

IGBT5 模块在风电高可靠性和高功率密度设计中的应用

随着风电技术在全球新能源市场的广泛应用，平价上网和补贴退坡的市场需求，目前风机单机容量朝着更大容量的方向发展。风电变流器作为其核心部件之一，对高可靠性和高功率密度设计成为产品设计主要的技术目标和方向，进一步提升系统发电效率和降低 CAPEX 投资成本。尤其，海上风电成为当前主要风电技术应用，其处于高湿、高盐、高腐蚀的恶劣运行环境，对功率器件可靠性要求提出更高的技术标准。

作者：英飞凌科技（中国）有限公司 张浩、赵振波、陈立烽

为了满足该应用设计上的需求，英飞凌 [1] 推出了集第五代 IGBT5 芯片技术和高可靠性的 .XT 封装技术于一体的 PrimePACK™ 系列 IGBT 模块。其中的 PrimePACK3™+ 封装更是提升了电流密度，半桥模块达到 1800A [2]，是业界目前电流密度最高的产品之一，并满足高压 HV-H3TRB 可靠性标准 [3]。

目前，风电拓扑电路主要分为双馈和直驱两种形式，如图 1 和图 2。双馈机型中主要功率覆盖范围从 400kW 到 6MW，其变流器容量只有转差 S 功率，转子侧频率在 0~15Hz 左右，其与风力发电机转差有关，低频运行引起较高的结温波动，对可靠性和寿命要求比较高。直驱机型中目前永磁同步功率覆盖范围最大可以到十几 MW，自激励产生励磁不同于双馈。其机侧输出电压，电流的幅度和频率取决于发电机转速，通过整流转换到直流电压，其风电变流器容量与发电机相同，此时结温波动也比较大。作为核心部件 IGBT 器件，结温波动量直接影响其工作寿命和可靠性，结合变流器的实际工况和特点会决定系统的整个运行成本、寿命、平均无故障时间、发电量等方面的指标。

