

兆瓦级光伏发电用功率调节器的全SiC模块

Full SiC Model of Power Controller for MW class PV Generating

邓隐北, 高昆, 陈伟
河南汇德电气有限公司

摘要:兆瓦级光伏发电用功率调节器的全SiC模块已经开发。该SiC模块的结构因采用了新的导线连接法(wire bonding), 无焊线设计, 与原来模块结构比较, 配线电感(wiring inductance)约减小80%。由此, 可大幅度降低损耗, 这对SiC器件的高速开关操作是有利的。而且, 根据功率循环试验, 与原来结构相比, 即使处于热负荷下也具有高的承受能力。应用这些技术的升压回路用全SiC斩波器(chopper)模块也已开发, 集成配置在兆瓦级光伏发电用功率调节器上, 已使变换效率达到了全世界最高水平98.8%。

关键词:兆瓦级光伏发电, 功率调节器, 全SiC模块, 低电感设计, 全SiC斩波器模块, 变换效率

中图分类号: TN86 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2016)08-4-137

1 前言

为实现低碳社会和充分利用可再生能源的节能化, 其必要性愈益提高。其中, 在我们生活必不可缺的电能有效利用方面, 电力变换技术越加重要。电力变换技术中起重要作用的是功率半导体, 近年来作为取代硅(Si)器件的新一代半导体, 碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)等宽禁带半导体已形成主流, 现正积极进行对使用这些半导体的研究开发。其中SiC器件从产业领域开始, 不断采用家电产品等周边的电力电子(PE)器件。今后, 对混合动力车(HEV)、电动汽车(EV)等的应用范围也将不断扩大、普及。

本文, 对配置SiC-MOSFET和SiC-SBD(肖特基势垒二极管)的全SiC模块技术, 以及在兆瓦级光伏发电用功率调节器(PCS)上的应用有关技术予以阐述。

2 全SiC模块的特点

2.1 模块结构

图1所示为新开发结构与原来结构之模块断面图。开发的全SiC模块与原来的Si-IGBT模块结构上有很大的差异。在新开发的结构中, 取代原来铝的连接线(bonding wire), 利用在功率基板上形成的铜销(插头)进行配线。由此, 即使流过大电流, 也可实现SiC器件的高密度实装。在配置芯片(Chip)的绝缘基板上, 取代原来的DCB(直接铜结合)

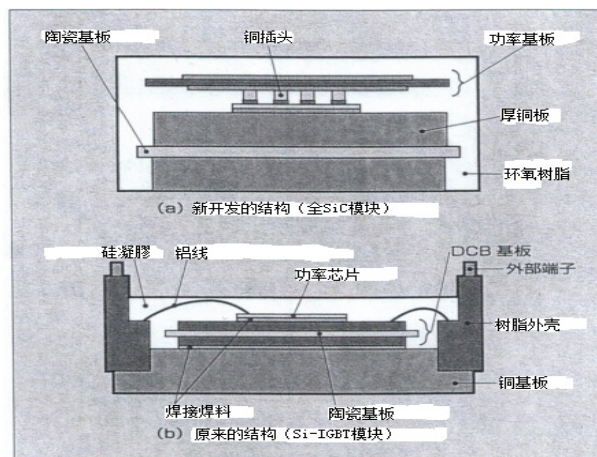


图1 UII与EE磁芯结构绕组窗口旁路磁势以及所链匝数理论分布图

基板, 采用厚铜板与氮化硅(Si_3N_4)的陶瓷基板结合, 力求达到低的热阻抗化。而且, 作为模块内部的密封材料, 取代原来的硅凝胶(gel)而采用环氧树脂, 以确保高温操作下的高可靠性。

图2所示为新型组件(package)的全SiC模块与原来组件Si-IGBT模块的外观照片。两种组件都是定额1200V/100A的模块。新型组件与原来组件相比, 底部印刷电路(foot print)尺寸约减小40%, 实现了小型化。

