



团 体 标 准

T/CEATEC XXX—XXXX

固态变压器通用设计导则

General design guidelines for solid-state transformers
(征求意见稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – 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 缩略语 2

5 分类与端口形式 2

6 总体设计原则 2

7 使用条件 2

8 参数声明与设计边界 3

9 系统架构设计 3

10 结构、机械与防护设计 3

11 绝缘、安全、接地与残余能量设计 4

12 功率变换与中频隔离设计 4

13 热管理设计 4

14 运行性能设计 5

15 控制、保护与继电保护配合设计 5

16 通信、监测与网络安全设计 5

17 可靠性与可维护性设计 6

18 设计验证与试验分级 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：。

本文件首次发布。

固态变压器通用设计导则

1 范围

本文件规定了固态变压器的分类与端口形式、总体设计原则、使用条件、参数声明与设计边界、系统架构设计、结构机械与防护设计、绝缘安全接地与残余能量设计、功率变换与中频或高频隔离设计、热管理设计、运行性能设计、控制保护与继电保护配合设计、通信监测与网络安全设计、可靠性与可维护性设计、设计验证与试验分级等内容。

本文件适用于固态变压器的设计、选型和验证。

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 1094.3 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 4208 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 7354 高电压试验技术 局部放电测量
- GB/T 12325 电能质量 供电电压偏差
- GB/T 12326 电能质量 电压波动和闪变
- GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波
- GB/T 15543 电能质量 三相电压不平衡
- GB/T 15945 电能质量 电力系统频率偏差
- 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 16927.2 高电压试验技术 第2部分：测量系统
- GB/T 16935.1 低压供电系统内设备的绝缘配合 第1部分：原理、要求和试验
- GB/T 16935.4 低压系统内设备的绝缘配合 第4部分：高频电压应力考虑事项
- GB/T 20626.1 特殊环境条件 高原电工电子产品 第1部分：通用技术要求
- GB/T 20626.3 特殊环境条件 高原电工电子产品 第3部分：雷电、污秽、凝露的防护要求
- GB/T 22239 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求
- GB/T 25070 信息安全技术 网络安全等级保护安全设计技术要求
- GB/T 26218.1 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第1部分：定义、信息和一般原则
- GB/T 42151（所有部分） 电力自动化通信网络和系统

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

固态变压器 solid-state transformer; SST

采用功率电子变换技术和中频或高频电气隔离技术，实现电压变换、电能传输、功率控制、电能质量调节和多端口能量接入的电力电子变压设备。

3.2

功率模块 power module

由功率半导体器件、驱动保护单元、电气连接结构、绝缘结构、散热结构及必要辅助电路组成，能够实现规定功率变换功能的模块化单元。

3.3

中频或高频隔离变压器 medium-frequency or high-frequency isolation transformer

在固态变压器隔离级中，以高于工频的交流电压或电流运行，用于实现电压变换、电气隔离和能量传输的变压器。

3.4

旁路保护 bypass protection

当功率模块或系统局部发生故障时，通过旁路开关、旁路回路或控制策略将故障单元切除或转移电流，以维持系统安全运行或实现受控停机的保护方式。

3.5

模块自动旁路 module automatic bypass

固态变压器在运行过程中，当某一功率模块发生故障或异常时，系统自动识别故障模块并将其退出运行状态，且在规定条件下维持整机继续运行的功能。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

IGBT: 绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor)

IGCT: 集成门极换流晶闸管 (Integrated Gate-Commutated Thyristor)

MTBF: 平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failures)

MTTR: 平均修复时间 (Mean Time To Repair)

PWM: 脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation)

SiC: 碳化硅 (Silicon Carbide)

SST: 固态变压器 (Solid State Transformer)

