

参考设计：5kW 隔离式双向 DC-DC 转换器

使用 SiC MOSFET 提高电源系统的效率

导言

如何解决环境和能源问题是一个重要的全球性议题。在电力需求持续增长的同时，节能需求以及对高效紧凑的电源转换系统的需求也迅速增长。

例如，为减少全球温室气体的排放，近年来在全球范围内采取了一系列举措以监管汽油车的使用。这些举措在发达国家和中国及印度等新兴国家均已开始实施，并成为了全球趋势。采用电动汽车（EV）是支持减少我们对汽油的依赖趋势的主要应对措施之一。但仍需解决一些挑战，充电基础设施的发展可能最为关键。

同时，另一个趋势就是全球范围内对太阳能发电系统的需求正在攀升。太阳能发电系统的建造基础为高效功率转换电路，这类电路可管理蓄电池储能系统以及电网的能源供应，可将损耗减至最小。新兴国家正致力于在相同的短期内开发高性能系统和太阳能发电系统，因此在发展其电动汽车充电基础设施时面临日益严峻的挑战。这导致工程团队亟需技术支持和开发资源，以使其能顺利、快速地从开发阶段过渡至商业化。

这仅为越来越多的此类情况的一个示例，工程团队现将参考设计作为一种有效的开发设计方法。随着商品化和标准化的发展，这种情况在工业领域尤为明显。基于元器件制造商的相关和实际应用信息、功能广泛的参考设计现在正受到关注。

东芝电子元件及存储装置的参考设计

东芝电子元件及存储装置株式会社提供各种基于器件的参考设计，从而使系统开发和原型设计更为容易。可从参考设计中心下载完整的参考设计。关于本文介绍的参考设计（URL 待定）以及相关信息的链接，请参阅页末的“相关信息”部分。请注意，参考设计附带使用条款，请一并参阅。

本文将介绍“隔离式双向 DC-DC 电源”的参考设计，其可作为大功率转换应用（包括电动汽车充电桩和太阳能发电机中的逆变器）的基础。

●5kW 隔离式双向 DC-DC 转换器（参考设计：RD167）

此参考设计为使用双有源桥（DAB）方法的隔离式双向 DC-DC 转换器，这是大功率转换应用中最流行的一种方法。DAB 方法在两侧均设有全桥，并且通过调节左右桥电路之间的相位差，控制功率传输方向和传输量。此参考设计具有以下特性：

(1) 采用 DAB 法的双向大功率转换

尽管可通过几种功率拓扑结构配置双向 DC-DC 转换器，但在此 5kW 参考设计中，选用了 DAB 法以进一步强调效率。DAB 法在高压侧和低压侧均设有全桥配置，因此相较于半桥法，其可支持更高的功率。另外，由于移相功率转换，可实现软开关，从而达到更高的转换效率。由于开关损耗相对较大，采用绝缘

栅双极型晶体管（IGBT）作为开关元件无法实现效率提高目的。但使用碳化硅（SiC）MOSFET 可实现大功率转换和高效率。

(2) 在高压侧使用 SiC MOSFET 实现高功率转换效率

如果提供了 3 相 400V 交流输入功率因数校正输入，则高压侧应支持 750V 直流电压。通常在这类电压下工作时采用 IGBT。但 IGBT 的开关损耗明显大于 MOSFET（在结构和特性层面），这限制了效率水平。相反，由于 SiC MOSFET 具有快速开关能力，因此其开关损耗比 IGBT 低，并且还可在更高的开关频率下运行。通常当开关频率变高时，开关损耗会增加。但使用 SiC MOSFET 可使总损耗小于 IGBT。此外，切换至较高的开关频率允许使用较小的电感器，从而有可能减小电源单元的尺寸。

(3) 整体解决方案，包括低压侧 MOSFET（TK49N65W5）和栅极驱动电路（TLP5214A）

此参考设计基于低压侧 400V 输入输出的假设，使用硅（Si）MOSFET。TK49N65W5 Si MOSFET 配有一个高速寄生二极管。结合所使用的超级结结构，有助于减少开关损耗并确保维持高效率水平。TLP5214A 栅极驱动 IC 光耦具有 4A 灌电流和源电流能力，即使在电压升高时也可充分驱动栅极充电和放电以支持 SiC MOSFET 开关。TLP5214A 具有过流保护（OVP）功能和欠压锁定（UVLO）功能，以在发生异常情况时发挥电路保护作用。

