋势。

3.5

轴向力 axial force

短路电流作用下，作用于绕组轴向方向（平行于绕组轴线）的电磁力，使绕组产生轴向位移或端部压紧力变化的趋势。

4 总体设计原则

4.1 设计目标

应满足以下目标：

- a) 在 GB/T 1094.5 规定的短路条件下，绕组不应发生显著变形、绝缘损坏或电气性能下降；
- b) 短路试验前后，每相电抗变化率不大于 7.5%；
- c) 短路试验后，变压器应能通过例行试验项目，包括空载损耗、负载损耗、绝缘电阻及工频耐压试验。

4.2 基本设计原则

4.2.1 安匝平衡原则

绕组轴向安匝分布应尽可能均匀，减小不平衡安匝产生的轴向力。高压绕组分接抽头应采用对称布置，确保各分接档位下安匝分布对称。

4.2.2 漏磁对称原则

绕组轴向漏磁通分布应沿中心对称，使绕组各层所受辐向力相互平衡，减小合成轴向力。

4.2.3 刚度强化原则

绕组应具备足够的机械强度，矩形绕组应采用整体固化工艺，增强抗变形能力。

4.2.4 应力隔离原则

铁心与绕组之间应采取弹性支撑结构，确保短路力不直接传递至对机械应力敏感的非晶合金铁心。

4.3 设计流程

应按以下流程进行：

- a) 根据额定容量、电压等级及短路阻抗要求，确定绕组基本参数（匝数、导线规格、层数、电抗高度等）；
- b) 进行安匝分布设计，确保各分接档位下安匝平衡；
- c) 计算短路电流及漏磁场分布；
- d) 计算绕组所受辐向力与轴向力；
- e) 校核绕组机械强度及支撑结构承载能力；
- f) 必要时调整设计参数，重复 c) ~ e) 步骤；
- g) 确定最终绕组结构及制造工艺要求。

5 绕组结构设计

5.1 绕组基本参数选择

5.1.1 额定容量与短路阻抗

额定容量与短路阻抗的对应关系应符合表 1 的规定。为提高抗短路能力，在满足 GB 20052 能效要求的前提下，短路阻抗取值应在标准规定范围内适当提高，以降低短路电流幅值。

表 1 额定容量与短路阻抗推荐值

额定容量/kVA	短路阻抗 (%)	短路电流倍数 (额定电流倍数)
30~100	4.0	25.0
125~630	4.5	22.2
800~1250	5.0	20.0
1600~2500	6.0	16.7

注：短路电流倍数按公式 $K = \frac{100}{U_k}$ 计算，其中 U_k 为短路阻抗百分数。

5.1.2 绕组导线选择

应符合以下要求：

- a) 低压绕组：容量 $\leq 100\text{kVA}$ 时可采用铜导线绕制，容量 $\geq 100\text{kVA}$ 时应采用铜箔绕制，铜箔厚度宜为 $0.8\text{mm}\sim 1.5\text{mm}$ ，宽度应与绕组高度匹配；
- b) 高压绕组：应采用多层圆筒式结构，导线宜选用漆包铜扁线或复合绝缘铜导线；
- c) 导线：应满足短路热稳定要求，短路电流密度不宜超过 $160\text{A}/\text{mm}^2$ 。

5.2 安匝分布设计

5.2.1 分接抽头布置

高压绕组分接抽头应采用对称布置方式，使各分接档位下的安匝分布保持平衡，设计方法如下：

- a) 将高压绕组分为两部分，第一部分为基本匝数（对应最小分接档），第二部分为调压匝数；
- b) 调压匝数采用反向绕制，使调压段与基本段在轴向高度上互补，实现各分接档位下安匝平衡；
- c) 分接抽头对称布置于绕组轴向两端，确保各档位下电流路径的对称性。

5.2.2 各分接档位要求

各分接档位下安匝平衡设计应符合以下要求：

- a) 额定档：调压段无电流通过，非通电部分高度相等，形成相互补偿；
- b) 最小电压档：调压段部分匝数无电流，剩余有电流部分高度与补偿段高度相等；
- c) 最大电压档：全部匝数通流，电抗高度分布均匀。

5.3 绕组支撑与固定结构

5.3.1 绕组内部支撑

应符合以下要求：

- a) 低压绕组内侧应设置高强度绝缘筒，绝缘筒厚度不应小于 3mm ，材料宜选用环氧玻璃布层压板；
- b) 高压绕组外侧应设置成型绝缘筒，增强绕组整体刚度；
- c) 矩形绕组的四角处应设置圆弧过渡，曲率半径不宜小于导线厚度或箔厚的 5 倍，以减小应力集中。

5.3.2 绕组端部支撑

应符合以下要求：

- a) 绕组两端应设置绝缘端圈和压板，端圈材料宜选用高密度绝缘纸板，压板宜选用环氧玻璃布层压板；
- b) 端部压紧垫块应沿绕组圆周均匀分布，相邻垫块间距不宜大于 100mm ；
- c) 压紧力应均匀施加于绕组端部，单位面积压力宜为 $1.5\text{MPa}\sim 2.5\text{MPa}$ 。

