650V CoolSiC™混合单管

优化性价比

关于本文档

范围和目的

本篇应用笔记介绍了 650V CoolSiC™混合单管，阐述了产品级特性，并转化为系统级优势，同时展现了潜在的应用场景。

650V CoolSiC™混合单管结合了两种成熟且行业领先的半导体技术：TRENCHSTOP™ 5 IGBT 和 CoolSiC™ G6 肖特基二极管。这是一款易用、高性价比且经验证的优秀产品。

目标读者

对现代分立 IGBT 有基本了解的功率电子工程师。

简介

目录

关于本文档 1

目录 2

1 简介 3

1.1 定位 3

1.2 产品组合 4

2 产品特性 5

2.1 关于反向恢复 5

2.2 开关损耗和开关行为 5

2.3 导通损耗 7

2.4 数据表详细规格 7

2.4.1 二极管电流额定值 8

2.4.2 二极管开关特性 8

3 系统级改进 9

3.1 一般考虑因素 9

3.2 潜在应用 9

3.2.1 三电平逆变器的钳位路径 9

3.2.2 图腾柱 PFC 电路的高速桥臂 10

3.2.3 半桥变换器 12

4 总结 13

参考文献 13

文档修订记录 14

1 简介

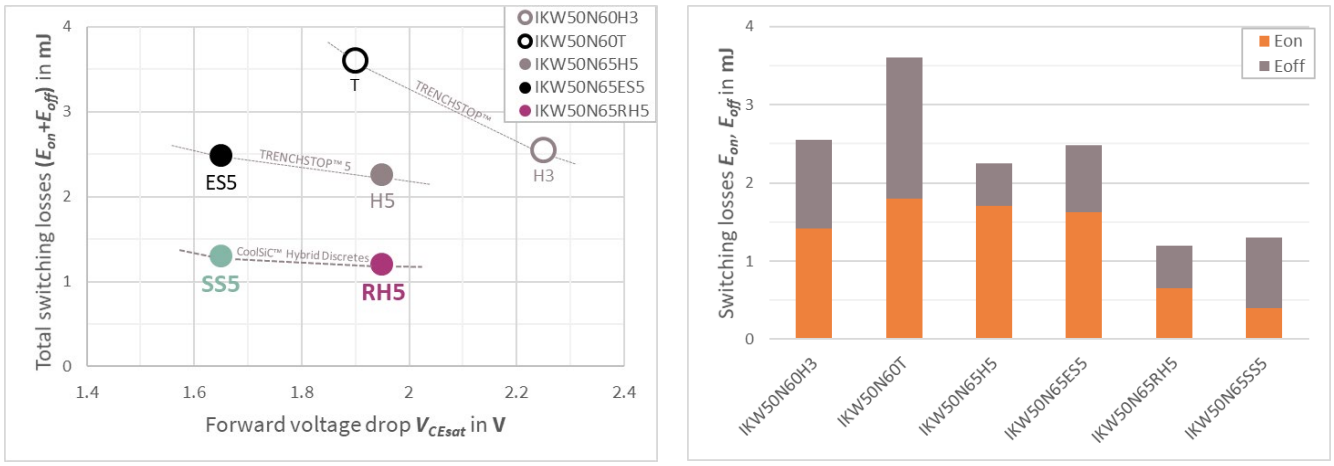
大多数连接到电网的低功率电子系统都基于 600V 或 650V 的半导体开关。因此，针对此电压等级开发的器件概念和技术不占少数[2]-[5]。硬开关变换器的设计需要可靠的续流二极管，因此 IGBT 无疑已经成为最流行的器件类型。从纯技术角度来看，宽禁带开关可能是合适的替代品，但 IGBT 的性价比，以及其经验证的可靠性确实非常出色。对于应用于 CoolSiC™混合单管[1]的 IGBT，这一点尤其明显。

650V CoolSiC™混合单管集成了两种成熟的、业界领先的半导体技术：TRENCHSTOP™ 5 IGBT 和 CoolSiC™ G6 肖特基二极管。与传统的带有硅续流二极管的双包装产品相比，该项组合技术具备两大优势：显著降低开关损耗和改善电磁兼容性（EMC）。另一优势是用户友好性：可以轻松替换传统的 TRENCHSTOP™ 5 IGBT。

本节剩余部分简要介绍了 CoolSiC™混合单管的概念及其产品组合。如需详细了解产品特性，请参阅第 2 节。如需详细了解应用，以及如何将产品特性转化为系统级的提升，请参阅第 3 节。

1.1 定位

一般通过*权衡表*描述 IGBT 的定位。这类图表展示了特定器件的损耗特性，即说明它是优化了低导通损耗还是低开关损耗。在权衡表图 1a）中，x 轴为 IGBT 的正向压降 V_{CEsat}，y 轴为总开关能量 $(E_{on}+E_{off})$。CoolSiC™混合单管对 TRENCHSTOP™ IGBT 进行了明显的改进：开关能量大幅降低。可通过选用合适的栅极电阻，减少 50%的开关损耗。



a）权衡表　　b）开关能量

图 1. 600V TRENCHSTOP™、650V TRENCHSTOP™ 5 和 650V CoolSiC™ 混合单管在额定电流和最高温度下的数据表规格：a）导通和开关损耗权衡图 b）开关能量分解。

简介

根据以往的规则，导通损耗通常由正向压降 V_{CEsat} 表示，而开关损耗则通过关断能量 E_{off} 来衡量。开通能量 E_{on} 被忽略的原因有二：一，开关热量在很大程度上取决于二极管；二，在过去的器件中，关断能量是导致开关损耗的主导因素。然而根据图 1b），该结论已不再适用于现代 650 V IGBT：由于硅续流二极管具备反向恢复特性，因此开关损耗主要由开通能量产生。因此可以明确的是，若要显著降低开关损耗，必须减少反向恢复电荷。针对这一需求，CoolSiC™混合单管进行了统一性改进：第六代 CoolSiC™二极管完全消除了反向恢复。这使得在最小化开关损耗的同时不需要牺牲电磁兼容性，例如通过分段的开关斜率。