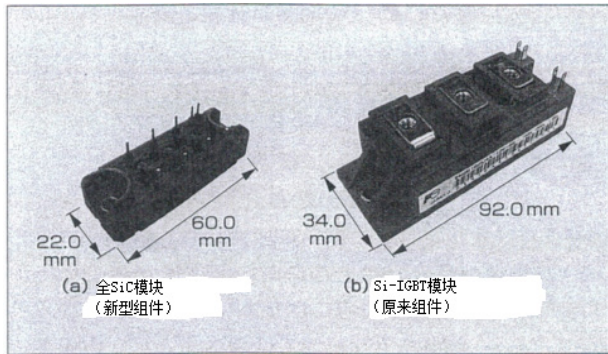


图2 模块的外观

2.2 低电感设计

(1) 对电感的评价

SiC-MOSFET与现在功率模块中使用的Si-IGBT比较,可实现高速开关操作。但是,一般情况下与开关速度成比例的浪涌电压(surge voltage)增加,为减小导致栅极(门电路)信号噪音的影响,力求模块内部配线的低电感化很重要。

图3所示为门电路(gate)配线与主配线的电感对比,这是以原来组件分别由模拟求得的门电路配线和主配线的内部电感作为1来进行比较的。首先,对于门电路配线的电感,已确认比原来组件约减少80%。此外,对主配线也进行同样的评价。新型组件中,分析与实测分别进行,均已确认比原来组件约减少80%。

新型组件中由于采用了功率基板及低热阻抗绝缘基板,使模块小型化,因而缩短了电流路径。上述这些结果(图3),显示电感的降低是很有利的。此外,由于功率基板与厚铜板并行配置,电流路径之间磁场的相互作用也会使电感减小。

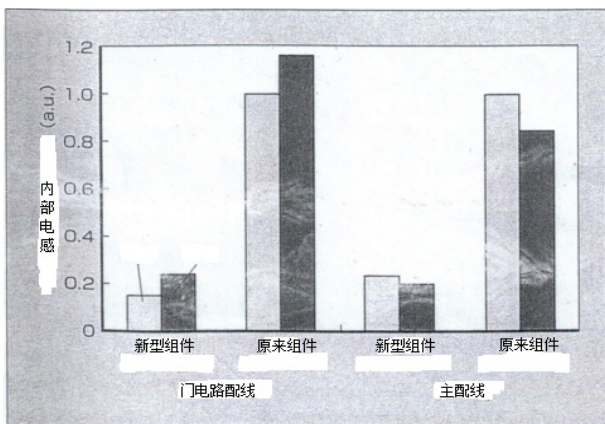


图3 门电路配线与主配线的电感

(2) 损耗的对比

为确认全SiC模块低电感化的效果,制作了将同一SiC器件配置在新型组件与原来组件上的模块,并进行了开关试验。如图4所示,新型组件比原来组件,开关损耗约降低50%。这是因为电感减少后的新型组件有效抑制其浪涌电压的结果。