5 分类与端口形式

5.1 固态变压器可按拓扑级数、端口形式和运行方式进行分类。

5.2 按拓扑级数划分，可分为单级型、两级型、三级型和混合型。

5.3 按端口形式划分，可分为交流/交流型、交流/直流型、直流/直流型、交流/直流/交流型和多端口型。

5.4 按运行方式划分，可分为并网型、离网型、并离网混合型、构网型和跟网型。

5.5 设计文件宜明确固态变压器的拓扑级数、端口形式和运行方式，避免仅以拓扑级数代替完整分类说明。

6 总体设计原则

6.1 固态变压器设计宜遵循安全可靠、高效低损耗、模块化、可维护、电网友好、环境适应和网络安全协同的原则。

6.2 固态变压器设计宜结合应用场景和运行条件，统筹考虑端口需求、电压等级、容量配置、拓扑结构、绝缘协调、过电压防护、主功率器件、冷却方式、电磁兼容、并网要求、保护策略、通信监测和维护条件。

6.3 固态变压器设计宜根据端口形式、功率流向和控制目标，合理确定主电路拓扑、控制策略、保护配置和散热方案。

6.4 固态变压器设计宜采用“参数声明、设计计算、仿真分析、样机验证、试验确认、运行反馈”的闭环设计方法。

7 使用条件

- 7.1 额定性能和温升设计的基准环境温度宜取 40℃，常规工作环境温度宜按-25℃~50℃进行设计校核；海拔宜不高于 2000 m，相对湿度宜不大于 95%且无凝露。安装地点宜避开剧烈振动、爆炸性介质、导电性粉尘和严重腐蚀性气体。
- 7.2 用于高海拔、重污秽、高湿热、高盐雾、强振动、户外暴露或其他特殊环境时，宜根据实际使用条件进行绝缘修正、温升修正、防护设计和降额设计。
- 7.3 设备接入公用电网运行时，公共连接点电能质量应符合 GB/T 12325、GB/T 12326、GB/T 14549、GB/T 15543 和 GB/T 15945 的规定。
- 7.4 设备允许的输入电压、输入频率和降额运行边界宜由制造商另行声明，不宜与公共电网电能质量限值混写。

8 参数声明与设计边界

- 8.1 设计文件宜明确固态变压器的主要技术参数和设计边界，参数声明宜包括额定容量、端口形式、额定输入电压、额定输出电压、额定频率、运行方式、拓扑结构、隔离方式、冷却方式、主功率器件类型、双向功率能力、过载能力、效率、无功或功率因数调节范围、故障电流限制能力、绝缘水平和环境降额条件。
- 8.2 效率、过载能力、故障限流能力和降额运行边界宜按运行方式、负载点和试验条件分别声明。

9 系统架构设计

- 9.1 固态变压器系统架构宜根据端口形式、拓扑级数、容量等级、电压等级、运行方式和控制目标确定。
- 9.2 设计文件宜明确各功率级、各端口和各控制层的功能边界、控制边界、隔离位置，以及故障隔离、旁路或降级运行方式。
- 9.3 单级拓扑宜用于端口较少、结构紧凑、控制复杂度可控的场合；两级拓扑宜用于兼顾效率、功能和控制复杂度的场合；三级拓扑宜用于需要网侧控制、隔离变换和负载侧解耦的场合；混合型拓扑宜用于大容量、调压增强或电能质量治理等场合。
- 9.4 功率接口层宜包括交流或直流接口、滤波器、开关电器、测量单元、浪涌防护单元、预充单元和放电单元。
- 9.5 隔离能量传输层宜根据额定容量、电压等级、隔离要求和开关频率，配置中频或高频隔离变压器及配套变换单元。
- 9.6 控制保护层宜包括系统级控制器、功率级控制器、模块级控制器、驱动保护单元和硬件保护链，并具备故障检测、保护动作、状态监测和事件记录功能。
- 9.7 辅助电源层宜满足控制、保护、驱动、通信、监测和故障记录等用电需求，必要时可配置受控停机保持能力或冗余供电措施。

10 结构、机械与防护设计

- 10.1 固态变压器结构设计宜综合考虑电气安全、热管理、维护可达性、运输安装和长期机械可靠性要求。
- 10.2 壳体、门板、支架、安装板、散热部件和操作部件宜结构完整、连接可靠，不宜存在影响安全和使用的机械缺陷。
- 10.3 元器件布置宜避免绝缘距离不足、局部过热、强电弱电相互干扰和误操作风险，并便于安装、检查、维护和更换。
- 10.4 母排、电缆、连接端子和功率连接件应具有与额定电流、短路条件、振动条件和安装方式相适应的机械强度和固定措施。
- 10.5 外壳防护等级宜根据安装场所、触电防护要求以及粉尘、水侵入风险确定，并符合 GB/T 4208 的规定。
- 10.6 户外和箱式应用宜在满足外壳防护等级要求的基础上，结合机械碰撞防护、涂层耐候性、防腐蚀、通风散热和冷却通道防堵塞等要求进行综合设计。