1.2 产品组合

CoolSiC™混合单管的潜在应用广泛、产品组合全面丰富。简而言之，我们的产品组合包含了各种不同的优化权衡、电流额定值和封装选项。您可以通过互联网找到最新的产品组合概述[1]。

CoolSiC™混合单管的命名规则如图 2 所示。注意，CoolSiC™混合单管与 TRENCHSTOP™ 5 IGBT 的命名规则保持一致。每个零件号由八个功能块组成，其中第七块描述了续流二极管的类型及其电流额定值。“R”和“S”分别表示半额定和全额定碳化硅肖特基势垒二极管。

共包二极管的额定电流通常是相对于 IGBT 而规定的。全额定二极管的额定电流与 IGBT 相似，半额定二极管的额定电流约为其 50%。图 3 以两个 50A 器件为例，直观展示 CoolSiC™混合单管的相对二极管额定值。如需进一步了解针对电流等级的说明，请参阅第 2.4.1 节。

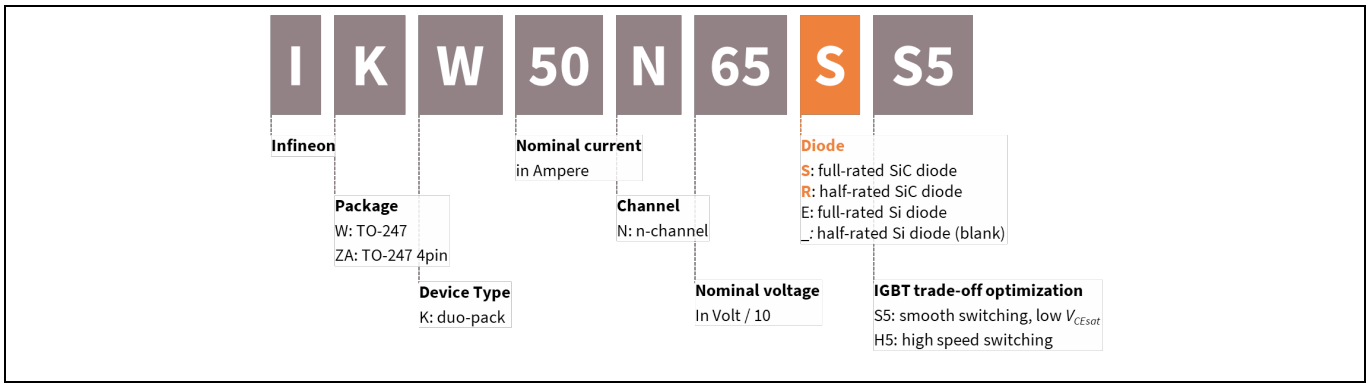


图 2. CoolSiC™ Hybrid 分立器件的命名法：部件编号与传统 TRENCHSTOP™ 5 IGBT 一致；第七块描述了使用的续流二极管。

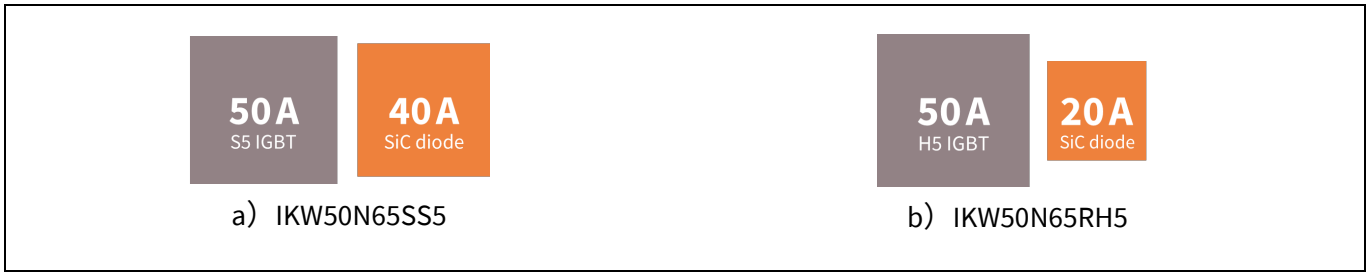


图 3. 二极管电流额定值，以两个 50 A 器件为例：a）全额定二极管 IKW50N65SS5，b）半额定二极管 IKW50N65RH5。

2 产品特性

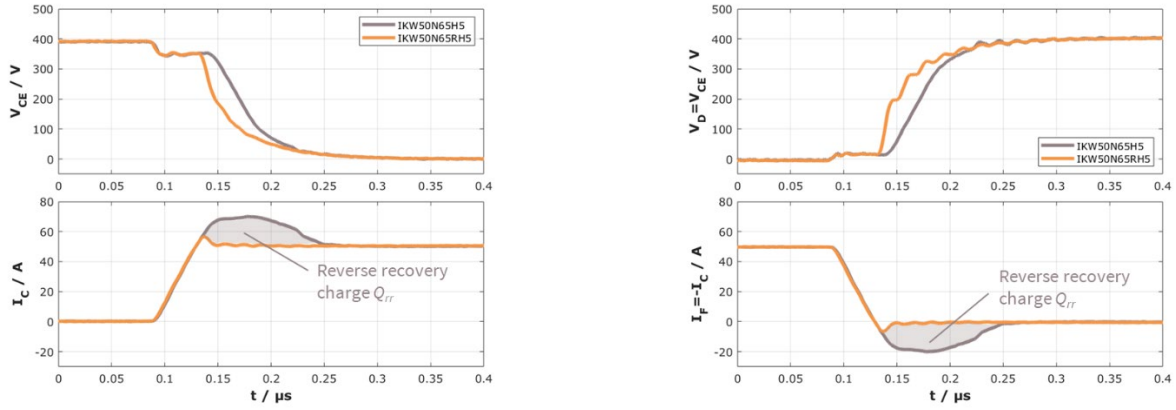
本节介绍 CoolSiC™混合单管的特性，着重描述 CoolSiC™混合单管的通态和开关行为，以及数据表与传统 TRENCHSTOP™ 5 双封装的区别。

2.1 关于反向恢复

PN 结二极管无法立即从导通状态切换到截止状态。在转换阶段，PN 结二极管需要经历反向恢复：二极管的阻断电压上升，抽取导通期间积累在二极管芯片中的电子空穴。抽取出的等离子体称为反向恢复电荷，会导致开关损耗。

图 4a）和 b）展示了在 IGBT 导通过程中获取的示例性开关瞬态。为突出反向恢复的效果，我们直接比较硅 PN 结二极管波形（灰色）和碳化硅肖特基势垒二极管波形（橙色）。在负载电流完全换向到 IGBT 之前，波形是相同的。随后，相应的二极管就不再处于正向偏置状态，可以开始阻断电压了。碳化硅肖特基势垒二极管的电压会立即上升。但 PN 结二极管则需要更长的时间，因为阻断电压需要将电子空穴等离子体（通常称为反向恢复电荷）从二极管中提取出来。

显然，反向恢复对 IGBT 和二极管都造成了损耗。部分损耗是由反向恢复过程中的（$Q_{rr} \cdot V_{bus}$）直接造成的，其余损失则是由电压斜率变缓导致的。由于碳化硅肖特基势垒二极管在导通期间不会充满过量电荷载流子，因此无需经历反向恢复过程。与硅 PN 结二极管相比，该特性可显著减少开关损耗。



a）IGBT 波形　　b）二极管波形

图 4.　在 400V、50A、150°C 下，IGBT 导通后的半桥电流换向示例波形：橙色为碳化硅二极管的波形，灰色为硅 PN 二极管的波形；由此可见反向恢复对 a）IGBT 和 b）二极管的影响。

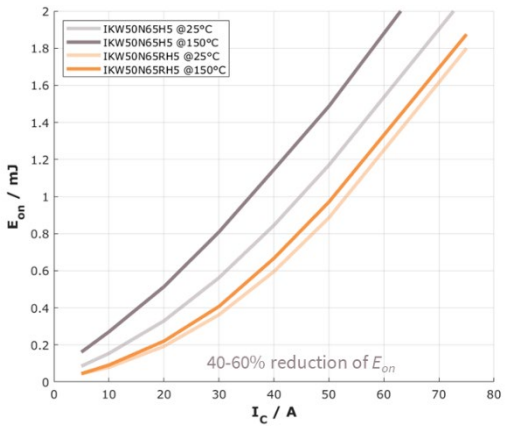
2.2 开关损耗和开关行为

如上所述，CoolSiC™ 混合单管采用碳化硅肖特基势垒二极管，其开关损耗相比传统的 TRENCHSTOP™ 5 双封装硅二极管大幅降低。具体而言，两者的关断开关能量 E_{off} 基本保持不变，但 CoolSiC™ 混合单管的导通开关能量 E_{on} 大幅降低，且完全消除了二极管恢复能量 E_{reco}。此外，导通能量和开关斜率几乎不受温度的影

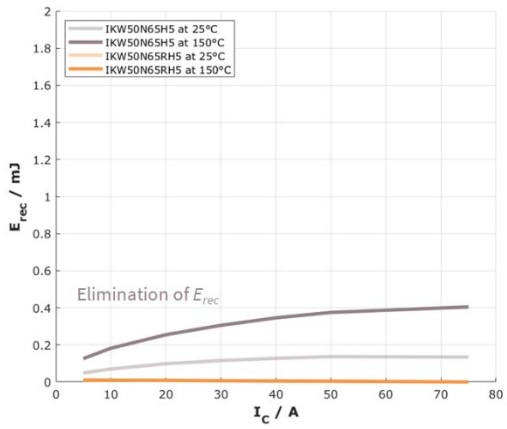
产品特性

响。如示例测量数据（图 5）所示，将总开关能量（$E_{on}+E_{off}+E_{rec}$）减半是切实可行的。然而，实际的减少量是相对的，取决于具体的运行条件：负载电流越低，开通速度越快；温度越高，损耗降低的效果就越显著。

CoolSiC™ 混合单管不仅具备业界通晓的损耗降低潜力，还拥有一项优势性特征，即其性能提升并未带来负面影响。传统的降损方法往往会带来更剧烈的开关瞬态——更陡峭的开关斜率、更高的过电压。这一现象在使用碳化硅肖特基势垒二极管时体现的并不明显。CoolSiC™ 混合单管甚至能够提升电磁兼容性和系统可靠性。

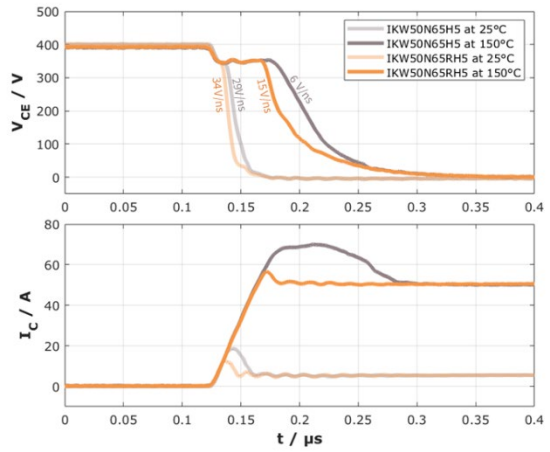


a）IGBT 的导通能量

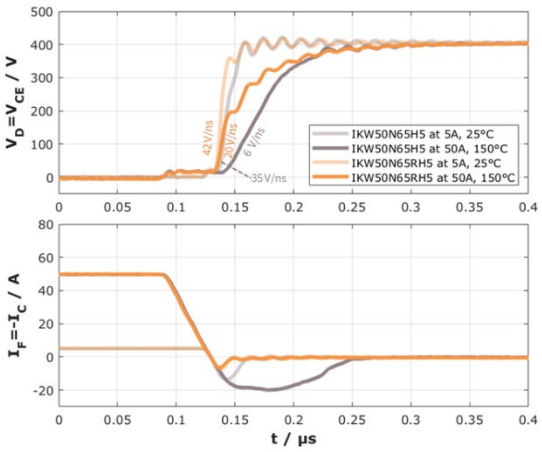


b）二极管的反向恢复能量

图 5.　IGBT 导通的开关能量：a）IGBT 导通时的消耗的能量，b）二极管的反向恢复能量；能量值以负载电流函数形式表示，测得条件为母线电压 400V、温度 25°C 和 150°C、栅极电压V、栅极电阻 10Ω。



a）IGBT 的导通波形



b）二极管的关断波形

图 6.　a）IGBT 和 b）续流二极管在同一开关瞬态期间的开关波形；该对比说明了低负载和高负载条件下的开关行为，测试条件：栅极电压=15 V、栅极电阻=10 Ω。

产品特性

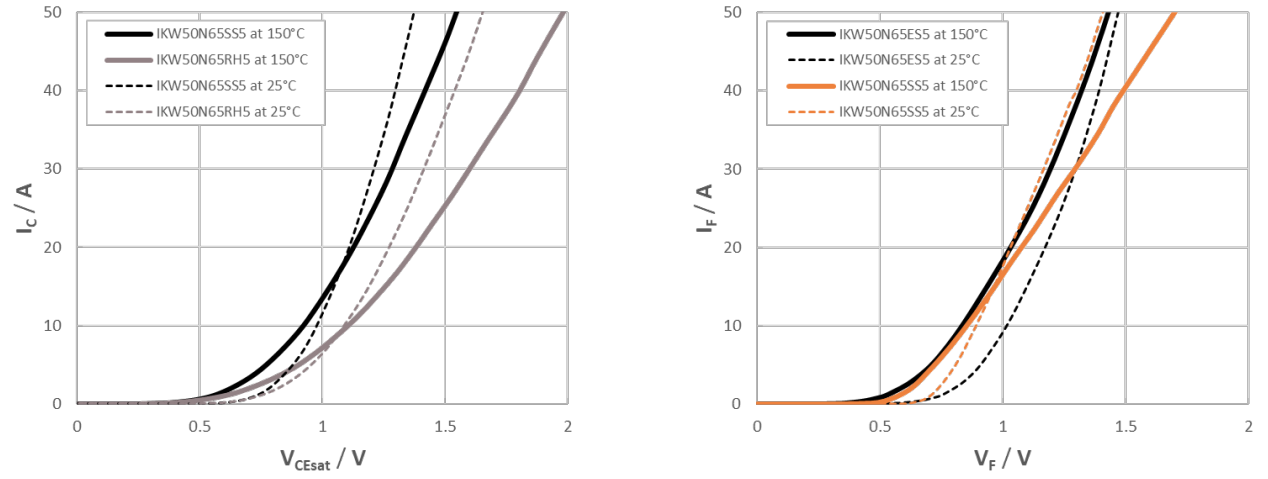
碳化硅肖特基整流二极管在高温和高电流条件下，其导通电压斜率确有明显的增加。基于以上条件，斜率值远未达到最大值。在低电流、低温度下，导通电压斜率呈陡峭走势。如图 6 所示，基于以上条件，TRENCHSTOP™ 5 IGBT 和 CoolSiC™混合单管的行为明显非常相似。简而言之，在最坏情况下，CoolSiC™ 混合单管并不会增加 *dv/dt*。相反，它们最大限度地降低了高电流和高温度下的开关速度。

最后，与传统的双封装相比，CoolSiC™混合单管在瞬态响应方面也具有优势。许多硅 PN 结二极管在高电压总线条件下容易出现“阶跃（Snappy）”现象，可能会加剧高过电压、严重振荡和寄生导通产生的风险。而由于肖特基二极管的单极特性，不存在由等离子体支持的反向电流，使得其可以快速关断。

2.3 导通损耗

由于 CoolSiC™混合单管复用了 IGBT 技术，因此其正向输出特性与 TRENCHSTOP™ 5 双封装的保持一致，正向导通损耗也相同。S5 与 H5 之间的权衡差异如图 7a）所示。

在反向情况下，二极管起到关键作用，如图 7b）所示，二者存在细微的差异。CoolSiC™混合单管中的肖特基势垒二极管在低温和低电流条件下具有优势，而 TRENCHSTOP™ 5 双封装硅二极管则在更高电流和温度值时表现出色。。



a）IGBT 权衡变化的输出特性　　b）二极管的正向特性

图 7.　a）正向和反向 b）压降。

2.4 数据表详细规格

为便于快速比较器件特性和参数，CoolSiC™混合单管的数据表与 TRENCHSTOP™ 5 数据表最大程度保持了一致。然而，如本节其余部分所述，差异仍会存在。

产品特性

2.4.1 二极管电流额定值

装有 CoolSiC™混合单管的碳化硅肖特基势垒二极管极大地提升了双联封装的性能。但截止目前，碳化硅芯片的价格仍然相对较高。因此，为追求相对平衡的性价比，二极管的设计不应过于冗余。这意味着与传统 TRENCHSTOP™ 5 双二极管相比，其直流和脉冲电流额定值略有降低。由于肖特基二极管没有开关损耗，因此通常二极管规格的降低可以被大幅减少的损耗补偿掉。

如图图 3 所示，采用 CoolSiC™混合单管组装的碳化硅二极管的直流电流额定值大约比传统 TRENCHSTOP™ 5 双封装的二极管小百分之二十。脉冲电流限制与二极管规格成正比，且与独立的 CoolSiC™二极管的浪涌和脉冲电流规范一致，比传统的 TRENCHSTOP™ 5 双封装二极管低。因此，为了让设计人员最大限度地利用二极管，数据表中提供了一个附加图表。它阐释了结温下的允许脉冲电流值关于结温的函数。示例如图 8 所示。

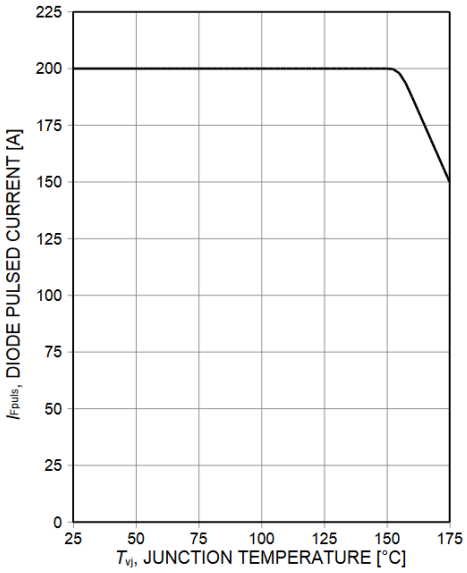


Figure 20. **Maximum pulse current as a function of junction temperature**

图 8. 示例脉冲电流图：此图表在 CoolSiC™混合分立器件数据表中首次引入，描述了二极管的最大脉冲电流与结温之间的函数关系；此处显示的图表属于 IKW50N65SS5。

2.4.2 二极管开关特性

基于碳化硅肖特基势垒二极管的工作原理，其在换向过程中不会经历反向恢复。简而言之，碳化硅肖特基势垒二极管在换相过程中不会产生反向恢复电荷。肖特基二极管换向时可见的电荷是电容性的，且比典型硅整流二极管的反向恢复电荷小几个数量级。因此，CoolSiC™混合单管的数据表不会包含任何关于反向恢复电荷 Q_{rr}、反向恢复时间 t_{rr} 或峰值反向恢复电流 I_{rrm} 的规格。

3 系统级改进

节将介绍 650V CoolSiC™ 混合单管的一些选用案例，并将上述产品特性转化为系统层面的优势。

3.1 一般考虑因素

650V CoolSiC™ 混合单管最具优势的特点之一是支持采用即插即用的设计方法。通过直接用 CoolSiC™ 混合单管替换经典的 TRENCHSTOP™ 5 双封装，可以显著提升系统性能。由于驱动器、电源、栅极电压以及栅极阻抗都无需改变，因此设计工作几乎为零。

理想情况下，可选择性应用 650V CoolSiC™混合单管。简单来说，指导原则是：在每个开关周期都会发生硬关断的电路位置使用碳化硅二极管。基于此，若将 650V TRENCHSTOP™ 5 双二极管替换为 650V CoolSiC™ 混合单管，可使每 10kHz 开关频率的效率提高约 0.1%。例如，若系统以 30kHz 运行，效率可提高约 0.3%。该经验法则可以直接通过[6]的实证展示（$Q_{rr}\cdot V_{bus}$）进行分析确定。需要注意的是，该经验法则的适用前提为：每个开关周期只有一个硬关断的情况，总线电压约为 350-400V。

当然，开关损耗的降低也可以用来提高开关频率。在输出功率要求不变的情况下，可以通过总开关损耗（$E_{on}+E_{off}+E_{rec}$）来估算潜在的开关频率提升能力。如第 2.2 节所述，若能减半开关损耗，总开关损耗也可能减半。理论上，此方案可使开关频率翻倍。

3.2 潜在应用

尽管 650V CoolSiC™混合单管可以显著提升许多系统的性能，但并非适合所有电路。本节会列举并解释一些选定的应用示例。

3.2.1 三电平逆变器的钳位路径

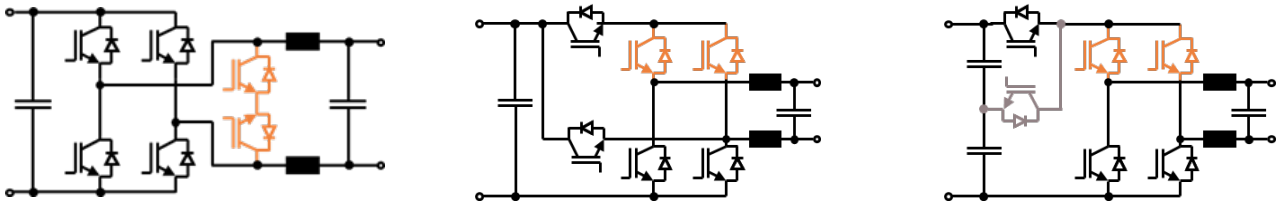
如第 3.1 节所述，应有选择地使用 650VCoolSiC™混合单管，以优化成本性能比。该策略对于三电平逆变器来说尤其正确。三电平逆变器通过创建一个 0V 的输出电压电平来减小滤波器电感的压力，而该 0V 电平通常通过专门的钳位路径获得。注意，在功率因数为 1 时，只有该钳位路径中的续流二极管会经历硬换向。因此，650V CoolSiC™ 混合单管在三电平逆变器中的应用应限于钳位路径。

图 9 是关于通常用于单相太阳能组串逆变器的三级拓扑结构的概述。橙色高亮的电路位置为钳位路径，最好使用 SS5 器件实现，即采用 S5 IGBT 的折衷方案：CoolSiC™ 混合单管。

CoolSiC™混合单管可以实现的性能提升和优化潜力如图 10 所示。该图显示了两种不同钳位桥臂实现方式下 HERIC 转换器的最大可达到输出电流的计算结果。黑线代表传统 TRENCHSTOP™ 5 IGBT 的实现，橙线代表 CoolSiC™混合单管的实现。由此可见，采用 CoolSiC™混合单管可以提高开关频率和输出功率。然而图表仅展示极端情况——要么在 30 kHz 时输出功率增加 20%，要么开关频率翻倍——但在这两个极端情况之间可以实现各种折衷方案。

系统级改进

需要注意的是，虽然以上计算基于 HERIC 拓扑，但同样适用基于 H5 和 H6 拓扑系列的单相逆变器，以及基于三电平 T 型拓扑[6]的三相逆变器，原因是这些逆变器的基本工作原理类似。



a）HERIC 拓扑 [1]　　b）H6 系列可选方案　　c）H5 拓扑可选方案 [2]

图 9.　常见的单相三相逆变器包括：a）HERIC 拓扑，b）H6 拓扑系列的一种方案，以及 c）H5 拓扑的各种方案；橙色标记的部分为钳位路径，理想情况下应使用 SS5 实现。

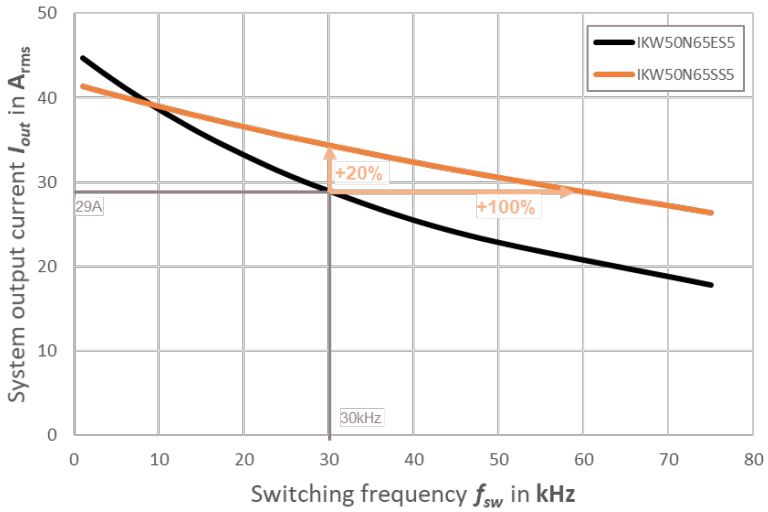


图 10.　比较 HERIC 转换器在不同开关频率值下可达到的最大输出电流：该桥臂使用 IKW50N65H5 实现，钳位路径采用 IKW50N65ES5（黑色）和 IKW50N65SS5（橙色）；所有 IGBT 均安装在同一散热器上；条件为：总散热系数 0.6 K/W 的散热器，每个封装的 Al_2O_3 陶瓷绝缘子为 0.4 K/W，T_{amb}=50°C，$T_{vj,max}$=150°C，V_{bus}=550 V，V_{out}=230 V，cos(ϕ)=0.9，V_{GE}=15/0 V，R_G=10 Ω。

3.2.2　图腾柱 PFC 电路的高速桥臂

目前最广泛使用的单相有源整流解决方案可能是图 11a）所示的升压 PFC。它的构建简单，控制方便，且只需使用一个开关即可实现，但需要在输入端放置一个桥式整流器。考虑到任何时候电流路径中都存在两个整流二极管，每个二极管造成大约 1V 的压降，因此在高压电输入时，桥式整流器的效率损失接近 1%。

[1]在某些司法管辖区，拓扑可能受到知识产权保护，如 EP 1 369 985 B1，因此使用时可能需要获得相关权利所有者的批准。

[2]在某些司法管辖区，可能有一款或多款拓扑方案受到知识产权保护，例如 EP 2 290 797 B1，因此使用此类方案可能需要获得相应权利所有者的批准。

系统级改进

当输入电压较低时，损耗值会上升。因此，许多无桥 PFC 拓扑被提作替代方案。有些拓扑需要第二个升压电感或会导致严重的电磁兼容问题，但图 11b）和 c）所示的图腾柱 PFC 则不存在这些副作用。该 PFC 由一个高速半桥桥臂和一个工频整流桥臂组成。RH5 器件是实现高速桥臂的理想器件。

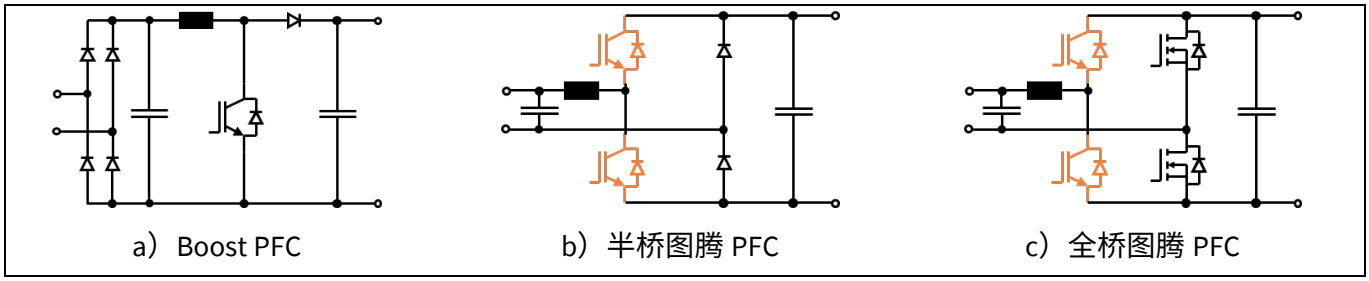


图 11. 单相 PFC 解决方案：a）电压提升型 PFC，b）半桥共阳极 PFC，以及 c）全桥共阳极 PFC；理想情况下，标注为橙色的组件应采用 RH5 实现。

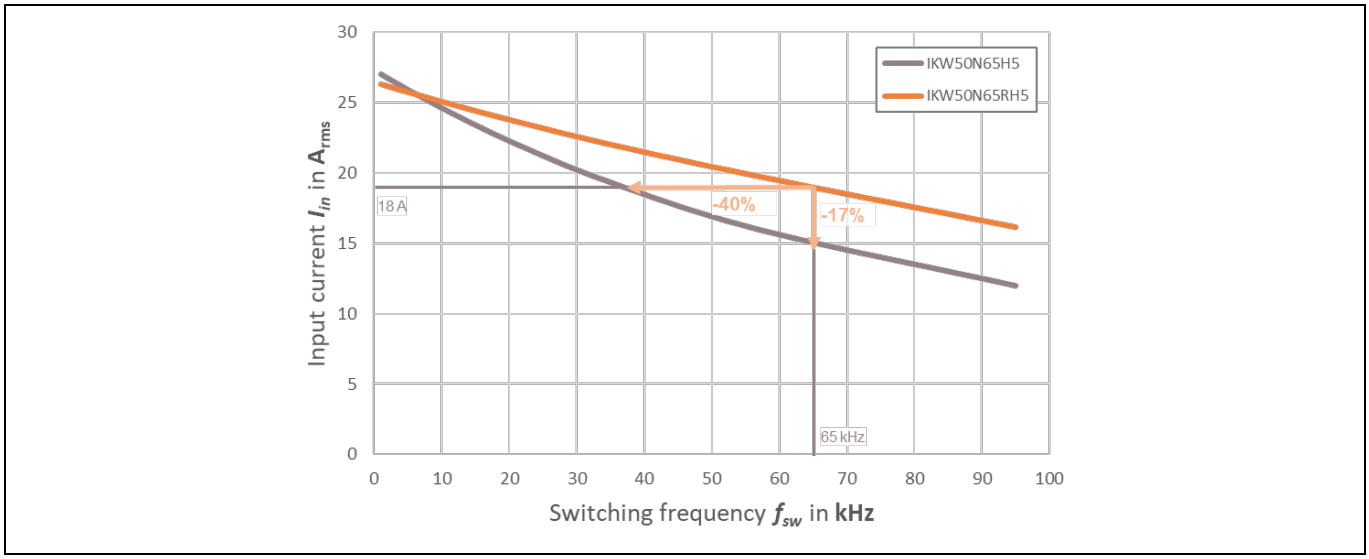


图 12. 不同开关频率下，半桥共阳 PFC 的可实现最大输出电流比较：高速桥臂采用 IKW50N65H5（黑色）和 IKW50N65RH5（橙色）；
条件：散热器总热流密度 1.1 K/W，基于聚酰亚胺的绝缘箔每封装 0.6 K/W，环境温度 T_{amb}=50° C，$T_{vj,max}$=150°C，V_{bus}=400 V，V_{in}=230 V·0.8=184 V，V_{GE}=15/0 V，R_G=5 Ω。

图 12 所示器件表现出了强大的输出电流能力。一个 50 A 器件可以在 65 kHz 的开关频率下运行，处理 3.3 kW 的功率。由于高性能 PFC 中普遍采用较高的开关频率和功率等级，因此市面已有现成的、高度优化且成本效益高的无源元件可供选择。在性能方面，TRENCHSTOP™ 5 IGBT 在 65kHz 以上的表现不具备竞争力，原因如下。首先，效率会大约降低 0.6%。其次，要么降低额定功率（约 2.8 kW），要么采用更大的散热器。

