

# 电力电子变换器在极端工况下的可靠性分析与改进设计

袁涛, 辜小宇

四川蜀能矿产有限责任公司 四川乐山

**【摘要】** 电力电子变换器在现代能源转换系统中扮演着至关重要的角色, 广泛应用于风能、太阳能以及电动汽车等领域。在极端工况下, 如高温、强电磁干扰和大电流波动等条件下, 变换器的可靠性会显著下降, 可能导致设备故障或性能下降。本文针对电力电子变换器在极端工况下的可靠性问题, 分析了其失效模式, 并提出了改进设计方案。通过优化元器件选择、散热设计及电路保护措施, 有效提高了变换器在极端工况下的可靠性。实验验证了提出方案的有效性, 结果表明改进后的设计在实际应用中具有更高的可靠性。

**【关键词】** 电力电子变换器; 可靠性分析; 极端工况; 设计改进; 失效模式

**【收稿日期】** 2025 年 4 月 13 日

**【出刊日期】** 2025 年 5 月 23 日

**【DOI】** 10.12208/j.jer.20250220

## Reliability analysis and improved design of power electronic converters under extreme working conditions

Tao Yuan, Xiaoyu Gu

Sichuan Shuneng Mineral Co., Ltd., Leshan, Sichuan

**【Abstract】** Power electronic converters play a crucial role in modern energy conversion systems and are widely used in fields such as wind energy, solar energy, and electric vehicles. Under extreme working conditions, such as high temperature, strong electromagnetic interference, and large current fluctuations, the reliability of converters will significantly decrease, which may lead to equipment failures or performance degradation. Aiming at the reliability issues of power electronic converters under extreme working conditions, this paper analyzes their failure modes and proposes an improved design scheme. By optimizing the selection of components, heat dissipation design, and circuit protection measures, the reliability of the converter under extreme working conditions is effectively improved. Experiments verify the effectiveness of the proposed scheme, and the results show that the improved design has higher reliability in practical applications.

**【Keywords】** Power electronic converter; Reliability analysis; Extreme working conditions; Design improvement; Failure mode

### 引言

随着可再生能源的快速发展, 电力电子变换器在能源转换和电能管理中得到了广泛应用。变换器的可靠性直接影响到系统的运行稳定性和安全性。在常规工况下, 变换器的设计较为成熟, 但在高温、高湿度、大电流波动以及电磁干扰等极端工况下, 其性能往往受到严重影响。变换器的故障不仅影响设备的正常运行, 甚至可能导致更为严重的设备损坏或安全事故。研究电力电子变换器在极端工况下的可靠性问题及改进设计, 具有重要的理论意义与实践价值。本论文将深入分析这些问题, 并提出针对性的设计改进方案, 为提升电力电子变换器的可靠性提供理论支持和实践指导。

### 1 电力电子变换器在极端工况下的失效模式分析

电力电子变换器在极端工况下的失效模式表现出不同于常规工作环境下的特征。在高温条件下, 变换器的半导体器件和电解电容会面临严重的热应力, 导致材料性能退化, 进而影响整体系统的可靠性。高温会加速器件的老化, 降低其承受电流和电压的能力, 最终导致过热失效或器件烧毁。特别是在高温下, 电容的电解质易发生挥发或干涸, 严重时可能引发短路或开路故障。温度对电力电子变换器的影响是极其重要的, 必须考虑到适应极端温度变化的设计。

除了高温, 强电磁干扰也是电力电子变换器在极端工况下常见的失效因素之一。在实际应用中, 尤其是电动汽车和风能系统中, 变换器往往需要在强电磁环境下工作。这些电磁波会通过导线、焊点或绝缘材料进

入变换器内部, 导致信号干扰或信息失真<sup>[1]</sup>。电磁干扰不仅影响变换器的正常控制, 还可能引起系统的短时停机, 甚至损坏内部电子元件。为了有效应对这一问题, 变换器设计需考虑加强电磁屏蔽和信号滤波等措施, 以减少电磁干扰的影响。

极端电流波动是另一种导致电力电子变换器失效的常见工况。在高负载或快速变化的负载下, 变换器会承受较大的电流冲击, 这会导致内部元件, 如功率半导体管的过载或损坏。特别是在逆变器和直流-交流变换器中, 电流的尖峰波动会引起电流过大, 造成电路的局部过热或瞬时电流过载, 导致损坏。变换器必须具备较强的电流承受能力, 并设计适当的过电流保护机制, 以保障系统的稳定性。极端工况下的失效模式多样且复杂, 深入分析这些失效模式对提高电力电子变换器的可靠性至关重要。