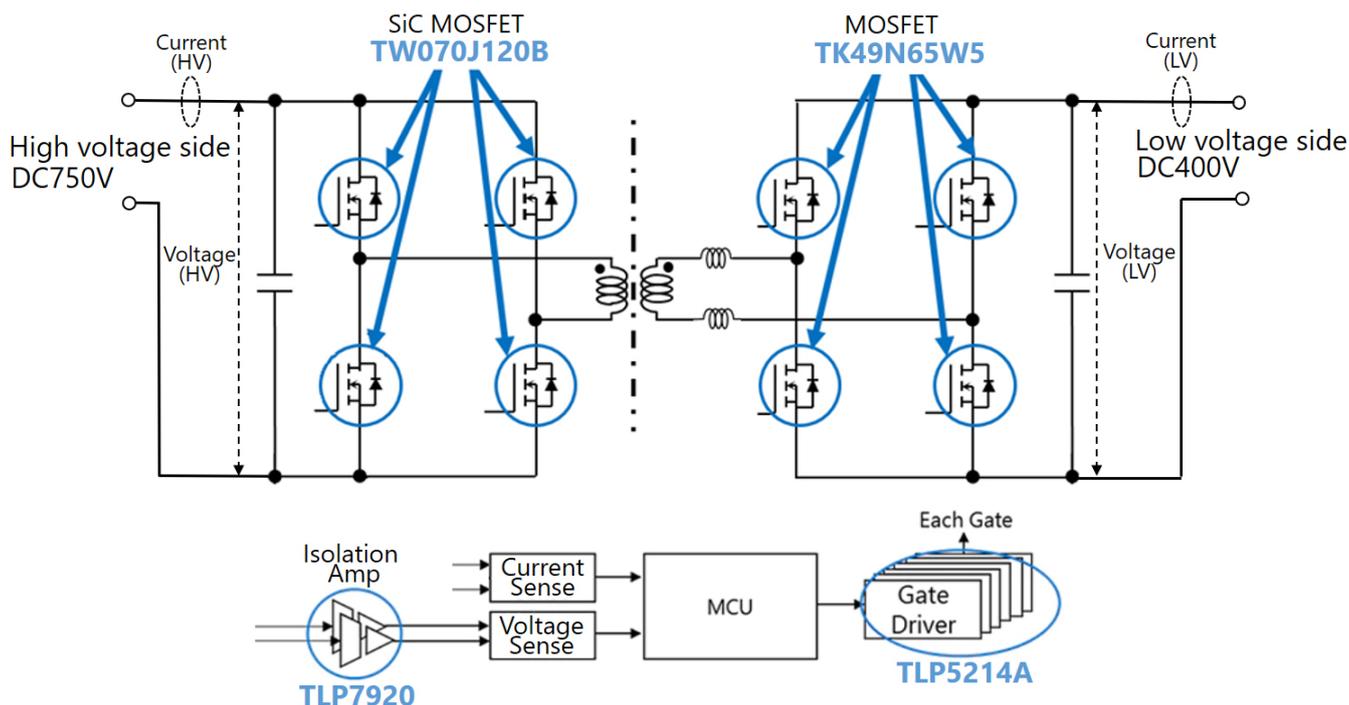


图 1: 5kW 隔离式双向 DC-DC 转换器参考设计的功能方框图

主要规格如下：

- 高压侧电压：750V DC（输入电压范围：732V-768V）
- 低压侧电压：400V DC（输入电压范围：396V-404V）

- 额定功率：5kW
- 功率转换效率：在 100%升压负载下为 97%或以上，在 100%降压负载下为 97%或以上
- 开关频率：50kHz
- 控制方法：恒压输出控制
- 隔离电压：2500V（主电路-控制电路）
- 保护（S/W）：高压侧过电压保护、低压侧过电压保护

此参考电路的高转换效率是通过 DAB 双向 DC-DC 转换法的综合优势以及将 SiC MOSFET 作为开关元件来实现的。相较于 IGBT，这里的一个关键性能指标就是 SiC MOSFET 的开关频率更高。这意味着 SiC 功率器件有很大的潜力，可提高功率转换电路的性能和效率，现越来越多地用于各种相关应用。

基于 DAB / SiC MOSFET DC-DC 转换器参考设计的应用示例

示例 1：电动汽车充电系统

图 2 中的图显示了集东芝的两款参考设计于一体的充电系统。5kW 隔离式双向 DC-DC 转换器参考设计与高效 3 相 400V 交流输入 PFC 电源相结合。这两款参考设计可一起使用，以便快速、轻松地完成系统开发，可通过东芝公司获得这两款参考设计。