11 绝缘、安全、接地与残余能量设计

- 11.1 固态变压器绝缘设计宜分别考虑外部网侧绝缘、内部模块绝缘、中频或高频隔离绝缘，以及控制、通信和辅助电源回路隔离。
- 11.2 外部绝缘宜根据系统最高电压、过电压类别、污秽等级、海拔高度和安装环境确定；内部绝缘宜结合直流母线电压、开关频率、脉冲电压波形、重复冲击、 dv/dt 、局部放电、材料耐热等级和污染等级进行设计。
- 11.3 用于高海拔环境时，绝缘设计宜按 GB/T 20626.1 进行修正；涉及雷电、污秽和凝露防护时，可结合 GB/T 20626.3 进行设计；用于重污秽外绝缘场合时，外绝缘选型和尺寸确定宜按 GB/T 26218.1 进行。
- 11.4 内部模块和高频电压应力场合的绝缘配合，适用时宜符合 GB/T 16935.1 和 GB/T 16935.4 的规定。
- 11.5 中频或高频隔离变压器绝缘设计宜重点考虑层间电压分布、寄生电容、共模干扰、电气间隙、爬电距离、局部放电、绝缘材料耐热等级和热老化影响。
- 11.6 固态变压器绝缘协调宜识别外部雷电过电压、操作过电压、重复脉冲过电压和内部共模电压应力，并与浪涌保护器件、缓冲网络、箝位电路和接地方式协调。
- 11.7 固态变压器不宜仅按传统工频变压器绝缘水平确定绝缘设计，宜单独评估半导体器件、直流母线、中频或高频隔离环节承受冲击电压和重复脉冲电压的能力。
- 11.8 固态变压器宜设置直接接触防护和间接接触防护措施。可触及金属壳体、门板、支架、安装板以及因绝缘失效可能带电的金属件，应与保护接地端可靠连接。
- 11.9 保护接地连续性设计目标宜不大于 $0.1\ \Omega$ 。功率地、控制地、屏蔽地、功能地和保护地之间的连接关系宜在设计文件中明确。
- 11.10 直流母线电容、缓冲电容和其他储能单元宜配置预充电、放电和验电措施。断电后仍可能存在危险电压或危险能量的部位，宜设置放电回路、状态指示或验电接口。
- 11.11 危险电压不能在安全等待时间内降至安全水平时，宜在明显位置标识放电时间、残余电压和危险能量信息。

12 功率变换与中频隔离设计

- 12.1 主功率器件宜根据电压等级、容量等级、开关频率、损耗目标、结温约束、短路耐受能力、可靠性和工程应用成熟度选取，可采用 IGBT、SiC 器件、IGCT、晶闸管或其他适用功率半导体器件。
- 12.2 采用 SiC 器件时，宜重点考虑高 dv/dt 、高开关频率、结温裕量、驱动保护、绝缘应力、电磁干扰和封装可靠性；采用 IGBT 时，宜重点考虑开关损耗、并联均流、短路耐受时间、结温控制和功率循环寿命。
- 12.3 模块串联时，宜采取静态均压、动态均压或控制均衡措施；模块并联时，宜采取均流设计，并控制热不均衡。
- 12.4 中频或高频隔离变压器宜根据拓扑结构、额定容量、变比、工作频率、调制方式、绝缘等级和冷却方式进行设计。中频隔离变压器工作频率可按 400 Hz~25 kHz 选取；高于 25 kHz 时，宜结合高频电压应力、绝缘材料特性、集肤效应、邻近效应和温升验证结果进行专门校核。
- 12.5 设计文件宜明确中频或高频隔离变压器的额定容量、工作频率、额定电压、磁芯材料、绕组结构、屏蔽措施、冷却方式、局部放电控制措施和典型运行波形。
- 12.6 绕组结构宜综合考虑集肤效应、邻近效应、漏感、寄生电容、绝缘距离、制作工艺和散热路径。