## 2 极端工况对电力电子变换器性能的影响

在极端工况下, 电力电子变换器的性能受到显著影响, 主要表现在热性能、电磁兼容性和电流波动等方面。高温环境对变换器的影响尤为突出, 过高的工作温度会导致器件内部的热积累, 使得热管理系统的负荷加重。变换器内的功率半导体器件如 IGBT 和 MOSFET, 在温度过高时会遭遇热失控现象, 造成开关损耗增加和效率下降。电解电容在高温下容易失效, 失去滤波功能, 使得电源波动增大, 影响整个系统的稳定性和输出质量。高温对材料的老化加剧了变换器的劣化, 尤其是那些低成本的部件, 其寿命大大缩短, 导致设备的故障率上升。

电磁干扰在极端工况下也对电力电子变换器的性能产生了严重影响。电力电子设备在工作过程中会产生较大的电磁波, 特别是在高频开关操作时, 电磁辐射可能对系统产生干扰, 影响控制信号的稳定性和精确度。强电磁干扰不仅可能导致变换器内部电路的误动作, 还可能引起设备的频繁停机。尤其是在电动汽车、轨道交通和智能电网等领域, 变换器需要在复杂的电磁环境中运行, 对其电磁兼容性提出了更高要求。为了有效减少电磁干扰的负面影响, 必须加强设备的屏蔽设计, 改善布局, 降低电磁泄漏, 并使用高质量的滤波组件来抑制干扰信号。

电流波动是极端工况下对电力电子变换器影响的另一个重要因素。在电力电子变换器的应用中, 尤其是在高负载或负载突变的情况下, 电流波动往往较为剧烈, 这种变化不仅会导致功率器件承受过高的瞬时电流, 还可能引发变换器的过载保护机制频繁启动, 影响

系统的稳定运行<sup>[2]</sup>。瞬时电流波动可能导致变换器中某些元器件如二极管和电感器的过热和损坏, 甚至可能在严重情况下引发短路故障。为了应对这种问题, 变换器需要具备更强的电流适应能力, 并且设计上需要增加电流波动的抑制手段, 如采用合适的滤波技术和保护电路, 以减少电流波动对变换器的损害。这些措施将有效提高变换器在极端工况下的可靠性和性能稳定性。

## 3 电力电子变换器可靠性改进设计方案

电力电子变换器的可靠性是影响其长时间稳定运行的核心因素, 尤其在极端工况下, 变换器的设计必须具备应对复杂环境变化的能力。为了提高电力电子变换器的可靠性, 设计改进方案需从材料选择、结构优化、热管理、电磁兼容、以及保护机制等多个方面综合考虑。在材料选择上, 针对高温环境下的失效模式, 采用更具热稳定性和耐高温特性的半导体材料, 如氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 材料, 相比传统的硅材料, 这些新型半导体材料能有效提高变换器在高温条件下的工作效率和热管理能力。选择具有更高耐高温性能的电解电容、陶瓷电容和高温绝缘材料, 能够有效延长变换器在极端工况下的使用寿命, 减少因高温引起的元器件失效。对于散热系统的设计, 通过优化散热器的结构, 增加散热面积, 同时采用具有更好导热性能的材料, 如铜、铝合金, 能够提升变换器散热效率, 有效抑制因温升过快而导致的过热故障。

在结构优化方面, 电力电子变换器的机械设计应更加注重紧凑性与散热性的平衡, 避免设计过于密集的布局, 这样不仅可以有效降低电流流过时的电磁干扰, 还能提高内部空气流通性, 促进热量的有效排放。变换器内部电路的布局应遵循最短路径原则, 以减少电流传输中的损耗, 同时还要避免对元器件造成过大机械应力<sup>[3-7]</sup>。为了应对电磁干扰, 设计时还应加强电磁屏蔽措施, 例如使用高频磁屏蔽材料, 合理设计地面和电源线的布局, 并通过增加金属外壳屏蔽效应来减少电磁波的泄漏。使用更精确的滤波器能够有效消除由开关动作引起的高频噪声, 保持系统的电磁兼容性, 确保变换器在复杂电磁环境下的稳定运行。