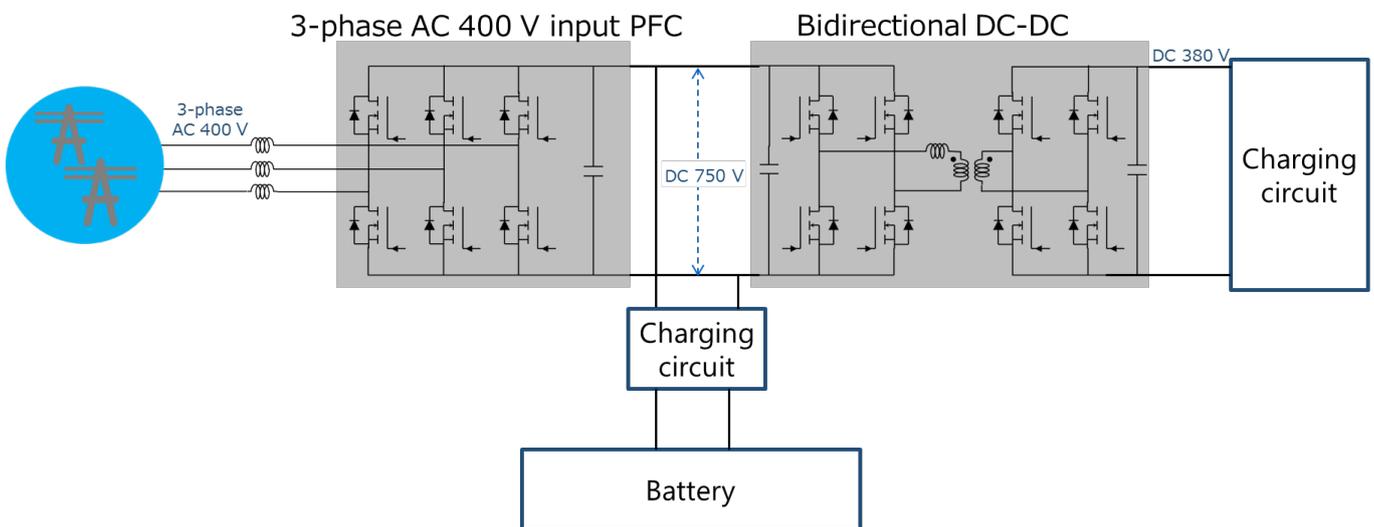


图 2：使用 5kW 隔离式双向 DC-DC 转换器参考设计的电动汽车充电系统图

延长行驶距离和加快充电速度将是鼓励未来电动汽车更广泛普及的关键因素。

尽管可以通过增加电池容量实现更长行驶距离，但可安装在车内的电池容量将受到尺寸和重量的限制。因此，延长行驶距离的一种可能方法就是确保电池具有足够的容量，再提高充电频率。充电频率提高意味着每次充电所需

时间更短，因此需要更高的电压。

为解决这一问题，正在开发用于高速电池充电的基础设施，并已开始部署 3 相 400V 交流电动汽车充电桩。尽管使用 3 相 400V 交流输入源可达到电动汽车充电所需的大功率电平，但仍需考虑其它问题。随着充电桩数量的增加，总功率损耗也不容忽视。因此，高效功率转换至关重要。

使用 3 相 400V 交流电作为输入电源需要用于 AC-DC 转换的功率因数校正 (PFC) 电源，以及用于从 PFC 的 DC 输出向电动汽车电池充电电路供电的高效隔离式 DC-DC 转换机制，可将损耗减至最小。此外，如需将电动汽车电池用作其它设备的电源，则双向 DC-DC 转换器显然会很有用。

本应用示例旨在促进高速、低损耗电动汽车充电站的广泛使用。其通过组合 PFC 电源来实现此目的，以通过 3 相 400V 交流电以及可确保提高效率和双向运行的隔离式 DC-DC 转换器，实现高功率的高效 AC-DC 转换。

示例 2：光伏逆变器

用于光伏发电的逆变器（以下简称为“PV 逆变器”）需要具有低损耗的高效双向 DC-DC 转换器。它用于调节太阳能电池板提供的直流电压电平，并将其传输至逆变器和蓄电池充电电路。