5.3.3 铁心与绕组间支撑

应符合以下要求：

- a) 铁心与绕组之间应采用弹性支撑结构，宜选用耐油橡胶垫或硅橡胶垫；
- b) 弹性支撑厚度不宜小于 5mm ，压缩量宜控制在 $20\%\sim 30\%$ ；
- c) 支撑结构应确保绕组与铁心同心度偏差不大于 1.0mm 。

5.4 绕组制造工艺要求

5.4.1 绕制工艺

应符合以下要求：

- a) 高、低压绕组应采用导线张力装置同步绕制，张力控制偏差不应大于 $\pm 5\%$ ；
- b) 矩形绕制过程中应设置导向装置，确保层间整齐，匝间紧密；
- c) 绕组绕制完成后应进行热压整形，加热温度宜为 $120^\circ\text{C}\sim 140^\circ\text{C}$ ，压力宜为 $2.0\text{MPa}\sim 3.0\text{MPa}$ ，保压时间不应少于 4h 。

5.4.2 绕组固化处理

应符合以下要求：

a) 矩形绕组干燥后应进行端部浸渍处理, 浸渍漆宜选用 1032 改性醇酸树脂浸渍漆或 H 级绝缘浸渍漆;

b) 浸渍后应进行烘焙固化, 烘焙温度按浸渍漆产品要求执行, 固化后绕组整体刚度应显著提高;

c) 对于干式非晶合金变压器, 可采用真空压力浸渍工艺, 确保绝缘树脂充分渗透。

5.4.3 器身装配

应符合以下要求:

a) 器身压紧应采用上、下夹件夹紧结构, 夹件与绕组端部之间应设置缓冲垫;

b) 上、下夹件应通过拉螺杆紧固, 拉螺杆直径不应小于 12mm, 紧固力矩应符合设计要求;

c) 夹件与铁心之间应设置绝缘隔离, 确保铁心不受力。

6 机械强度校核

6.1 短路电流计算

6.1.1 对称短路电流有效值

应按公式 (1) 计算:

$$I_{SC} = I_r \times \frac{100}{U_k} \times K_{as} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

I_{SC} ——对称短路电流有效值, 单位为安培 (A);

I_r ——额定电流, 单位为安培 (A);

U_k ——短路阻抗百分数 (%);

K_{as} ——非周期分量系数, 取 1.8。

6.1.2 短路电流峰值

应按公式 (2) 计算:

$$I_{peak} = \sqrt{2} \times I_{SC} \times K_{peak} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

I_{peak} ——短路电流峰值, 单位为安培 (A);

K_{peak} ——峰值系数, 当 $U_k \geq 3\%$ 时取 1.8。

6.2 辐向力计算

6.2.1 单位长度辐向力

绕组单位长度所受辐向力应按公式 (3) 计算:

$$F_r = \frac{\mu_0 \times (I_{peak} \times N)^2}{2 \times H \times 10^6} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

F_r ——单位长度辐向力, 单位为牛顿每米 (N/m);

μ_0 ——真空磁导率, 取 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$;

N ——绕组匝数;

H ——绕组电抗高度, 单位为毫米 (mm)。

6.2.2 辐向应力校核

绕组辐向应力应按公式 (4) 校核:

$$\sigma_r = \frac{F_r \times D}{2 \times A_c} \leq [\sigma] \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

σ_r ——绕组辐向应力, 单位为兆帕 (MPa);

D ——绕组平均直径, 单位为毫米 (mm);

A_c ——导线截面积, 单位为平方毫米 (mm^2);

$[\sigma]$ ——导线许用应力, 铜导线取 80MPa。

6.3 轴向力计算

6.3.1 计算方法

绕组轴向力源于安匝不平衡产生的轴向漏磁分量，应按附录 A 规定的方法计算。

6.3.2 压紧力要求

轴向力作用下，绕组端部压紧力应满足公式（5）要求：

$$F_a \leq \mu \times F_{clamp} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

F_a ——轴向短路力，单位为千牛（kN）；

μ ——摩擦系数，取 0.3~0.5；

F_{clamp} ——绕组端部预紧力，单位为千牛（kN）。

6.4 支撑结构强度校核

6.4.1 端部垫块承压应力

应按公式（6）校核：

$$\sigma_p = \frac{F_a + F_{clamp}}{n \times A_p} \leq [\sigma_p] \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

σ_p ——垫块承压应力，单位为兆帕（MPa）；

n ——垫块数量；

A_p ——单个垫块面积，单位为平方毫米（mm²）；

$[\sigma_p]$ ——垫块许用应力，高密度绝缘纸板取 60MPa。

6.4.2 拉螺杆应力

应按公式（7）校核：

$$\sigma_{tie} = \frac{F_a + F_{clamp}}{m \times A_{tie}} \leq [\sigma_{tie}] \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