为了进一步提高电力电子变换器的可靠性, 保护机制的设计尤为重要。在极端工况下, 电流波动和过载现象是变换器失效的主要原因之一。通过在设计中引入智能保护电路, 能够实时监测系统的电流、温度、电压等参数, 并根据监测结果自动调整工作状态或切断电路, 从而避免器件损坏。过流保护电路可设定合理的电流限制阈值, 防止电流超过器件最大承受能力; 过温

保护则能实时检测变换器的温度,一旦发现温度异常升高,立即启动降温或断电措施,以保护关键元器件免受损害。为了提高电力电子变换器在极端工况下的适应性,改进后的设计还应包括自动修复和自愈功能,在发生短路、过载等故障时,能够迅速恢复系统的正常运行,避免出现长时间停机的现象。

#### 4 实验验证与改进设计效果评估

为了验证改进设计的有效性,实验验证是评估电力电子变换器在极端工况下可靠性的重要手段。实验的主要目的是测试在高温、高湿、电磁干扰以及电流波动等极端工况下,变换器在长期运行中的性能变化和失效模式。通过模拟实际应用中的极端工况,观察变换器在这些工况下的响应情况,包括温度变化对器件的影响、电磁干扰对信号传输的影响,以及电流波动对输出稳定性的影响。实验结果表明,在采用改进设计后,变换器能够更好地适应高温和大电流波动的工况,系统稳定性和效率显著提升,故障发生率明显下降。

改进设计的效果评估不仅体现在变换器本身的运行稳定性上,还体现在对外部环境变化的适应能力上。通过一系列环境变化实验,评估了变换器在不同负载情况下的表现。在极端电流波动的测试中,采用新型材料和改进的散热设计后,变换器能够有效抑制瞬时电流冲击,避免了过热和过载问题的发生<sup>[8]</sup>。在电磁兼容性测试中,改进后的电磁屏蔽设计显著减少了电磁波的辐射,确保了变换器在电磁环境复杂的条件下依然能够保持高效稳定的工作状态。这些实验验证表明,改进后的电力电子变换器设计在各种极端工况下都具有更强的可靠性和适应性。

通过对比分析实验结果与原设计的性能差异,改进设计的优势逐渐显现。改进后的设计在极端工况下的可靠性显著提升,尤其是在温度控制、负载适应性和电磁干扰防护等方面的表现,均超过了传统设计标准。通过这一系列实验验证和效果评估,不仅证明了改进设计在实际应用中的可行性,还为今后的电力电子变换器优化提供了有价值的数据支持。

#### 5 结语

通过本研究提出的电力电子变换器可靠性改进设计方案,可以显著提高变换器在极端工况下的稳定性

和适应性。通过优化材料选择、结构设计、散热系统以及电磁兼容性措施,实验验证结果表明,改进设计在高温、大电流波动和电磁干扰等极端工况下表现出更高的可靠性。该方案为电力电子变换器的设计优化提供了有效的理论支持和实践指导,对未来可再生能源系统及电动汽车等领域的应用具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] 张冉阳,刘静宇,韩佳良,等.电力电子系统高频开关振荡的非接触能量收集[J/OL].电力电子技术,1-4[2025-05-09].
- [2] 毕长飞.电力电子变换器 MPC 权重系数的 ANN 设计[J/OL].机械设计与制造,1-5[2025-05-09].
- [3] 刘千啸,陈小强,王英,等.基于体积优化的之字形电力电子变压器并联多脉波整流技术研究[J].电气工程学报,2025,20(01):108-118.
- [4] 汤建,邹志翔,薛明军,等.电力电子变换器并联系统的稳定控制策略及参数设计[J].电力自动化设备,2025,45(03): 102-108.
- [5] 李驰,叶之菁,舒文彬,等.用于分布式光伏制氢的高效紧凑多端口电力电子变换器[J/OL].电网技术,1-11[2025-05-09].
- [6] 薛腾跃,李凯,原亚雷,等.基于一体化高频变压器的电力电子变压器拓扑及其控制策略[J].高电压技术,2024,50(10):4499-4511.
- [7] 杨鹏,李倩,史善哲,等.基于分数阶的反激变换器精细建模[J].河北科技大学学报,2024,45(05):461-470.
- [8] 王诗楠,郭希铮,孙宗辉,等.基于 FPGA 的电力电子变换器随机实时仿真建模方法[J].电力自动化设备,2025,45(02): 110-118.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