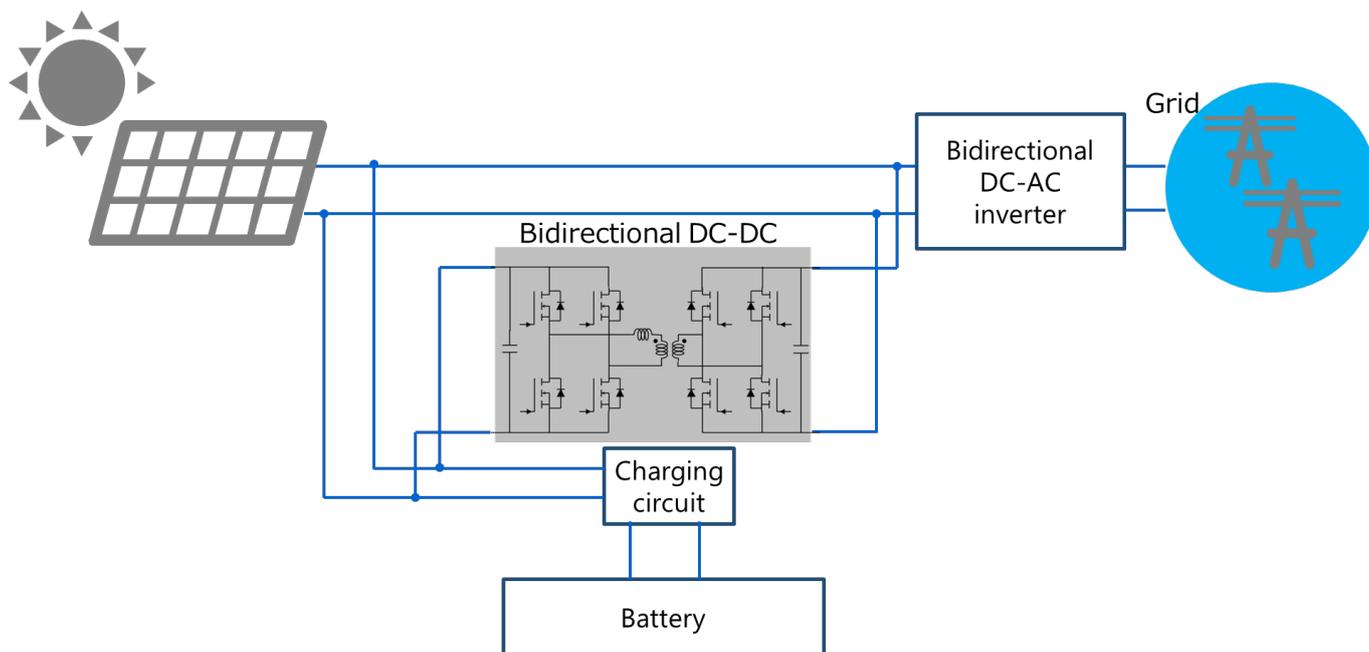


图 3：使用 5kW 隔离式双向 DC-DC 转换器参考设计的 PV 逆变器系统图

PV 逆变器用于将光伏板产生的直流电压转换为商用交流电压，以供房屋和工厂使用，或将其馈入电力系统（电网）（反向功率流）。但太阳能电池板的发电量取决于当日时间和天气，因此光伏板在夜间或阴天期间无法提供足够的功率。通过加装一个可在有利的天气条件下存储剩余电力的电池，即可构建一个可在需要时提供稳定电力供应的系统。

双向 DC-DC 转换器对于从蓄电池向电力系统提供电力必不可少，并且对于从电力系统向蓄电池提供电力，双向 DC-DC 转换器也必不可少。高效双向运行使用隔离式 DC-DC 转换器来创建一个 PV 逆变器系统，该系统利用有限的功率并具有低损耗性能。