13 热管理设计

- 13.1 热管理设计宜以功率半导体模块、中频或高频隔离变压器、电抗器、电容器、母排和连接端子为重点对象，明确其损耗来源、散热路径、温度测点和允许温度限值。
- 13.2 设计文件宜给出主要热源清单、损耗计算结果、热点位置、冷却方式、冷却介质参数、温度保护阈值和故障降额策略。

13.3 功率半导体模块宜校核结温、壳温、热阻、热阻抗和功率循环寿命，并根据最高环境温度和最不利工况确定结温裕量。

13.4 中频或高频隔离变压器宜分别声明绕组平均温升、热点温度、绝缘系统温度等级和冷却条件。干式或固体绝缘结构宜按绝缘系统温度等级校核绕组平均温升和热点温度，不宜以单一温升值代替热设计校核。

13.5 电容器宜校核热点温度、纹波电流和寿命折减；电抗器宜校核绕组温升、磁芯温升和局部热点；母排、连接端子和电缆宜校核载流温升和接触发热。

13.6 采用强迫风冷时，宜设置风机状态、进出风温度、风道堵塞和柜内热点监测；采用液冷时，宜设置冷却液温度、流量、压力和泄漏监测。

13.7 冷却系统异常时，控制保护系统宜根据故障等级执行告警、降额运行或停机保护。

14 运行性能设计

14.1 并网型固态变压器宜根据接入要求具备有功功率控制、无功功率控制、功率因数调节、电压支撑和电能质量调节能力。

14.2 用于微电网、储能或新能源接入时，宜根据系统需求配置黑启动、功率平滑、并离网切换、构网支撑和孤岛检测等功能。

14.3 额定稳态并网运行条件下，网侧电流总谐波畸变率宜不大于 5%；交流侧电流中的直流电流分量宜不大于额定电流的 0.5%。其他并网指标宜按接入标准、应用场景和产品技术文件确定。

14.4 离网运行性能、效率、稳压精度、稳流精度、电压纹波、电流纹波和动态响应等指标，宜按运行方式、负载点和试验条件分别声明，并通过试验验证。离网运行时，频率偏差、电压幅值偏差和电压不平衡度宜在技术文件中明确；有推荐值时，频率偏差宜不超过 ± 0.2 Hz，电压不平衡度宜不大于 2%。

14.5 开关机、模式切换和故障恢复过程中，输出电压过冲、冲击电流和恢复时间宜在技术文件中明确；输出电压过冲推荐值宜不大于设定值的 10%。

15 控制、保护与继电保护配合设计

15.1 控制系统宜根据运行方式配置并网控制、离网控制、并离网切换、恒压控制、恒流控制、恒功率控制、无功调节、功率因数控制和故障处理等功能。

15.2 保护系统宜覆盖交流侧过电压和欠电压、直流侧过电压和欠电压、过电流、短路、过载、绝缘异常、接地故障、过温、冷却异常、驱动故障、通信异常和模块故障等异常状态。

15.3 过电流、短路、直流过电压、器件驱动故障和过温等关键保护功能，宜配置独立于主控软件的快速保护路径。

15.4 模块化固态变压器宜具备故障模块识别、隔离、旁路、降额运行或受控停机能力。设计文件宜明确故障检测路径、动作优先级、限能措施、旁路条件、复位条件和事件记录要求。

15.5 设计文件宜根据固态变压器的故障电流输出特性、限流机制和持续时间，给出与上级保护、下级保护及旁路保护装置的配合说明，并提出继电保护整定建议。

15.6 接入公用电网运行时，技术文件宜明确故障穿越、脱网、重启和并网恢复边界。

16 通信、监测与网络安全设计

16.1 固态变压器宜根据站控、调度、运维和调试需求配置工业通信接口。面向电力自动化系统的产品宜支持 GB/T 42151（所有部分）；面向数字化运维系统的产品宜提供标准化开放接口；本地调试接口宜具备权限控制功能。