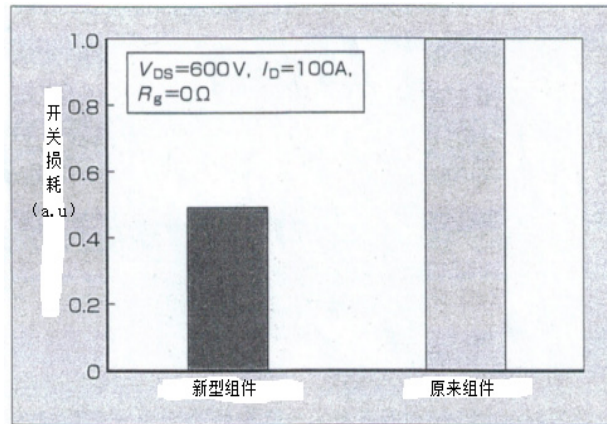


图4 SiC器件配置模块的开关损耗

图5所示为开关频率10~100kHz范围内的总损耗对比。总的损耗包括开关损耗和正常损耗,将原来组件中配置SiC-MOSFET时的10kHz总损耗作为1进行比较的。原来组件中,开关频率高,开关损耗的增加也大,100kHz的总损耗达到2.2(相对单位);另一方面,在新型组件中损耗的增加少,保持在1.2(相对单位)并因损耗的减小而引人注目。原来组件与新型组件的正常损耗几乎是相同的,且未见到与频率的依存关系。此外,无论在哪个频率下,原来组件中的开关损耗均为新型组件的4倍以上。以图可见到,频率越高,占总损耗的比例就越大。这样一来,对于模块内部电感减小的新型组件,SiC器件的高速开关是有利的,这点已得到确认。

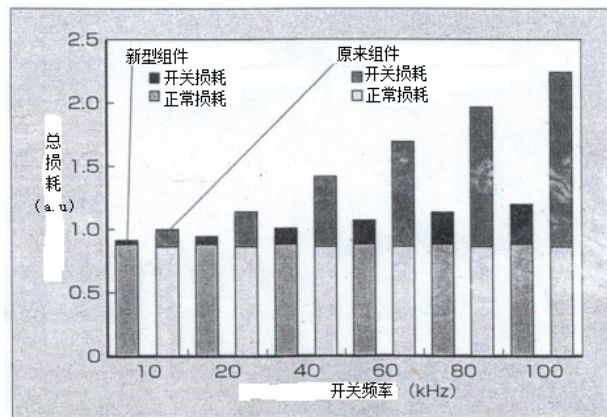


图5 总的损耗

2.3 高的可靠性

(1) T_j 功率周期试验

功率模块中，器件工作时由于温度上升产生热应力，导致芯片结合部等的破坏。 T_j 功率周期试验就是重复进行这一器件的操作，对功率模块的寿命做出评价的可靠性试验。

图 6 所示为 T_j 功率周期试验中的寿命比较。试验开始温度定为 25，横轴为温度振幅 T_j ，纵轴为累积故障率 1% [F(t)=1%] 的周期数，将此绘制成图。实线代表配置 Si 器件原来组件的功率周期寿命；标有 (O) 的线为配置 Si 器件的新型组件中已验证的寿命。由此结果可见，

$T_j=150$ 的试验条件下，新型组件具有原来组件 10 倍以上的寿命。

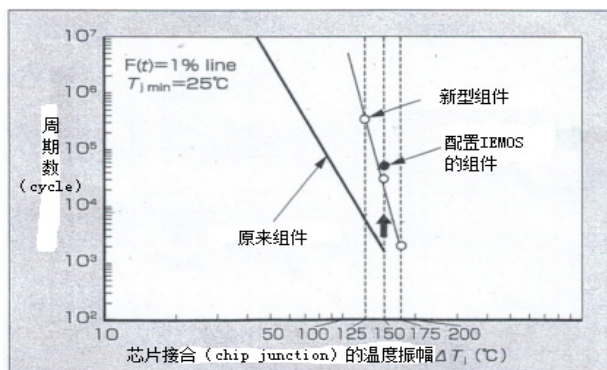


图6 T_j 功率周期试验的寿命

这次，还对与新型组件独立行政法人、产业技术综合研究所共同开发的 SiC—MOSFET—配置了 IEMOS (移植和外延金属氧化物半导体)，进行了 $T_j=150$ 的功率周期试验。其结果是，在 F(t)=1% 的条件下，对比 50000 周期配置 Si 器件的原来组件，已能确认提高寿命 20 倍以上 (图 6 中标示为黑圆点)。原来组件中，工作温度高，在芯片电极与连接线的结合部产生剥离、导致损坏，故寿命短。而另一方面，新型组件中是用高耐热的环氧树脂密封，在芯片电极与铜插头的结合部操作时产生的热应力得以缓和，因而抑制了这一结合部的损坏。此外，由于开发了玻璃转移温度 T_g 达到 200 以上的环氧树脂，在使用温度范围内，线膨胀系数、弹性率等机械性能均无大的变化，实现了高的可靠性。

(2) T_c 功率周期实验

为将模块向兆瓦级光伏发电用 PCS 上配置，必须进行适应其工作模式的可靠性试验。光伏发电用 PCS，当白天发

电时是连续运行的，到了夜间即停止。故此时，应对其加在模块上的热负荷进行验证。改变工作时的模块表面温度 T_c 的 T_c 功率周期试验很重要。

图 7 所示为原来组件结构中，实施 T_c 功率周期试验的样件 (sample) 超声波探伤图像。经过 20000 周期后，试验前未见到铜基板和 DCB 基板之间焊锡结合部中的损坏，由于热阻抗的上升引起了故障。但在新型组件中，因无铜基板结构，不存在原来组件中那样的故障，绝缘基板与芯片结合部的耐久性影响到 T_c 功率周期试验的寿命。因此，在试验开始温度 25 的 $T_c=80$ 条件下， T_c 功率周期试验中新型组件热阻抗的变化过程已得到确认 (图 8)。纵轴的热阻抗，显示出以各个抽样初期值为基准的变动情况。结果是：即使经过 25000 周期后热阻抗的变化一直局限于初期值的 7% 以内，未见到有较大增加的倾向。

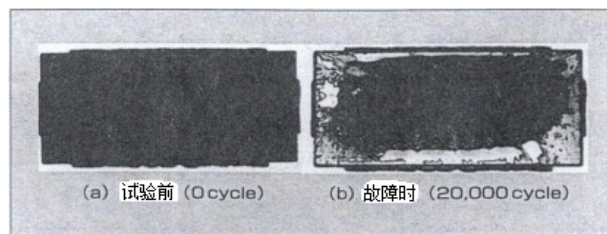


图7 原来组件结构 T_c 功率周期试验中的超声波探伤图像

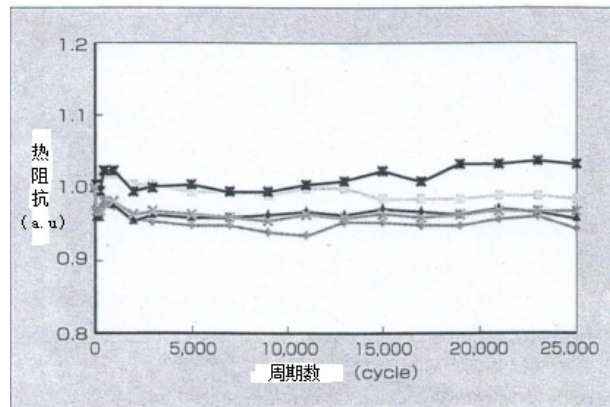


图8 新型组件 T_c 结构功率周期试验中的热阻抗变化过程

图 9 所示为 T_c 功率周期试验前后组件的芯片下面结合部的超声波探伤图像。与试验前对比，经 25000 周期后未见结合状态有何变化。而且，也未见到陶瓷基板的割裂和厚铜板的剥离。这就确认，新型组件应用到 PCS 中具有充分的耐久性。