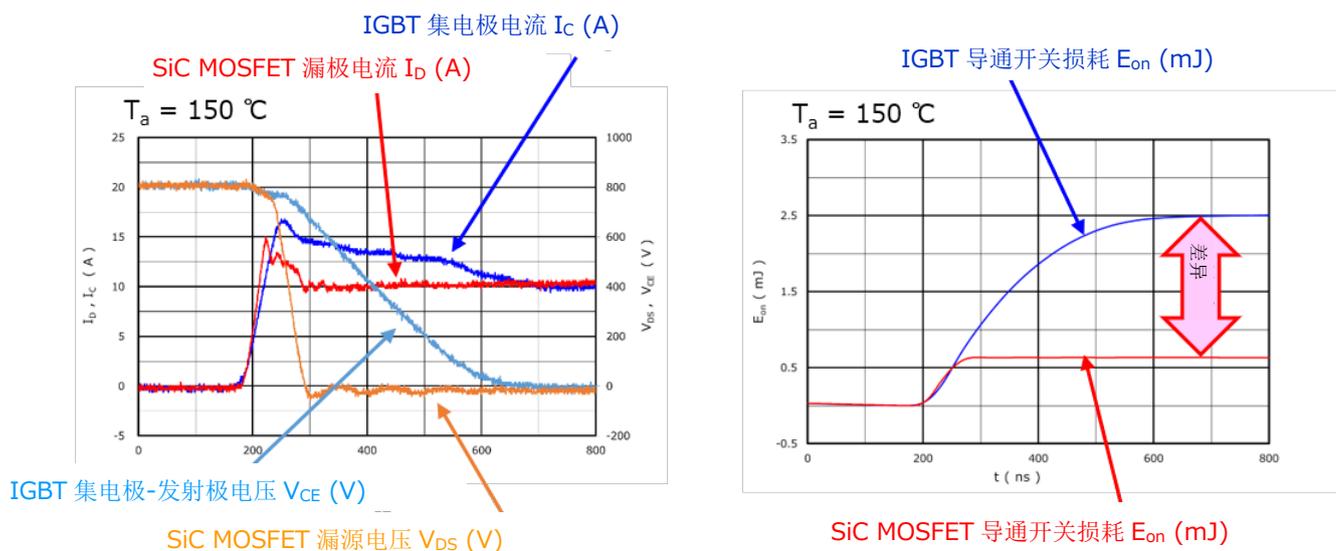
SiC MOSFET 的特性

所使用的电源开关器件极大地影响了电源转换系统的效率。主要目的为减少开关损耗。除了常规的 Si 器件，基于宽禁带（WBG）半导体材料的功率器件也日益增多，其中最著名的就是 SiC 和氮化镓（GaN）。

在上文重点介绍的参考设计中，按照指示可采用 SiC MOSFET 提高转换效率。下文介绍了 IGBT 和 SiC MOSFET 的损耗比较示例。

● SiC MOSFET 和 IGBT 的损耗比较

开关晶体管的损耗为开关损耗、由导通电阻导致的导通损耗以及内部二极管的正向电压损耗之和。其中，开关损耗占总损耗的近 90%。图 4 为 SiC MOSFET 和 IGBT 导通期间的开关波形及损耗 E_{on} 的一个比较示例。用于比较的 SiC MOSFET 是此参考设计中使用的东芝的 [TW070J120B](#)，而 IGBT 则为另一家公司生产的高速开关类产品。



<ul style="list-style-type: none"> • SiC MOSFET 测试条件 <p>$V_{DD}=800V$, $I_D=10A$, $T_a=150^\circ C$, $V_{GS}=20V/-5V$, 介电负载: $L=1mH$, 外部栅极电阻 $R_G=150\Omega$</p> <p>源漏二极管与感性负载并联用作续流二极管 (FWD)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • IGBT 测试条件 <p>$V_{CC}=800V$, $I_C=10A$, $T_a=150^\circ C$, $V_{GE}=20V/-5V$, 介电负载: $L=1mH$, 外部栅极电阻 $R_G=47\Omega$</p> <p>发射极-集电极二极管与感性负载并联用作续流二极管 (FWD)</p>
<p>* 测试条件设为与导通时 I_D 和 I_C 的倾斜度 $dI_D(I_C)/dt$ 相匹配</p>

图 4: SiC MOSFET 和 IGBT 导通时开关波形和损耗 E_{on} 的比较示例

此示例显示 IGBT 的导通损耗为 2.5mJ，SiC MOSFET 的导通损耗为 0.6mJ，因此当用 SiC MOSFET 代替 IGBT 开关晶体管时，导通损耗可降低 76%。这种损耗差异主要是由于开关波形图中 V_{DS} 和 V_{CE} 之间的开关特性（速度）差异。SiC MOSFET 几乎立即完全导通，从而允许 I_D 相应流动。IGBT 需要一定时间才能完全导通，而延迟是造成损耗的原因。

同样，图 5 是导通和关断开关损耗、导通电阻引起的导通损耗以及内部二极管 SiC MOSFET 和 IGBT 的正向电压引起的损耗之和的一个模拟比较示例。具体条件包括 $V_{CC}=400V$ 、 $I_D=7.0A_{rms}$ 、功率因数=1、3 相调制、 $T_J=150^\circ C$ 。根据该结果可知，SiC MOSFET 的损耗比 IGBT 的损耗约低 28W。损耗减少有助于提高设备的效率。

这样，即使在现有的通用功率转换应用中，也可用 SiC MOSFET 代替 IGBT 以显著减少损耗。由于 SiC 技术实现了更高的功率密度，因此通过减少损耗还可减小相同功率下的电路尺寸。这也意味着相同大小的电源可输送更多电力。