σ_{tie} ——拉螺杆应力，单位为兆帕（MPa）；

m ——拉螺杆数量；

A_{tie} ——拉螺杆有效截面积，单位为平方毫米（mm²）；

$[\sigma_{tie}]$ ——拉螺杆许用应力，45 号钢取 200MPa。

7 抗短路能力验证

7.1 验证方法

7.1.1 试验依据

抗短路能力验证采用短路试验方法，试验按 GB/T 1094.5 的规定执行。

7.1.2 试验档位与次数

试验应在变压器全部分接档位上进行，每个分接档位应进行 3 次短路冲击，每次冲击持续时间应为 0.2s~0.5s。

7.1.3 试验连接方式

应符合以下要求：

- a) 被试绕组短路，非被试绕组施加额定电压；
- b) 试验应在各相依次进行或三相同时进行，具体方式按产品标准规定。

7.2 验证条件

7.2.1 试验状态要求

短路试验时的变压器状态应符合以下要求：

- a) 变压器应注入规定牌号和数量的绝缘介质（油浸式）或处于正常环境条件（干式）；

- b) 变压器温度应为环境温度，不宜低于 5℃；
- c) 试验前应测量绕组电阻、电抗及绝缘电阻，记录初始值。

7.2.2 试验参数要求

应符合表 2 的规定。

表 2 短路试验参数要求

参数	要求	依据
试验频率	50Hz ± 5%	GB/T 1094.5
短路电流有效值	不低于计算值的 95%	GB/T 1094.5
短路冲击次数	每相/每档 3 次	GB/T 1094.5
冲击持续时间	0.2s~0.5s	GB/T 1094.5

7.3 验证判定准则

7.3.1 过程要求

短路试验过程中及试验后，变压器应满足以下要求：

- a) 试验过程中无异常声响、无喷油或冒烟现象；
- b) 试验波形无明显畸变，保护装置未动作。

7.3.2 试验后检查

短路试验后，变压器应通过以下检查项目：

- a) 绕组电阻测量值与试验前相比，变化不应大于 2%；
- b) 短路电抗测量值与试验前相比，变化不应大于 7.5%；
- c) 空载损耗与负载损耗测量值应符合 GB 20052 的规定；
- d) 绝缘电阻测量值不应低于试验前值的 70%；
- e) 工频耐压试验应通过，无击穿或闪络现象。

7.3.3 绕组变形检查

应采用频响法或电抗法，频响法检测结果应符合 DL/T 911 的相关规定。

7.4 验证报告

7.4.1 报告内容

抗短路能力验证完成后应出具验证报告，报告内容应包括：

- a) 变压器基本信息（型号、额定容量、电压等级、短路阻抗等）；
- b) 试验条件（温度、湿度、试验设备等）；
- c) 试验参数记录（短路电流、持续时间、试验档位等）；
- d) 试验前后各项测量数据对比；
- e) 绕组变形检测结果；
- f) 验证结论。

7.4.2 报告存档

验证报告应存档备查，保存期限不应少于 10 年。

附录 A
(规范性)
短路力计算方法

A.1 漏磁场计算

A.1.1 漏磁场分布特性

变压器短路时，绕组漏磁场可分解为轴向分量和辐向分量。轴向漏磁场分布沿绕组高度呈近似正弦分布，其最大值出现在绕组端部。

A.1.2 轴向漏磁通密度计算

轴向漏磁通密度可按公式 (A.1) 计算：

$$B_a(y) = B_{a0} \times \cos\left(\frac{\pi y}{H}\right) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

$B_a(y)$ ——距绕组中心 y 处的轴向漏磁通密度，单位为特斯拉 (T)；

B_{a0} ——绕组中心处轴向漏磁通密度最大值，单位为特斯拉 (T)；

y ——距绕组中心高度坐标，单位为毫米 (mm)；

H ——绕组电抗高度，单位为毫米 (mm)。

A.2 短路力计算

A.2.1 辐向力计算

辐向短路力作用于绕组的径向方向，使内绕组受压、外绕组受拉。单位长度辐向力可按公式 (A.2) 计算：

$$F_r(y) = B_a(y) \times I \times N \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

$F_r(y)$ ——单位长度辐向力，单位为牛顿每米 (N/m)；

$B_a(y)$ ——轴向漏磁通密度，单位为特斯拉 (T)；

I ——短路电流，单位为安培 (A)；

N ——绕组匝数。

A.2.2 轴向力计算原则

轴向短路力主要源于安匝不平衡产生的辐向漏磁分量。轴向力计算应采用有限元法或专用变压器电磁力计算软件进行。

A.2.3 有限元法计算要求

采用有限元法计算时，应建立变压器绕组二维或三维模型，施加短路电流边界条件，求解麦克斯韦方程组得到电磁力分布。