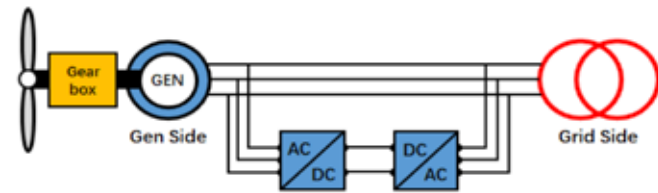


图 1：双馈主拓示意图

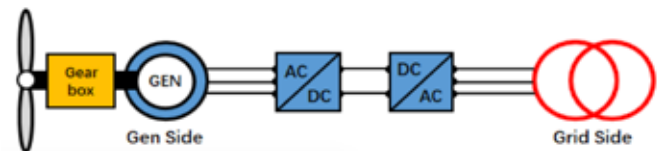


图 2：直驱主拓示意图

一、IGBT5 芯片技术和 .XT 封装技术的简介 [4][5]，如图 3 所示：

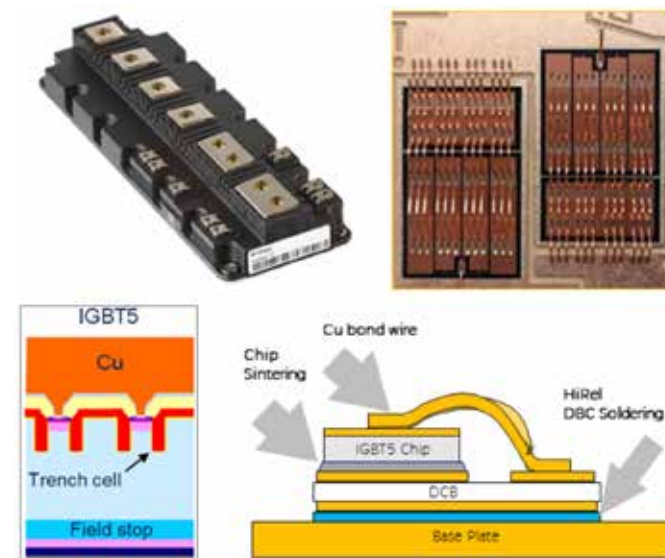


图 3：IGBT5 & .XT 技术简介

相比基于 IGBT4 芯片和传统封装技术的 PrimePACK™ 模块，IGBT5 模块有如下特点：

- IGBT5 芯片厚度：减薄厚度以优化芯片特性
- IGBT5 芯片上表面金属化层：从传统铝合金升级到铜层，增加热容，并提升器件短路能力，同时也为芯片的铜绑定工艺奠定了基础
- 芯片上表面铜绑定线：基于 IGBT5 芯片的铜金属化处理，可以实现芯片表面的铜绑定线工艺，相比传统的铝绑定工艺，除

了增加绑定线载流能力，还能大幅提升芯片的秒级功率循环 PC(sec) 可靠性

- 芯片下表面银烧结：在芯片与 DBC 之间，相比传统的焊料技术，银烧结技术可以极大地改善芯片焊料的脱落与失效现象，从而进一步提升芯片的秒级功率循环 PC(sec) 可靠性
- DBC 的高可靠性焊接：特殊优化的专利 HiRel 高可靠 DBC 焊接技术，显著提升温度循环 (TC) 和分钟级功率循环 PC(min) 能力。因此，该技术也广泛应用于英飞凌相关汽车 IGBT 模块产品，以满足其对温度循环和温度冲击能力的苛刻要求。

简单总结，相比 IGBT4 的产品，IGBT5 模块的优势如下：

1. 提升模块额定电流至 1800A，增加近 30% 电流能力
2. PC 寿命是常规封装的 10 倍以上
3. 允许最大运行温度为在 175℃ 的芯片 $T_{vj,op}$

因此，IGBT5 模块是实现高可靠性和高功率密度的最佳选择。

二、以风电变流器的典型应用为背景，阐述 IGBT5 方案的高可靠性高功率密度优势

以 1MW 直驱（无高速齿轮箱）的 690Vac 两电平的风电变流器为例，在传统的 IGBT4 方案中，1MW 的三相整流或逆变单元，一般由 3 个功率单元组成。在每个功率单元内部，通常由两个 FF1000R17IE4 模块并联，再加驱动板、母排、电容、结构件、功率线缆和散热器及水路设计等构成。而在 IGBT5 的方案中，只需 1 个功率单元，即可实现 1MW 三相逆变或整流的功能，如下图 4 所示：

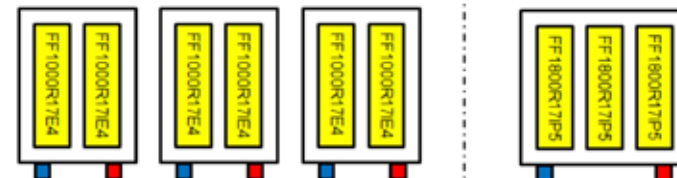


图 4：IGBT4 和 IGBT5 方案的功率单元对比

所以，从功率单元 (STACK)、功率组件及功能系统层面，IGBT5 方案的优势非常明显：

- 功率单元 (STACK) 的功率密度大幅提升
- 功率组件数量减少，逆变或整流单元的系统成本优化
- 功率组件数量减少，整体系统的结构简化、可靠性提升

同样以上述 1MW 直驱 690Vac 两电平为例，其电网侧逆变的输出频率通常为 50Hz/60Hz，而风机侧 (Gen Side) 的整流部分的输出频率相对较低，通常为 8Hz~12Hz。因此，机侧 (Gen Side) 的续流二极管 FWD 的芯片结温波动，往往是 IGBT 模块寿命计算的瓶颈。