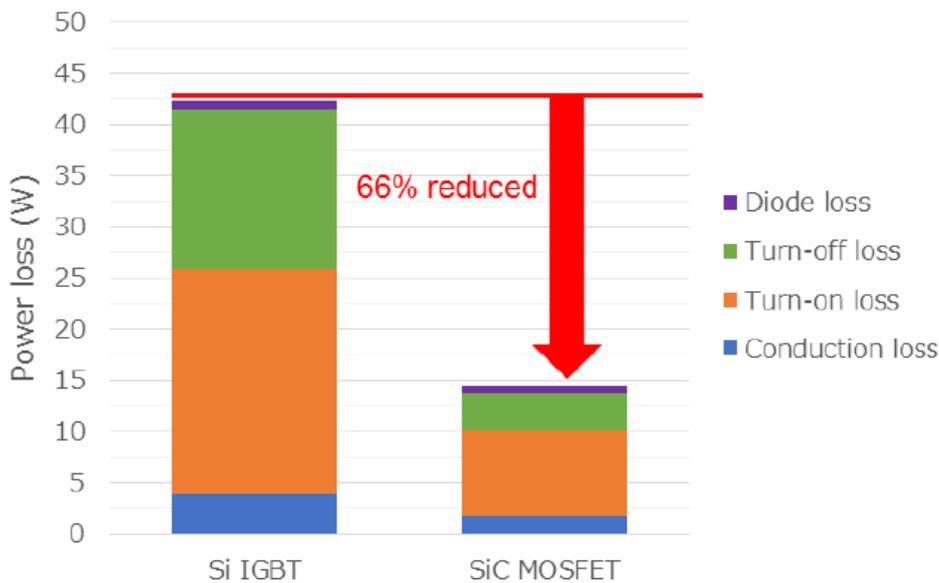
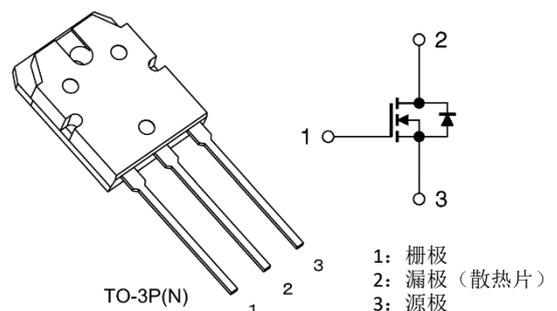


图 5: SiC MOSFET 和 IGBT 损耗的比较示例

- **SiC MOSFET: [TW070J120B](#)**

此参考电路高压侧中使用的 TW070J120B 是具有内置 SiC 肖特基势垒二极管（SiC SBD）的一个 N 沟道 SiC MOSFET，使用东芝的第二代技术设计而成。主要规格如下：

- 内置 SiC 肖特基势垒二极管
- 内置二极管低正向电压： $V_{DSF}=-1.35V$ （典型值）
- 高耐压： $V_{DSS}=1200V$
- 宽栅极-源极电压： $V_{GSS}=+25V$ 至 $-10V$
- 低导通电阻： $R_{DS(ON)}=70m\Omega$ （典型值）
- 高栅极阈值： $V_{th}=4.2V-5.8V$



内置的 SiC 肖特基势垒二极管相较于 MOSFET 体（寄生）二极管实现了更低的 V_{DSF} ，并降低了二极管的导通损耗。另外，由于其配备具有高 I_{FSM} 的一个二极管，因此具有非常强的浪涌电流耐受能力。从可靠性角度看，内置二极管减少了元器件数量，这也有助于降低最终电路的故障率。

栅极-源极电压额定值 V_{GSS} 相较于竞争产品范围更大。 V_{GSS} 的宽容差有助于简化电路设计。此外，栅极阈值电压通常高于竞争产品。因此不太容易因栅极电压和噪声波动造成损坏。得益于这些特性及其低损耗和稳健性，可使用 TW070J120B SiC MOSFET 更轻松的设计效率更高的电源解决方案。

• SiC MOSFET 的栅极驱动电路

SiC MOSFET 的栅极驱动电路必须考虑 SiC 的物理特性和高速开关特性。以下为使用 TW070J120B 时需考虑的要点总结。欲了解完整的详细信息，请参考相关应用指南。

SiC MOSFET 栅极控制需考虑的要点：

- (1) 严格遵守栅极-源极电压的-10V 至 25V 的绝对最大额定值。
- (2) 将导通时的栅极电压设为 18V 至 20V。
- (3) 将关断时的栅极电压设为 0 至-5V。
- (4) 需用栅极电荷对栅极-源极电容 (C_{GS}) 全充电。

