

多级协同保护门结构设计与动态响应优化——基于SiC MOSFET与TVS的二级/三级协同关断机制

游远科

杭州骏跃科技有限公司 浙江 杭州 310000

摘要：随着电力系统对稳定性和可靠性要求的不断提高，设计高效的过压过流保护机制至关重要。本文聚焦基于SiC MOSFET与TVS的二级/三级协同关断机制，展开多级协同保护门结构设计与动态响应优化研究。首先深入分析SiC MOSFET与TVS的特性，为协同工作奠定理论基础。继而分别设计二级和三级协同关断机制，涵盖结构搭建、逻辑策略制定与性能优化。同时，从控制算法、硬件电路以及应对环境因素等多方面研究动态响应优化策略。研究成果有望显著提升电力系统保护性能，增强系统稳定性，在电力电子设备、新能源系统等领域展现出广阔的应用前景。

关键词：SiC MOSFET；TVS；多级协同关断；动态响应优化；保护门结构

1 引言

在现代电力系统中，过压、过流故障频发，严重威胁系统的稳定运行和设备安全。传统的保护机制在面对复杂多变的故障情况时，逐渐暴露出响应速度慢、保护精度低、可靠性不足等问题，难以满足日益增长的电力需求和高质量供电要求。SiC MOSFET凭借其低导通电阻、高开关速度和出色的耐压能力，在电力领域崭露头角；TVS则以快速的过压响应和有效的箝位保护著称。将两者结合，构建基于它们的二级/三级协同关断机制，为解决电力系统保护难题带来新契机。通过设计多级协同保护门结构并优化其动态响应，有望实现快速、精准且可靠的过压过流保护，大幅提升电力系统的稳定性与安全性。对这一技术展开深入研究，对推动电力行业发展意义重大。

2 SiC MOSFET 与 TVS 特性分析

2.1 SiC MOSFET电气特性研究

SiC MOSFET作为新型功率器件，其电气特性对保护机制性能有决定性影响。从导通电阻来看，在相同电压和电流条件下，SiC MOSFET的导通电阻比传统硅基器件低一个数量级，这极大降低了导通损耗，提升了系统效率。开关速度方面，凭借SiC材料的高电子迁移率，其开关时间可缩短至纳秒级，能够快速响应电路中的信号变化，在高频应用场景优势显著。耐压能力上，SiC MOSFET可承受数千伏电压，适应高压电力系统需求。通过绘制不同温度、电压下的导通电阻曲线、开关时间变化曲线以及耐压特性曲线，能直观了解其不同工况下的电气性能变化，为后续保护门结构设计提供精准的数据支撑。如图一所示：

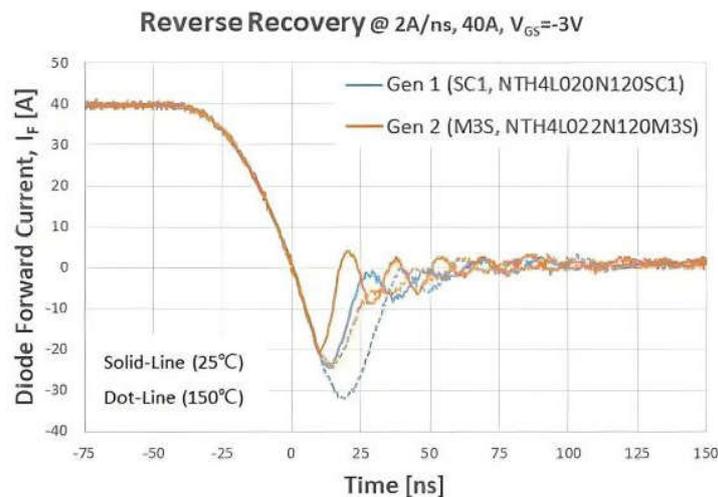


图1 反向恢复特性曲线图

2.2 TVS过压保护特性剖析

TVS是过压保护的关键元件，核心在于其快速响应和有效箝位。响应时间极短，通常在皮秒到纳秒级别，一旦电路出现过压，能在瞬间做出反应。箝位电压是重要参数，它确保在过压情况下，将电压限制在安全范围内，避免被保护设备承受过高电压。峰值脉冲功率决定了TVS能承受的最大瞬时能量，功率越大，应对突发大功率过压的能力越强。通过搭建过压测试电路，模拟不同幅值、脉宽的过压脉冲，记录TVS的响应时间、箝位电压变化以及承受峰值脉冲功率时的表现，深入剖析其过压保护特性，明确其在保护机制中能发挥的最大效能，保障保护的可靠性^[1]。

2.3 两者协同工作的理论基础

SiC MOSFET与TVS协同工作是高效保护的核心。正常运行时，SiC MOSFET掌控电路通断，TVS待命。过流过流信号出现，TVS快速响应，迅速箝位电压，减轻过压冲击。随后，SiC MOSFET依控制逻辑适时关断，切断故障电流。基于电路原理与功率器件特性，构建协同工作理论模型。针对持续过压、短时尖峰过压、过流等不同故障类型，剖析TVS和SiC MOSFET动作时序与配合方式，从理论上确保协同顺畅，为电路设计和控制策略制定筑牢根基。

3 二级协同关断机制设计

3.1 二级关断结构初步构建

从电路布局角度出发，将SiC MOSFET与TVS合理连接。SiC MOSFET作为主开关元件，承担大电流通断任务，其导通电阻低的特性可减少正常工作时的功耗；TVS则跨接在关键节点，用于快速响应过压信号。例如，在一个典型的电力电子电路中，将TVS并联在负载两端，SiC MOSFET串联在主电路中，构成基本的二级关断结构。通过合理规划线路走向，减少寄生电感和电容对电路性能的影响。这种结构简单直接，能在过压过流初期迅速做出反应，为后续保护动作提供基础架构^[2]。

3.2 关断逻辑与控制策略制定

当检测到过压或过流信号时，首先由TVS快速响应。TVS的响应时间极短，可在纳秒级内动作，将过高的电压箝位在安全范围内。此时，控制电路检测到箝位信号，向SiC MOSFET发送关断指令。SiC MOSFET在接收到指令后，利用其快速开关特性迅速切断电路，阻止故障电流进一步增大。为确保可靠性，采用冗余控制设计，设置多个检测点和控制回路。同时，考虑到不同故障类型和严重程度，制定灵活的控制策略，如根据过压过流的幅值大小调整SiC MOSFET的关断速度，避免因关断过快

产生的电压尖峰。

3.3 性能评估与参数优化

建立全面的性能评估体系，包括响应时间、保护精度、能量损耗等指标。通过仿真软件模拟不同故障场景，获取各项性能数据。比如，在模拟10kV的过压故障时，记录从故障发生到电路完全关断的响应时间，以及实际箝位电压与理想值的偏差来评估保护精度。基于评估结果进行参数优化，调整SiC MOSFET的栅极电阻，优化其开关速度，降低开关损耗；选择合适的TVS型号，使其箝位电压和峰值脉冲功率与系统需求匹配。通过不断优化，使二级协同关断机制在性能上达到最佳平衡，满足电力系统的保护要求^[3]。

4 三级协同关断机制拓展

4.1 三级关断结构的创新设计

在已有的二级协同关断结构基础上，引入新的保护元件或环节，进行三级关断结构的创新设计。比如，增加一个具有快速响应特性的储能电感，它能够在故障瞬间快速存储和释放能量，进一步调节电流变化率，避免电流的急剧上升对设备造成损害。通过巧妙的电路布局，将储能电感与SiC MOSFET、TVS合理连接，形成一个有机整体。相较于二级结构，三级结构增加了对故障初期暂态过程的精细控制，能够更全面地应对复杂的过压过流情况，有效提升保护的可靠性和精准度，从硬件层面为高效保护提供了更坚实的保障^[4]。

4.2 复杂工况下的关断策略优化

复杂工况下，过压过流的故障形式多样且可能同时出现，这对关断策略提出了极高要求。优化后的三级关断策略，首先会通过高精度的传感器实时监测系统的电压、电流等参数，利用智能算法对采集的数据进行快速分析，准确判断故障类型和严重程度。当检测到轻微过压时，TVS率先响应，将电压箝位在安全范围内；若同时出现过流且超过一定阈值，SiC MOSFET迅速动作，精准调节电流。而当遇到多重复杂故障时，新增的储能电感配合动作，协同SiC MOSFET和TVS，有序地控制能量流动，确保在各种复杂工况下都能实现可靠关断，全方位守护电力系统安全。

4.3 三级与二级机制对比分析

从响应速度来看，三级机制由于增加了快速响应的储能电感和更精细的控制环节，在面对突发严重故障时，能够比二级机制更快地做出反应，缩短关断时间，降低故障对设备的影响。可靠性上，三级机制通过多元件协同和更完善的策略，减少了单一元件故障导致保护失效的风险，提高了整体可靠性。成本方面，三级机制

因增加了储能电感等元件,成本会有所上升,但综合考虑其带来的更高保护性能和设备长期稳定运行所节省的维护成本,在对可靠性要求较高的电力系统中,具有更好的性价比。通过对比明确了不同机制的特点,为实际应用场景选择合适的保护机制提供科学依据。

5 动态响应优化策略研究

5.1 基于控制算法的响应优化

控制算法在优化协同关断动态响应中扮演关键角色。采用PID控制算法,通过对比例、积分、微分三个环节的参数调节,依据实时监测的电压、电流信号,精确调控SiC MOSFET和TVS的动作时机。例如,当检测到过压信号时,PID算法迅速计算并输出控制信号,使SiC MOSFET快速调整导通状态,配合TVS实现精准的过压保护。模糊控制算法也极具优势,它能处理复杂的非线性关系,将电压、电流的变化趋势模糊化处理,依据专家经验制定模糊规则,输出更为灵活智能的控制策略,有效提升系统在复杂工况下的响应速度与准确性,大幅优化协同关断的动态响应性能^[5]。

5.2 硬件电路优化设计

硬件电路的优化是提升动态响应性能的重要途径。在电路布局方面,合理规划SiC MOSFET、TVS及其他元件的位置,缩短信号传输路径,减少寄生电感和电容的影响。例如,将SiC MOSFET与TVS尽量靠近放置,降低线路阻抗,加快信号传递速度,使两者在协同关断时能更迅速地响应。在元件选型上,选用高速、低损耗的驱动芯片,提高SiC MOSFET的开关速度,确保其能快速执行关断指令。同时,采用高品质的电容和电感,稳定电路的供电和储能,保障在过压过流瞬间,硬件电路能稳定工作,为协同关断机制提供坚实的硬件基础,显著提升系统的动态响应能力。

5.3 温度等环境因素影响及应对

温度、湿度等环境因素对基于SiC MOSFET与TVS的协同关断机制动态响应影响显著。温度升高时,SiC MOSFET的导通电阻会增大,TVS的箝位电压也可能发生

漂移,导致保护性能下降。为应对温度影响,可采用温度补偿电路,实时监测温度变化,通过调整控制信号来补偿元件参数的变化。对于湿度问题,加强设备的密封和防潮设计,防止水汽侵入导致电路短路或元件性能劣化。此外,在高温环境下,优化散热结构,增加散热片面积或采用强制风冷、液冷等方式,确保SiC MOSFET和TVS在适宜的温度范围内工作,维持协同关断机制的稳定运行,保障系统在不同环境条件下的可靠动态响应。

6 结语

本研究围绕基于SiC MOSFET与TVS的多级协同保护门结构设计及动态响应优化,取得了一系列关键成果。成功剖析两者特性,构建并优化二级、三级协同关断机制,从硬件与算法层面显著提升动态响应性能。这些成果在电力电子领域意义深远,可大幅提升电力系统稳定性与可靠性,有望广泛应用于新能源发电、智能电网等场景,助力行业发展。不过,研究仍存在一定局限。模型构建时,部分复杂工况和元件特性简化处理,与实际有偏差;实验环境也难以完全模拟现实复杂多变的运行条件,影响成果普适性。未来,可深化理论研究,完善模型,拓展实验范围,使研究成果更贴合实际需求,持续推动电力系统保护技术的进步。

参考文献

- [1]金爱娟,朱婷,李少龙.SiC MOSFET低功耗多谐振驱动电路设计[J].电子元件与材料,2024,43(11):1390-1398+1405.
- [2]杨孟广,姜仁华,徐树.SiC MOSFET串扰抑制驱动电路设计[J].微电机,2024,57(3):35-39.
- [3]田颖,陈培红,聂圣芳,卢青春.功率MOSFET驱动保护电路设计与应用[J].电力电子技术,2005,39(1):73-74+80.
- [4]柳舟洲.SiC MOSFET驱动及保护电路设计[J].微电机,2019,52(12):70-73.
- [5]彭咏龙,李荣荣,李亚斌.大功率SiC MOSFET驱动电路设计[J].电测与仪表,2015,52(11):74-78.