以一组典型 1MW 直驱变流器的机侧参数（如表 1）为例，通过仿真计算，对比分析传统 IGBT4 方案和新的 IGBT5 方案（如图 5 所示）的差异：

母线电压 Vdc/V	1100
输出电压 Vac_rms/V (line-line)	690
输出电流 Io_rms/A	1000
IGBT 开关频率/Hz	2.5k
机侧输出频率/Hz	8.8
SVPWM 调制比 M	1.024
功率因素 PF	-1
水冷散热器的热阻(Rth(h-a)_per switch) /K/W	0.015
水冷散热器的时间常数(Tau) /s	5
水冷散热器的进水温度 Tinlet /°C	50
水液中乙二醇含量	53%

表 1：典型 1MW 直驱在机侧的参数



图 5：IGBT4 和 IGBT5 方案的对比分析

利用英飞凌官网 IPOSIM [6] 进行仿真，得到 IGBT4 和 IGBT5 两种方案的模块损耗和芯片结温情况，分别如图 6 和图 7 所示：

Gen Side, Rg-Datasheet	2 * FF1000R17IE4 /W	1 * FF1800R17IP5 /W
Power Losses per phase	2X2X(426+486)=3648	1X2X(1197+991)=4376

图 6：IGBT4 和 IGBT5 方案在机侧的损耗对比

图 6 中：IGBT5 损耗要比 IGBT4 大一些，除了芯片的代数不同外，主要还是 P 系列与 E 系列芯片的本身特性和技术定位的差异：P 系列属于典型的大功率慢速芯片，而 E 系列属于中等功率的相对快速的芯片；因此，P 系列的开关损耗会相对大一点 [5]。

Gen Side	Tjmax, TrnC	ΔT, TrnC	Tjmax, DrnC	ΔT, DrnC
FF1000R17IE4	85	13	115	34
FF1800R17IP5	133	25	153	38

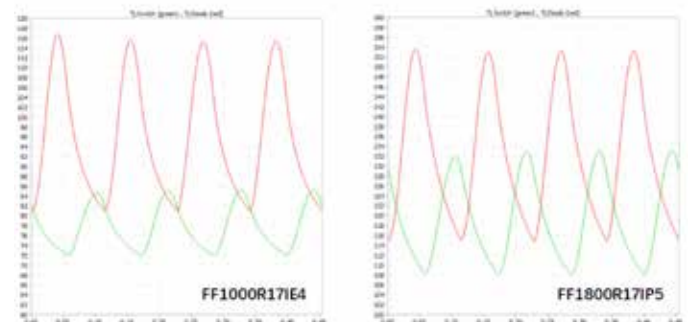


图 7：IGBT4 和 IGBT5 方案在机侧的结温对比

如图 7 示：IGBT4 的最高结温明显低于 IGBT5，同时结温波动也略小于 IGBT5；但是，这并不意味着 IGBT4 模块的功率循环 PC 次数更多（或 PC 寿命更长）。

根据上述两种方案的 T_{vjmax} 和 ΔT_{vj} 仿真，查看英飞凌提供的 IGBT4 和 IGBT5 的典型 PC 曲线 [8]，可以得到大概的功率循环 PC 次数，如下图 8 所示：

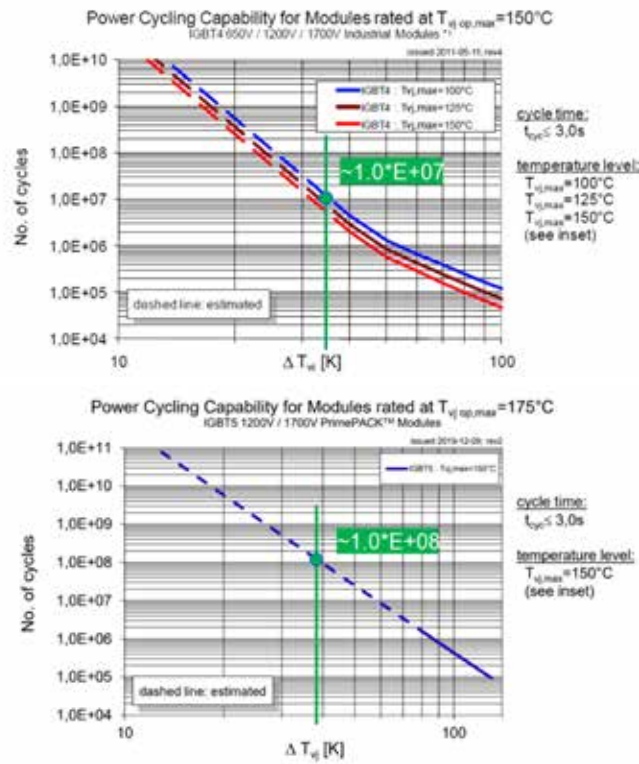


图 8: IGBT4 和 IGBT5 模块的 PC 曲线及次数对比

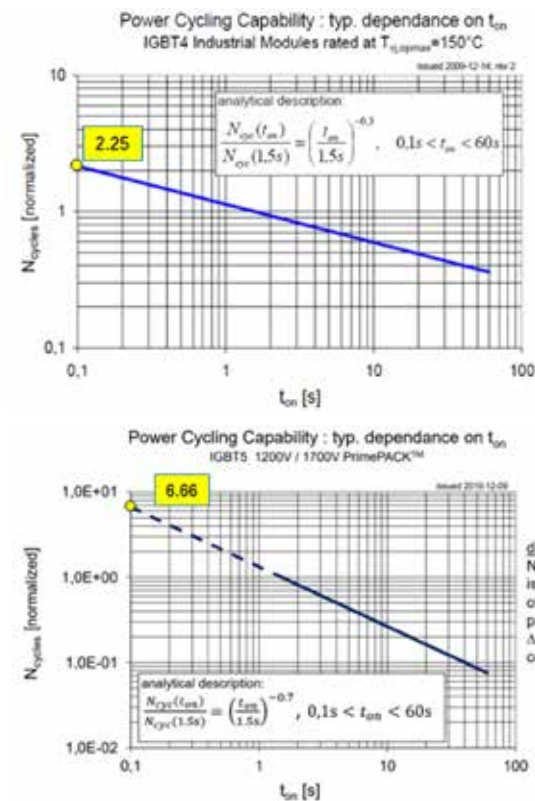


图 9: IGBT4 和 IGBT5 模块的 Ton 时间折算公式和曲线

再结合英飞凌给出的 IGBT4 和 IGBT5 的 T_{on} 时间折算公式和曲线，以修正其功率循环 PC 次数 [9]，如下图 9 所示：（当 T_{on} 时间 $< 0.1s$ ，暂以 $0.1s$ 的数据替代）

最终可得 IGBT4 和 IGBT5 理论的功率循环 PC 次数，如图 10 所示。

Gen Side / $T_{vj,FWD}$	$T_{vj,max,D}/^{\circ}C$	$\Delta T_{D}/^{\circ}C$	PC cycles	% PC
FF1000R17IE4	115	34	$2.3 \cdot E+07$	100%
FF1800R17IP5	153	38	$6.7 \cdot E+08$	2900%

图 10: IGBT4 和 IGBT5 模块的 PC 次数对比

由上述仿真结果可知：即使在结温和结温波动更高的情况下，IGBT5 方案的 PC 次数/寿命，依然是 IGBT4 方案的近 30 倍之多！

因此，IGBT5 方案的模块寿命与可靠性，相比传统封装的 IGBT4 方案，有了极大的提升！

三、结合先进的水冷散热技术，不断突破 IGBT5 方案的功率密度极限

由前面的理论计算分析可知，在 1MW 的典型机侧工况下，IGBT5 (FF1800R17IP5) 依然还有余量。所以，结合先进的水冷散热技术，利用实测和仿真，来评估 IGBT5 方案的功率密度极限。目前市场上不同性能的水冷散热器热阻参考，如图 11 所示，

Water Cooling for PrimePACK	Rth(h-a) per switch /K/W	%
Normal Heatsink	0.015	100%
Good Heatsink	0.013	87%
Excellent Heatsink	0.010	67%

图 11: 不同性能的水冷散热器热阻参考

其中，散热器供应商 Mersen，为此定制了一款基于 ISOMAXX 技术的高性能水冷板样品。为了验证水冷板的散热特性，在流量 35L/min、压降 480mbar、冷却液为 53% 乙二醇、进口温度 $50^{\circ}C$ 的条件下，进行了散热器的热阻标定测试。测试 Setup 如图 12 所示，以加热块作为热源替代 IGBT5 模块，测量每个热源底下散热器的温升，以得到相应的热阻。

实测的水冷板的温升和热阻结果，如下图 13 所示：

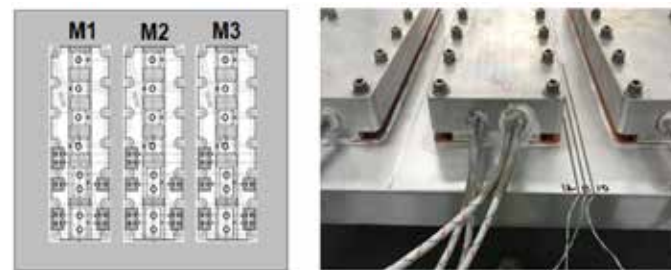


图 12: Mersen 散热器示意图和热阻实测图 (加热块热源)

Module	Power losses /W	$\Delta T_{heatsink} /^{\circ}C$	Rth(h-a) per switch /K/W
M1	5405	23.5	0.0087
M2	5423	23.6	0.0087
M3	5394	22.3	0.0083

图 13: Mersen 高性能水冷板的温升和热阻实测结果

考虑到上述的热阻实测是以加热块为热源，而实际模块中为多芯片的热源发热，后者相对更为严苛，将导致实际的散热器热阻会有所上升。因此，可以采用有限元的热仿真工具，通过 HTC 来模拟等效的散热条件，分别以加热块热源（实测）和多芯片热源进行仿真，得到两者之间的大致比例，以修正之前的热阻实测值，如下图 14 所示。

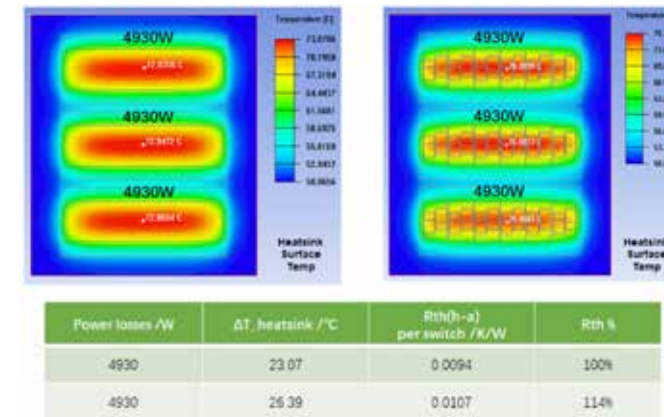


图 14: 加热块热源与多芯片热源对散热器热阻的影响

由上图 14 仿真结果可知，从加热块热源换成实际的多芯片热源，散热器热阻大约上升 14%，再结合之前加热块的热阻测试，实际模块对应的散热器热阻约为：

$$Rth(h-a)_{per\ switch} = 0.0087 * 114\% = 0.01\ K/W$$

将上述不同性能 (0.010K/W, 0.013K/W, 0.015K/W) 的散热器热阻，加载到英飞凌官网的 IPOSIM 仿真计算，可得到 IGBT5 在不同散热条件下的结温情况，如下图 15 所示：