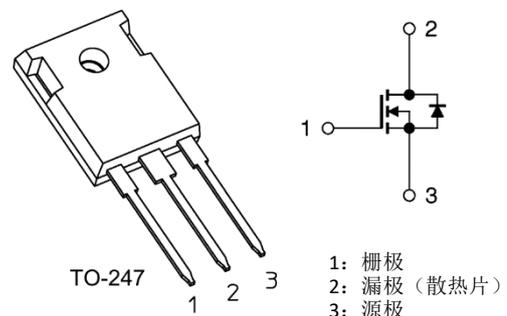
为施加栅极电压并将其导通，必须将栅极-源极电容充电至栅极电荷。当 V_{GS} 为 0 至 20V 时，标准栅极电荷为 70nC ($V_{DD}=800V$ 、 $V_{GS}=20V$ 、 $I_D=36A$)。必须以选定的开关频率提供足以传输此电荷的电流。

设计工程师还应注意，在先前推出的参考设计中，为栅极驱动电路设置了标准条件。可通过检查和评估电路操作来优化这些参数。

• 超级结型 MOSFET: [TK49N65W5](#)

对于参考电路的低压侧，使用了 TK49N65W5 N 沟道 Si MOSFET。由于其 DTMOS 超级结型拓扑结构和快速反向恢复时间 (t_{rr})，导通电阻值 ($R_{DS(ON)}$) 低。另外，优化了栅极开关速度。主要规格如下：

- $R_{DS(ON)}$: 0.051 Ω (典型值)
- t_{rr} : 145ns (典型值)
- 漏源电压 (V_{DSS}): 650V (额定电压)
- 栅极-源极电压 (V_{GSS}): $\pm 30V$ (额定电压)
- 漏极直流电流 (I_D): 49.2A (额定电流)
- 漏极脉冲电流 (I_{DP}): 196A (额定电流)



总结

总结

近年来，缩短产品上市时间的需求日益高涨，参与设备开发和设计的工程师必须使其在尽可能短的时间内投产。对于客户的设计和原型制作，供应商的参考设计至关重要。

本文介绍的 5kW 隔离式双向 DC-DC 转换器参考设计可帮助工程团队开发具有高功率密度的高效功率转换应用。减少损耗和提高效率的关键是将降压侧的电源开关从传统的 IGBT 替换为 SiC MOSFET。此外，在低压侧使用具有低 RDS(ON)和快速 trr 的超级结型 MOSFET 也有助于减少损耗。

众所周知，SiC 功率器件在大功率应用领域具有优势，但为利用其优异的性能，则必须了解 SiC 功率器件的特性。为此，本文介绍的参考设计提供了一种有助于加快开发和设计速度的标准方法。

从应用角度看，电动汽车的日益普及，有助于全球范围内减少全球温室气体排放量。开发团队可将此参考设计用于基础设施设计，例如电动汽车充电桩和太阳能发电系统，这对于电动汽车的普及和创造低碳社会至关重要。本文介绍的参考设计对于在新兴国家工作的开发团队尤为有益。

东芝计划在未来增加其参考设计的数量，从而加快开发含有用于大功率转换应用的 SiC 功率器件的设计。同时，除了目前的第二代产品，我们正在开发新一代 SiC 功率器件，并计划在不久的将来推出第三代产品。

信息链接

- 5kW 隔离式双向 DC-DC 转换器（参考设计：RD167）
- [用于 3 相 400V 交流输入的 PFC 电路（参考设计 RD044）](#)
- [参考设计中心](#)
- [SiC MOSFET 产品页面](#)
- [SiC MOSFET: TW070J120B](#)
- [超级结型 MOSFET: TK49N65W5](#)

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

<https://toshiba.semicon-storage.com/ad/contact.html>



RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

Toshiba Corporation and its subsidiaries and affiliates are collectively referred to as “TOSHIBA”.

Hardware, software and systems described in this document are collectively referred to as “Product”.