16.2 运行监测内容宜覆盖交流侧电压、电流、频率、有功功率、无功功率、功率因数，直流侧电压、电流和功率，以及功率模块温度、隔离变压器温度、冷却系统状态、绝缘状态、接地状态、保护告警状态和通信状态。

16.3 技术文件宜明确通信协议、接口类型、数据点表、刷新周期、对时方式、告警分级、事件记录和波形记录要求。

16.4 具备远程通信、远程控制或远程升级功能时，宜配置身份认证、访问控制、角色权限管理、通信加密或完整性校验、操作日志、参数修改留痕、版本回退和异常恢复机制。

16.5 网络安全设计宜按 GB/T 22239 和 GB/T 25070 的原则，对账号、接口、日志、升级和运维过程进行安全控制，不宜仅以支持某一通信协议作为网络安全满足依据。

16.6 固态变压器宜支持对时和统一时标管理，保证故障记录、波形记录和事件追溯的一致性。

17 可靠性与可维护性设计

17.1 可靠性设计宜基于应用场景、负载曲线、环境条件、冷却方式和维护条件建立任务剖面，并明确失效判据和适用工况。

17.2 设计文件宜声明设计寿命、主要寿命限制部件、MTBF、MTTR 或等效可靠性指标，并说明计算模型、试验依据和统计边界。

17.3 主要寿命限制部件宜包括功率半导体模块、电容器、中频或高频隔离变压器、风机、泵、继电器、接触器、连接端子和冷却密封件。

17.4 寿命预测可采用加速试验、温度循环、功率循环、失效率模型、威布尔分析等方法，并宜结合运行温度、负载波动和启停次数进行校核。

17.5 功率模块、冷却模块、控制模块和通信模块宜采用模块化、可更换设计，并便于检查、诊断、维护和更换。

17.6 技术文件宜提供故障代码、诊断方法、维护流程、危险能量释放方法、验电或等待要求、备品备件清单和维护周期建议。

18 设计验证与试验分级

18.1 设计验证宜覆盖结构、电气安全、绝缘协调、运行功能、性能、热管理、保护、通信、网络安全、电磁兼容、环境适应性和可靠性等项目。验证活动可分为设计评审、计算校核、仿真分析、样机试验、型式试验、例行试验、出厂试验和现场试运行。

18.2 结构验证宜包括外观、尺寸、紧固件、操作机构、维护空间 and 外壳防护等级检查。

18.3 电气安全验证宜包括保护接地连续性、电击防护、电气间隙、爬电距离、绝缘电阻和耐受电压检查。工频耐受电压、雷电冲击耐受电压、局部放电和高电压测量宜按 GB/T 1094.3、GB/T 7354、GB/T 16927.1 和 GB/T 16927.2 进行。

18.4 采用中频或高频隔离变压器时，宜结合实际运行波形开展局部放电补充验证，试验条件宜覆盖峰值电压、频率、dv/dt、占空比和持续时间，并记录局部放电起始电压、表观放电量和异常现象。

18.5 性能验证宜包括启停机、并网运行、离网运行、并离网切换、功率控制、无功调节、效率、损耗、电能质量、动态响应和离网供电能力等项目。

18.6 温升试验宜在额定功率、额定冷却方式和规定环境温度下进行，并记录关键部件温度、温升、冷却介质参数和保护动作状态。

18.7 保护验证宜覆盖过电压、欠电压、过电流、短路、过载、过温、绝缘异常、接地故障、冷却异常、通信异常和旁路异常等故障状态。

18.8 环境适应性验证宜包括高温、低温和交变湿热试验；用于强振动、盐雾、户外暴露等特殊环境时，宜增加振动、冲击、盐雾和外壳耐候性验证。

18.9 电磁兼容验证宜包括传导发射、辐射发射、静电放电、电快速瞬变脉冲群、浪涌、电压暂降与短时中断、工频磁场等项目，试验项目和等级宜根据安装环境、端口类型和接入要求确定。

18.10 试验项目、试验等级、判定准则和抽样方式宜在产品技术文件或试验方案中明确。