Rth(h-a) switch/ K/W	FWD $\Delta T@T_{vjmax}$	Power Losses per module /W
0.015	$38^{\circ}C@153^{\circ}C$	4376
0.013	$38^{\circ}C@148^{\circ}C$	4313
0.010	$38^{\circ}C@140^{\circ}C$	4225

图 15: IGBT5 (FF1800R17IP5) 不同散热条件下机侧二极管的结温波动和模块损耗

很明显，高性能水冷板使得机侧 FWD 的结温降低了 $13^{\circ}C$ 。与此同时，如果保持 FWD 芯片的最高结温 T_{vjmax} 和结温波动 ΔT_{vj} 不变，则搭配高性能的散热器可将 IGBT5 的电流输出能力和功率密度进一步提升，如下图 16 所示：

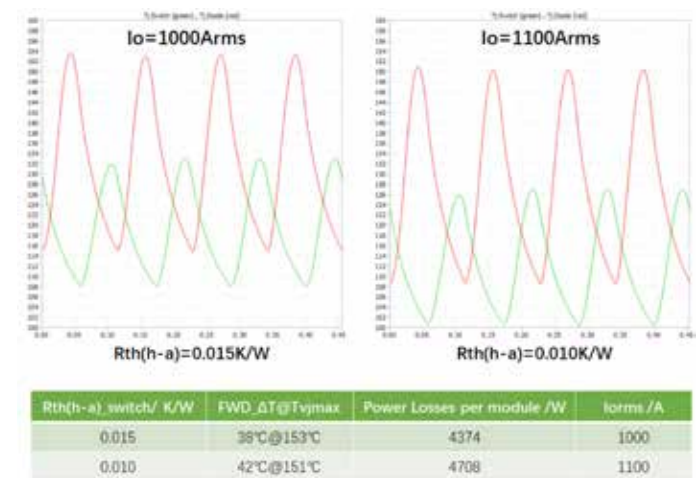


图 16: 高性能水冷板提升 IGBT5 (FF1800R17IP5) 电流输出能力和功率密度

因此，IGBT5 模块 (FF1800R17IP5) 结合高效的散热技术，在 FWD 结温接近的情况下，可增加电流输出能力 10% 左右，从而进一步提升 IGBT5 方案的功率密度。

四、文章总结

通过对 IGBT5 模块内部先进的 IGBT5 芯片技术和 .XT 封装技术的阐述，以及实际应用场景，与 IGBT4 的传统方案进行分析对比，说明了 IGBT5 模块在风电高可靠性和高功率密度的应用中的独特优势；同时结合高效的散热技术，还可进一步挖掘 IGBT5 方案的高功率密度潜力。

【参考文献】

- [1] 微信公众号：英飞凌工业半导体
- [2] Infineon FF1800R17IP5 Datasheet V3.4
- [3] Infineon FF1800R17IP5 Product Qualification Report
- [4] Wilhelm Rusche, Nicolas Heuck: Lifetime Analysis of PrimePACK™ Modules with IGBT5 and .XT, Bodo's Power Systems, July 2016
- [5] 赵振波, Wilhelm Rusche, Andre R. Stegner: 新一代封装 PrimePACK™ 3+ 提升 IGBT5 模块性能, 大功率变流技术, 2016
- [6] K. Guth (karsten.guth@infineon.com), N. Heuck, Ch. Stahlhut, A. Ciliox, N. Oeschler, L. Böwer, S. Tophinke, D. Bolowski, R. Speckels, Ch. Kersting, S. Krasel, G. Strotmann, End-of-life investigation on the .XT interconnect technology, PCIM Europe, 2015
- [7] Infineon IPOSIM Online Power Simulation Tool,
- [8] Infineon AN2019-05: "PC and TC Diagrams"
- [9] Infineon AN2010-02: "Use of Power Cycling Curves for IGBT4"