- TOSHIBA reserves the right to make changes to the information in this document and related Product without notice.
- This document and any information herein may not be reproduced without prior written permission from TOSHIBA. Even with TOSHIBA's written permission, reproduction is permissible only if reproduction is without alteration/omission.
- Though TOSHIBA works continually to improve Product's quality and reliability, Product can malfunction or fail. Customers are responsible for complying with safety standards and for providing adequate designs and safeguards for their hardware, software and systems which minimize risk and avoid situations in which a malfunction or failure of Product could cause loss of human life, bodily injury or damage to property, including data loss or corruption. Before customers use the Product, create designs including the Product, or incorporate the Product into their own applications, customers must also refer to and comply with (a) the latest versions of all relevant TOSHIBA information, including without limitation, this document, the specifications, the data sheets and application notes for Product and the precautions and conditions set forth in the "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" and (b) the instructions for the application with which the Product will be used with or for. Customers are solely responsible for all aspects of their own product design or applications, including but not limited to (a) determining the appropriateness of the use of this Product in such design or applications; (b) evaluating and determining the applicability of any information contained in this document, or in charts, diagrams, programs, algorithms, sample application circuits, or any other referenced documents; and (c) validating all operating parameters for such designs and applications. **TOSHIBA ASSUMES NO LIABILITY FOR CUSTOMERS' PRODUCT DESIGN OR APPLICATIONS.**
- **PRODUCT IS NEITHER INTENDED NOR WARRANTED FOR USE IN EQUIPMENTS OR SYSTEMS THAT REQUIRE EXTRAORDINARILY HIGH LEVELS OF QUALITY AND/OR RELIABILITY, AND/OR A MALFUNCTION OR FAILURE OF WHICH MAY CAUSE LOSS OF HUMAN LIFE, BODILY INJURY, SERIOUS PROPERTY DAMAGE AND/OR SERIOUS PUBLIC IMPACT ("UNINTENDED USE").** Except for specific applications as expressly stated in this document, Unintended Use includes, without limitation, equipment used in nuclear facilities, equipment used in the aerospace industry, lifesaving and/or life supporting medical equipment, equipment used for automobiles, trains, ships and other transportation, traffic signaling equipment, equipment used to control combustions or explosions, safety devices, elevators and escalators, and devices related to power plant. **IF YOU USE PRODUCT FOR UNINTENDED USE, TOSHIBA ASSUMES NO LIABILITY FOR PRODUCT.** For details, please contact your TOSHIBA sales representative or contact us via our website.
- Do not disassemble, analyze, reverse-engineer, alter, modify, translate or copy Product, whether in whole or in part.
- Product shall not be used for or incorporated into any products or systems whose manufacture, use, or sale is prohibited under any applicable laws or regulations.
- The information contained herein is presented only as guidance for Product use. No responsibility is

assumed by TOSHIBA for any infringement of patents or any other intellectual property rights of third parties that may result from the use of Product. No license to any intellectual property right is granted by this document, whether express or implied, by estoppel or otherwise.

• **ABSENT A WRITTEN SIGNED AGREEMENT, EXCEPT AS PROVIDED IN THE RELEVANT TERMS AND CONDITIONS OF SALE FOR PRODUCT, AND TO THE MAXIMUM EXTENT ALLOWABLE BY LAW, TOSHIBA (1) ASSUMES NO LIABILITY WHATSOEVER, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, INDIRECT, CONSEQUENTIAL, SPECIAL, OR INCIDENTAL DAMAGES OR LOSS, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, LOSS OF PROFITS, LOSS OF OPPORTUNITIES, BUSINESS INTERRUPTION AND LOSS OF DATA, AND (2) DISCLAIMS ANY AND ALL EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AND CONDITIONS RELATED TO SALE, USE OF PRODUCT, OR INFORMATION, INCLUDING WARRANTIES OR CONDITIONS OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ACCURACY OF INFORMATION, OR NONINFRINGEMENT.**

• Product may include products using GaAs (Gallium Arsenide). GaAs is harmful to humans if consumed or absorbed, whether in the form of dust or vapor. Handle with care and do not break, cut, crush, grind, dissolve chemically or otherwise expose GaAs in Product.

• Do not use or otherwise make available Product or related software or technology for any military purposes, including without limitation, for the design, development, use, stockpiling or manufacturing of nuclear, chemical, or biological weapons or missile technology products (mass destruction weapons). Product and related software and technology may be controlled under the applicable export laws and regulations including, without limitation, the Japanese Foreign Exchange and Foreign Trade Law and the U.S. Export Administration Regulations. Export and re-export of Product or related software or technology are strictly prohibited except in compliance with all applicable export laws and regulations.

• Product is subject to foreign exchange and foreign trade control laws.

• Please contact your TOSHIBA sales representative for details as to environmental matters such as the RoHS compatibility of Product. Please use Product in compliance with all applicable laws and regulations that regulate the inclusion or use of controlled substances, including without limitation, the EU RoHS Directive. **TOSHIBA assumes no liability for damages or losses occurring as a result of noncompliance with applicable laws and regulations.**

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation