

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

基于碳化硅 (SiC) 器件的固态变压器 设计规范

Design specifications for solid-state transformers based on
silicon carbide (SiC) devices

(征求意见稿)

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国机电设备工程协会 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 总体要求	2
4.1 设计原则	2
4.2 环境条件	2
4.3 供电条件	2
5 系统结构与功能	2
5.1 系统结构	2
5.2 模块化设计	3
5.3 功能要求	3
6 性能要求	3
6.1 基于 SiC 器件的固态变压器性能要求	3
6.2 SiC MOSFET 器件选型要求	4
7 试验方法	4
7.1 试验条件	4
7.2 试验方法	4
8 检验规则	5
8.1 检验分类	5
8.2 抽样规则	5
8.3 型式检验	5
8.4 出厂检验	5
8.5 判定规则	5
9 安全要求	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。

本文件由特变电工电气装备集团有限公司提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：特变电工电气装备集团有限公司、华中科技大学、西安西电电力电子有限公司、江苏华辰变压器股份有限公司、上海广电电气（集团）股份有限公司。

本文件主要起草人：吴正伟、刘新民、白世军、高冬、陈静、许頔明、石楠。

基于碳化硅（SiC）器件的固态变压器设计规范

1 范围

本文件规定了基于碳化硅（SiC）器件的固态变压器的总体要求、系统结构与功能、性能要求、试验方法、检验规则和安全要求等内容。

本文件适用于额定电压10 kV及以下配电网、额定容量100 kW~5 MW的基于SiC器件的固态变压器。其他电压等级和容量的固态变压器可参照执行。

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 311.3 绝缘配合 第3部分：高压直流换流站绝缘配合程序

GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划

GB/T 3859.1 半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第1-1部分：基本要求规范

GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB/T 13422 半导体变流器 电气试验方法

GB/T 13498 高压直流输电术语

GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波

GB/T 15945 电能质量 电力系统频率偏差

GB/T 16895.1 低压电气装置 第1部分：基本原则、一般特性评估和定义

GB/T 17626（所有文件）电磁兼容 试验和测量技术

GB/T 34865 高压直流转换开关用电容器

GB 50054 低压配电设计规范

IEC 61850 电力设施自动化的通信网络和系统 全部（Communication networks and systems for power utility automation - ALL PARTS）

3 术语和定义

GB/T 13498界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

固态变压器 solid-state transformer;SST

通过电力电子变换器与高频变压器组合，实现电能变换、电气隔离、电压调节和电能质量治理等功能的电力电子装置。

3.2

碳化硅 metal-oxide-semiconductor field-effect transistor based on silicon carbide;SiC MOSFET

以碳化硅为半导体材料，具有金属—氧化物—半导体结构的场效应晶体管功率器件。

3.3

高频变压器 high-frequency transformer

工作频率显著高于工频（50 Hz/60 Hz）的变压器，通常工作频率在1 kHz~300 kHz范围内。

3.4

级联 H 桥 cascaded H-bridge;CHB

由多个H桥功率单元级联组成的多电平变换器拓扑结构。

3.5

模块化多电平变换器 modular multilevel converter;MMC

由多个子模块级联组成的模块化多电平变换器拓扑结构。

3.6

功率密度 power density

单位体积（或单位质量）的额定输出功率。

3.7

工作效率 efficiency

输出有功功率与输入有功功率之比，以百分数表示。

4 总体要求

4.1 设计原则

基于SiC器件的固态变压器的设计原则：

- a) 遵循安全可靠、高效节能、经济合理、技术先进的原则；
- b) 满足所在电网的接入要求，包括电压等级、频率、功率因数、谐波含量等电能质量指标；
- c) 充分考虑SiC器件的特性，包括高开关频率、高温耐受能力、低开关损耗等，实现系统性能的最优化；
- d) 符合GB/T 16895.1和GB 50054中关于电气装置安全的基本要求。

4.2 环境条件

采用SiC器件的固态变压器，其设计适用环境条件应满足以下要求：

- a) 环境温度：-25℃～50℃；
- b) 相对湿度：5%～95%（无凝露）；
- c) 海拔高度：不超过2000 m。超过2000 m时应按GB/T 3859.1的相关规定进行降容修正；
- d) 污染等级：不低于GB/T 4208规定的IP20防护等级，户外安装时应不低于IP54。