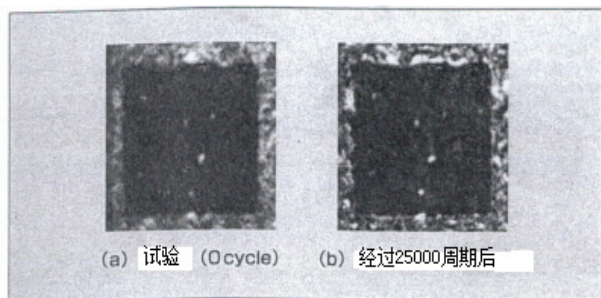


图9 功率周期中芯片下的焊锡结合部超声波探伤图像



图11 6吋(合152mm)的SiC晶片

3 在兆瓦级光伏发电用功率调节器(PCS)上的应用

以兆瓦级太阳能为首的光伏发电中,太阳能电池中发出的直流电压在PCS转换成交流电压再输送电。光伏发电中,随着日光照射量的减少和温度的上升,会产生电压下降,存在PCS变换效率下降的问题。作为解决方案,在PCS上配置一升压回路(斩波电路)。此法是在转换成交流电压的逆变器(inverter)部可提高输入的最小电压。随着输入最小电压的提升,交流电压输出也提高。由此,将SiC器件应用于升压回路,可抑制升压部所产生的损耗,有望提高包含逆变器部整个PCS的变换效率。此外,原来的Si器件中,升压部必须有与逆变器相同程度的体积,而使用SiC器件则能实现小型化,故采用如上所述新型组件的话,可充分发挥SiC器件的优势和特点,升压回路用全SiC斩波器模拟(图10),已经成功开发。

配置在全SiC斩波器模块上的SiC器件,有与独立行政法人、产业技术综合研究院共同开发的IEMOS和SiC-SBD,正在松本工场进行批量生产(图11)。图12所示为配

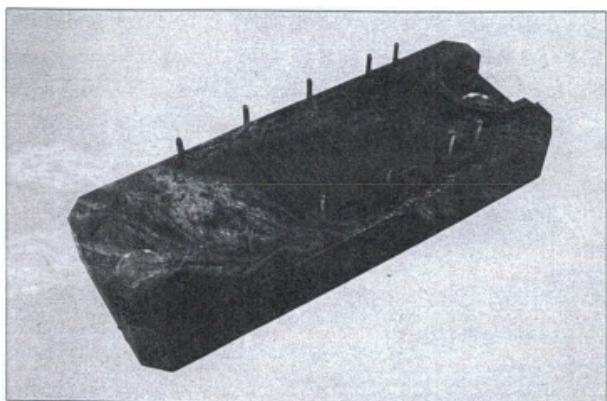


图10 全SiC斩波器模块

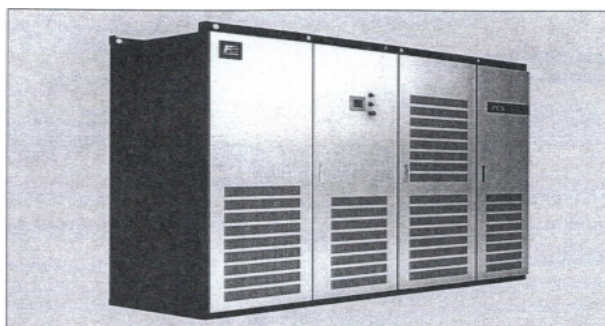


图12 兆瓦级光伏发电用功率调节器(PCS)

置这一全SiC斩波器模块的兆瓦级光伏发电用PCS的外观。外形尺寸为2980×900×1900(mm)。作为户内型,达到了世界最大级的输出容量1000KW。这次,将已开发的全SiC斩波器模块用于升压回路,能对曾成为课题的损耗增加进行抑制,使PCS的变换效率达到了世界最高水平98.8%(原来设备为98.5%)。而且,实现了电路的小型化,与原来的配电盘比较,缩小了20%。且有利于运输成本等施工时的成本削减。

4 结束语

针对兆瓦级光伏发电用PCS的全SiC斩波器模块已经开发。达到了Si器件难以实现的世界最高级98.8%的变换效率。与此同时,还实现了装置的小型化。

今后,将全SiC模块应用于各种各样的电力电子(PE)设备上,力图高效率的利用能源,降损节能,为实现低碳社会做出贡献。

原文出处:梨子田典弘,仲村秀世,岩本进,

メガソーラー用パワーコンディショナ向けAll-SiCモジュール

《富士电机技报》2014 VOL.87 NO.4 P244-247