3.2.3 半桥变换器

CoolSiC™ 混合单管适用于需要双向功率流动能力的所有硬开关半桥变换器。对于上述使用场景，IGBT 的选择较为直观，而针对此场景，则取决于具体的设计目标。

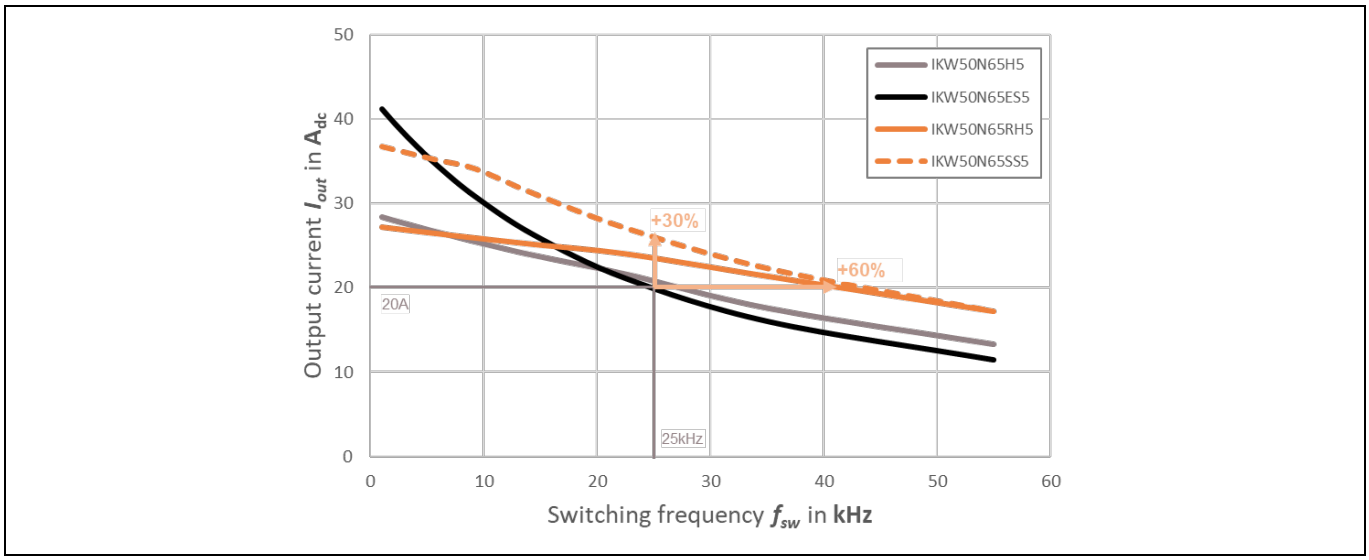


图 13. 半桥作为降压变换器时可实现的最大输出电流比较：电路采用 IKW50N65H5（灰色）、IKW50N65ES5（黑色）、IKW50N65RH5（实心橙色）和 IKW50N65SS5（虚线橙色）实现；IGBT 均安装在同一散热器上；
条件：散热器总热阻 1.1 K/W，聚酰亚胺基绝缘箔热阻 0.6 K/W，T_{amb}=50°C，$T_{vj,max}$=150°C，V_{bus}=400 V，V_{out}=200 V，V_{GE}=15/0 V，R_G=10 Ω。

示例计算见图 13。前提条件：采用传统 TRENCHSTOP™ 5 双封装技术，在 25 kHz 的频率下运行。仅从性能角度看，可以得出以下规则：

1. 如果仅追求输出功率的提升，选择 SS5 器件。由于开关频率较低，负载电流随之增加，因此半导体的导通损耗往往会提高。基于此，应当给二极管设定一个完整的额定值。
2. 如果仅追求开关频率的提升，选择 RH5 器件。基于高频特性，IGBT 的主要损耗是开关损耗，因此负载电流通常相对较低。这种半额定二极管通常可以充分利用，足以满足需求，避免了因过度设计带来的昂贵成本。
3. 在所示的示例计算图 13 中，另一种选择是使用 IKW75N65RH5 代替 IKW50N65SS5。

4 总结

CoolSiC™混合单管集成了两种业界领先的半导体技术：TRENCHSTOP™ 5 IGBT 和 CoolSiC™肖特基二极管 G6。以此打造出的产品性能接近于碳化硅开关的性能，但成本更低。

由于 CoolSiC™混合单管基于广泛使用的 TRENCHSTOP™ 5 IGBT 技术，因此设计过程简单直接：栅极驱动器、电源和栅极电压均可保持不变。特别是在直接替换 TRENCHSTOP™ 5 IGBT 的方案下，甚至连栅极阻抗也能保持一致。

CoolSiC™混合单管不仅设计简单，还能实现可观的性能提升。与 TRENCHSTOP™ 5 相比，其降低了开关损耗，实现了显著的效率提升。开关频率每提高 10 kHz，效率大约会提高 0.1%，这是适用于许多应用的简单经验法则，是提高输出功率、减少冷却工作量或提高开关频率的天然有利条件。

除以上特性外，CoolSiC™混合单管还有助于改善电磁兼容性的情况。由于肖特基势垒二极管具有单极性，因此不存在由等离子体支撑的反向电流，不会因突然关断而导致过电压和过度振铃。

CoolSiC™混合单管适用于多种不同的应用场景，例如三电平变换器或图腾柱功率因数校正（PFC）电路等。理想情况下，这些器件会被有选择性地应用于电路中的特定位置——即二极管在每个开关周期内都经历硬关断，而这便是二极管的优势所在。

参考文献

[1] CoolSiC™混合单管概述页 www.infineon.com/coolsic-hybrid-discretes

[2] TRENCHSTOP™ 5 IGBT 产品概述页 www.infineon.com/trenchstop

[3] CoolSiC™ MOSFET 产品概述页 www.infineon.com/coolsic-mosfet

[4] CoolGaN HEMT 产品概述页 www.infineon.com/coolgan

[5] CoolMOS™超结 MOSFET 产品概述页 www.infineon.com/coolmos

[6] K. Sobe, F. Brucchi，《基于硅和碳化硅的电压源逆变器的实验研究》（Experimental study of Si- and SiC-based Voltage Source Inverters），PCIM 欧洲（Europe）2017，德国纽伦堡（Nuremberg, Germany），2017 年 5 月。

文档修订记录

文档版本	提交日期	变更说明
1.0	2021-04-06	首次发布

Trademarks
All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2024-09-26

Published by

Infineon Technologies AG

81726 Munich, Germany

© 2024 Infineon Technologies AG. All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference
AN-2021-01_ZH

重要提示

本文档所提供的任何信息绝不应当被视为针对任何条件或者品质而做出的保证（质量保证）。英飞凌对于本文档中所提及的任何事例、提示或者任何特定数值及/或任何关于产品应用方面的信息均在此明确声明其不承担任何保证或者责任，包括但不限于其不侵犯任何第三方知识产权的保证均在此排除。此外，本文档所提供的任何信息均取决于客户履行本文档所载明的义务和客户遵守适用于客户产品以及与客户对于英飞凌产品的应用所相关的任何法律要求、规范和标准。

本文档所含的数据仅供经过专业技术培训的人员使用。客户自身的技术部门有义务对于产品是否适宜于其预期的应用和针对该等应用而言本文档中所提供的信息是否充分自行予以评估。

如需产品、技术、交付条款和条件以及价格等进一步信息，请向离您最近的英飞凌科技办公室接洽(www.infineon.com)。

请注意，该产品尚未获得汽车电子委员会的 AEC Q100 或 AEC Q101 文件认证资格。

警告事项

由于技术所需产品可能含有危险物质。如需了解该等物质的类型，请向离您最近的英飞凌科技办公室接洽。

除非由经英飞凌科技授权代表签署的书面文件中做出另行明确批准的情况外，英飞凌科技的产品不应当被用于任何一项一旦产品失效或者产品使用的后果可被合理地预料到可能导致人身伤害的任何应用领域。