4.3 供电条件

采用SiC器件的固态变压器，其设计适用环境条件应满足以下要求：

- a) 电网电压：额定电压的±10%范围内应能正常运行；
- b) 电网频率：50 Hz±1 Hz（稳态），短时波动允许±2 Hz；
- c) 电压波形：正弦波，总谐波畸变率（THD）不超过5%。

5 系统结构与功能

5.1 系统结构

基于SiC器件的固态变压器宜采用三级式拓扑结构，包括输入级、隔离级和输出级：

- a) 输入级（整流级）：采用级联H桥或模块化多电平变换器（MMC）拓扑，实现AC/DC变换，将10 kV中压交流电整流为直流电，同时具备功率因数校正（PFC）和谐波抑制功能。
- b) 隔离级（DC/DC变换级）：采用双有源桥（DAB）或LLC/CLLC谐振变换器拓扑，实现DC/DC变换和高频隔离-34。采用SiC MOSFET作为开关器件，工作频率为20 kHz～300 kHz。

c) 输出级（逆变级）：采用三相全桥逆变拓扑，实现DC/AC变换，输出380 V/220 V工频交流电，同时具备直流输出端口。

5.2 模块化设计

5.2.1 固态变压器应采用模块化设计，由多个功率子模块级联组成。

5.2.2 每个功率子模块的功率等级宜为 30 kW~100 kW。

5.2.3 以 10 kV 电网电压为例，每相宜由 6~10 个功率子模块级联组成，三相整体功率可达 1 MW~5 MW。

5.2.4 功率子模块应具备热插拔功能，便于维护和冗余配置。

5.3 功能要求

5.3.1 电压变换功能：能够将 10 kV 中压交流电变换为 380 V/220 V 低压交流电，同时提供直流输出端口（典型值为 800 V DC）。

5.3.2 电气隔离功能：通过高频变压器实现输入侧与输出侧之间的电气隔离，隔离电压等级不低于 15 kV。

5.3.3 双向功率流动功能：支持功率双向流动，满足储能系统充放电、电动汽车 V2G 等应用需求。

5.3.4 无功补偿功能：具备无功功率补偿能力，功率因数可调范围为-0.9~0.9。

5.3.5 谐波抑制功能：具备有源滤波功能，能够有效抑制电网谐波。

5.3.6 电能质量治理功能：能够实现电压调节、频率调节和故障隔离等电能质量管理功能。

5.3.7 通信与监控功能：具备与上层调度系统、能量管理系统的通信接口，支持 Modbus、IEC 61850（所有文件）等通信协议。

5.3.8 保护功能：具备过电压保护、过电流保护、过温保护、短路保护和接地故障保护等功能。

5.3.9 冗余功能：关键功率模块和控制单元应配置 N+1 或 N+m 冗余。

6 性能要求

6.1 基于 SiC 器件的固态变压器性能要求

基于SiC器件的固态变压器的性能要求应符合表1的规定。

表1 基于SiC器件的固态变压器性能要求

项目	技术要求	备注
额定输入电压	10 kV AC(±10%)	可根据应用需求选用6 kV、3.6 kV等级
额定输出电压	380 V/220 V AC ±5%;800 V DC±2%	交流输出为三相四线制
额定频率	50 Hz±0.5 Hz	—
额定容量	100 kW、500 kW、1 MW、2.5 MW、5 MW	标准系列值
最大工作效率	≥98.0%（额定工况）； ≥97.0%（20%~100%负载范围）	基于SiC器件，较传统方案效率提升3%~5%
功率密度	≥5.0 kW/L	较传统工频变压器（约0.5 kW/L）提升10倍
功率因数	≥0.99（额定负载）	可调节范围-0.9~0.9
输入电流总谐波畸变率（THDi）	≤3%（额定负载）	优于GB/T 14549中≤5%的要求
输出电压总谐波畸变率（THDu）	≤2%（线性负载）；≤4%（非线性负载）	—
电压调整率	≤±2%（负载从0%→100%变化）	—
负载调整率	≤±1.5%（额定工况）	—
动态响应时间	≤5 ms（10%~90%负载阶跃）	—
过载能力	110%额定容量：连续运行；150%额定容量：1 min；200%额定容量：10 s	—
输入电压允许波动范围	±10%（持续）；-20%~15%（短时，≤1 min）	—
绝缘电阻	≥10 MΩ（500 V兆欧表）	GB/T 3859.1
介电强度	工频耐压：25 kV/1 min 冲击耐压：60 kV（1.2/50 μs）	GB/T 311.3
开关频率	20 kHz~300 kHz	SiC MOSFET支持的高频特性
SiC器件结温耐受	≥175℃（额定工况）；短时允许200℃	SiC MOSFET结温上限可达225℃

冷却方式	风冷 (≤ 500 kW) ; 液冷 (> 500 kW)	高温耐受降低50%散热需求
电磁兼容性	符合GB/T 17626 (所有文件) 和GB/T 12668.3	—
平均无故障时间 (MTBF)	$\geq 50\,000$ h	—
防护等级	IP20 (室内) ; IP54 (室外)	按GB/T 4208
噪声	≤ 75 dB (A) (额定工况, 1 m距离)	—

注：各项性能指标的设计裕量应不小于10%，以应对器件老化和极端工况。

6.2 SiC MOSFET 器件选型要求

6.2.1 固态变压器选用的 SiC MOSFET 器件应满足以下基本参数要求，见表 2。

表2 SiC MOSFET器件选型基本参数要求

参数	技术要求	备注
击穿电压V(BR)DSS)	≥ 1200 V (10 kV级) ; ≥ 1700 V (更高电压等级)	击穿场强为硅的10倍，支持高耐压设计
导通电阻RDS(on))	≤ 50 m Ω (@25 °C); ≤ 80 m Ω (@175 °C)	高温下导通电阻增幅仅10%，远优于硅器件的30%~50%
漏极电流 (ID)	≥ 50 A (连续)	可满足200 A以上大功率需求
栅极电荷 (Qg)	≤ 200 nC	为同规格IGBT的1/3，开关损耗低
热阻 (Rth(j-c))	≤ 0.5 °C/W	热导率为硅的3倍，热阻降低60%
最高结温 (Tj(max))	≥ 175 °C	可达200 °C~225 °C，高温稳定性显著提升
开关速度	≤ 100 ns	开关速度提升3倍以上，支持高频操作

6.2.2 SiC MOSFET 器件的并联使用时，应进行严格的均流设计，各并联器件之间的电流不平衡度应不超过 $\pm 10\%$ 。

6.2.3 SiC MOSFET 器件的驱动电路应具备欠压锁定 (UVLO)、过流保护和有源米勒钳位功能。

7 试验方法

7.1 试验条件

7.1.1 试验环境条件应符合 4.2 的规定。

7.1.2 试验用仪器仪表应经计量检定合格，精度等级不低于 0.5 级。

7.1.3 试验电压和试验电流的波形应为正弦波，总谐波畸变率不超过 5%。

7.2 试验方法

各性能要求对应的试验方法应按表3的规定执行。

表3 试验方法

试验项目	试验方法	执行标准
额定输入电压	使用经校准的电压互感器或高压探头测量输入侧电压，在额定电压的 $\pm 10\%$ 范围内检查设备能否正常运行	GB/T 13422
额定输出电压	在额定输入电压和额定负载下，使用电压表或功率分析仪测量交流输出 (380 V/220 V) 和直流输出 (800 V) 的电压值	GB/T 3859.1
额定频率	使用频率计或电能质量分析仪测量输入侧电源频率	GB/T 15945
额定容量	通过负载试验施加额定容量的负载 (100 kW、500 kW等系列值)，验证设备能否持续输出额定功率而不超温或保护动作	GB/T 13422
最大工作效率	采用输入-输出功率直接测量法，在额定工况下使用功率分析仪 (精度0.2级) 测量输入有功功率和输出有功功率，计算效率	GB/T 13422
功率密度	测量设备最大外形尺寸计算体积 (L)，用额定容量 (kW) 除以体积得到体积功率密度 (kW/L)；用额定容量除以质量 (kg) 得到质量功率密度 (kW/kg)。	—
功率因数	使用功率分析仪测量输入侧基波电压与基波电流的相位差 ϕ ，计算 $PF=\cos\phi$ ；同时在额定负载下测量有功功率P和视在功率S，验证PF	GB/T 3859.1
输入电流总谐波畸变率 (THDi)	使用符合GB/T 17626.7的电能质量分析仪，在额定负载下测量输入侧2~50次谐波电流含有率，计算输入电流总谐波畸变率	GB/T 14549
输出电压总谐波畸变	使用电能质量分析仪，在线性负载和非线性负载下分别测量输出侧电压谐波，计算THDu	GB/T 14549

变率 (THDu)		
电压调整率	测量空载输出电压 U_0 与100%额定负载输出电压 U_{100} , 计算电压调整率	GB/T 3859.1
负载调整率	保持额定输入电压, 测量20%、40%、60%、80%、100%额定负载点的输出电压, 计算相对于额定负载点电压的最大偏差百分比	GB/T 3859.1
动态响应时间	使用电子负载施加10%→90%额定负载阶跃 (上升时间 ≤ 1 ms), 用示波器记录输出电压, 测量从阶跃开始至电压恢复到稳态值 $\pm 2\%$ 范围内的时间	GB/T 13422
过载能力	分别施加110%额定容量连续运行2 h、150%额定容量运行1 min、200%额定容量运行10 s, 检查设备无损坏且保护装置不误动 (或按设计动作)。	GB/T 34865
输入电压允许波动范围	使用可调电源将输入电压分别调至+10% (11 kV) 和-10% (9 kV) 持续运行, 以及+15% (11.5 kV) 和-20% (8 kV) 短时运行 (≤ 1 min), 检查输出电压稳定	—
绝缘电阻	使用500 V兆欧表测量输入回路对地、输出回路对地、输入对输出之间的绝缘电阻, 施加电压1 min后读数	GB/T 3859.1
介电强度	施加25 kV工频电压 (有效值) 持续1 min, 无击穿或闪络; 再施加60 kV (1.2/50 μ s) 雷电冲击波, 正负极性各3次, 无击穿	GB/T 311.3
开关频率	使用电流探头和示波器 (带宽 ≥ 500 MHz) 测量SiC MOSFET栅极驱动信号或漏源电压波形的频率	—
SiC器件结温耐受	在额定工况下通过热敏参数法 (测量导通压降与温度的关系) 或红外热像仪测量结温	-
冷却方式	目视检查冷却系统配置: 额定容量 ≤ 500 kW时为风冷, > 500 kW时为液冷; 核查风扇或水泵的启动/停止功能。	—
电磁兼容性	按GB/T 17626系列进行静电放电、电快速瞬变脉冲群、浪涌、射频场感应的传导骚扰等抗扰度试验	GB/T 17626 (所有文件)
平均无故障时间 (MTBF)	采用定时截尾试验 (≥ 3 台样机连续运行2000 h, 记录故障数) 或依据现场运行数据统计	—
防护等级	按GB/T 4208—2017进行: IP20用直径12.5 mm试具检查防触及性; IP54进行防尘试验 (滑石粉2 h) 和防水试验 (12.5 L/min, 3 min)。	GB/T 4208
噪声	在额定工况下, 使用声级计 (A计权) 在距设备1 m的前、后、左、右四个方向测量, 取平均值	—

8 检验规则

8.1 检验分类

本文件规定的检验分为型式检验和出厂检验两类。

8.2 抽样规则

抽样应符合GB/T 2828.1的规定, 型式检验的样品应从出厂检验合格的产品中随机抽取, 抽样基数不少于2台, 抽样数量为1台。

8.3 型式检验

型式检验应为表1中所有性能指标, 型式检验应在下列情况下进行:

- 新产品试制或老产品转厂生产的定型鉴定;
- 正式生产后, 如结构、材料、工艺有重大改变, 可能影响产品性能时;
- 产品停产一年以上, 恢复生产时;
- 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时;
- 国家质量监督机构提出进行型式检验的要求时。

8.4 出厂检验

每批产品出厂前应进行外观与结构、额定输入电压、额定输出电压、额定频率、额定容量、最大工作效率、功率因数、电压调整率、负载调整率、过载能力、绝缘电阻、介电强度、开关频率、冷却方式和防护等级的检验, 检验结果应符合本文件的要求。

8.5 判定规则

所有检验项目均满足本文件的要求时, 判定为合格。任何一项不符合规定时, 判定为不合格。制造厂应对不合格项进行分析并采取纠正措施后, 可重新提交检验。

9 安全要求

基于碳化硅（SiC）器件的固态变压器设计时应符合下列安全要求：

- a) 固态变压器的电气间隙和爬电距离应符合GB/T 16895.1和GB 50054的相关规定；
 - b) 固态变压器的保护接地端子应清晰标识，接地电阻应不大于0.1 Ω ；
 - c) 高压侧应设置明显的安全警示标识，操作区域应设置安全围栏；
 - d) 维护和检修时应严格按照断电、放电、验电、挂接地线的程序操作，确保人员安全。
-