采用SiC器件的高效率光伏发电用功率调节器的开发

邓隐北，孙培淦，王光红　编译

江西赣州诚正电机有限公司

摘　要： 本文阐述了高效率光伏发电用功率调节器的开发。新开发的10KW功率调节器（PCS），具备了「功率因数恒定控制」，「事故时继续运转的FRT（故障穿越）」，「输出控制」以及，「新型有源检测」等系统稳定化必要条件。并对各种功能进行了现场验证。不仅是系统异常时的自主适应系统，而且也是盐害地区应用的先进设计。

关键词： 功率调节器，光伏发电，功率因数恒定控制，故障穿越，输出控制，新型有源检测，效率

1　前言

从太阳能的光伏发电得到的新能源，可以转换成能卖电的电力，逆潮流输送至电力系统的光伏发电用功率调节器（power conditioners，以下简称 PCS），由于 2012 年开始的全额购买制度的影响，加上新能源的补贴政策（FIT）的实现，而不断的扩大普及。与此同时，各种各样的系统稳定化要件也都是必须的。例如 2013 年，为抑制因 PCS 的输出功率导致电压上升的「功率因数恒定控制」；2014 年，因系统送电线路事故使产生广范围瞬时电压的下降及频率的波动，作为一齐解列对策的、事故时继续运转的 FRT（Fault Ride Through，故障穿越）；2015 年，因大量普及的 PCS，作为向电力系统逆潮流抑制对策的「功率控制」部件；此外，对应于连接低压配电线路的三相 PCS，系统停止时 PCS 处于不从系统解列状态下，防止继续单独运转操作的「新型有源检测」部件；一方面对这些系统稳定化的要件都应予以重视，一方面对影响出售电量的 PCS 的转换效率，近年来希望进一步实现高效率化。

针对 PCS 的高效率化，对损耗要素的实测和由模拟分析的结果可见，约 6 成是由主电路变换元件导致的损耗。作为降低主电路造成损耗的方法，可列举出三电平逆变器那样的控制技术，以及 SiC、GaN 为代表的高效率器件技术。迄今，按照公司内进行的基础实验结果，新开发产品的目标效率比现行设备的效率提高了 3%。主电路变换元件由现行的硅（Si）元件变更为全 SiC 元件，对此进行了研讨。SiC 元件的特征是：比 Si 元件更低的导通阻抗，更

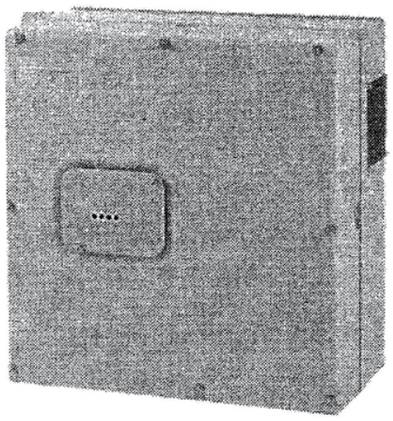

图 1　功率调节器（PCS）的外观

表1　PCS的产品规格

外　　观	外形尺寸	W550×D260×H550mm
	筐体结构	铝压铸件
	防护等级	IP56
输入规格	额定电压	400V
	最大电压	650V
	额定电流	25.9A
输出规格	相　　数	三相三线
	额定电压	202V
	额定电流	28.5A
	额定容量	10KVA
自立规格	自建容量	1.5KVA
	电气方式	单相二线式

高的开关速度及可能高温操作等。

本文中，采用以高效率化为目的的 SiC 器件，已开发 10KW 容量的 PCS，对 PCS 的有关情况予以介绍。图 1 为开发产品的外观。表 1 列出产品的规格。

2 采用 SiC 的优越性

本 PCS 主电路的变换元件，迄今由一般采用 Si 芯片的 IGBT 变更为 SiC 芯片的 FET（场效应晶体管）。以下，对有关采用 SiC 器件的研讨内容予以阐述。

2.1 高效率化和自冷结构

由于采用了 SiC 器件，主电路变换元件的开关损耗能减小，转换效率比原来得以改善。图 2 所示为原来机型与新机型效率的对比。在全部输出领域内达到了 3% 以上的效率提高。

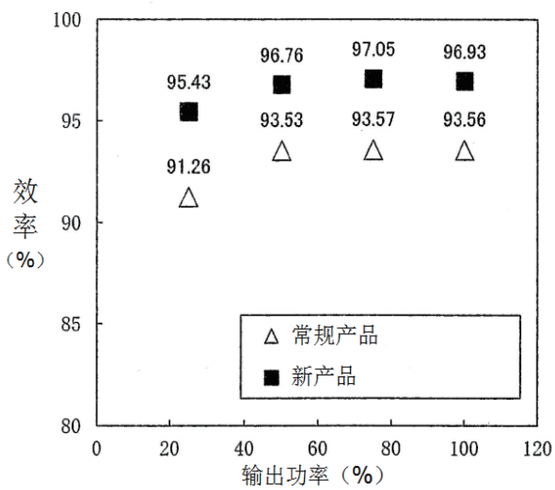

图 2 对应于输出功率的效率比较

因达到了高效率化，PCS 的发热减轻，故可取消迄今一直使用着的冷却风扇，实现了自冷结构（无风扇设计）。借助自冷结构，形成了免维护（maintenancefree）设计。此外，筐体由原来的板金结构改变成铝质压铸件，将发热体的主要变换元件及主电路电抗器直接连到筐体上，对这一筐体的空气冷却技术也同时进行了开发。通过筐体空冷技术，主电路变换元件能在密闭状态下冷却，故这一设计在原来机型迄今不能适应的盐害地区也能适应。加之本 PCS 取得了国际防护等级 IP56，耐环境性也得已提高。

表 2 列出了主电路构件的温度评价结果。由于铝压铸件筐体的空冷技术，即使在环境温度 40℃的夏季，主电路变换元件的温度也只有 121.0℃（额定为 175℃）；主电路二极管的温度只有 100℃（额定为 150℃）。确保在达到额定温度之前还有充分的余裕。作为自冷结构，也能确认：与风冷结构的原来机型具有同等的温度特性。

表2 温度评价结果

部　　件	温度（℃）	额定（℃）
主电路FET（接合部）	121.0	175
主电路二极管（接合部）	100.0	150
直流侧滤波电抗器	92.8	115
交流侧滤波电抗器	84.0	115

2.2 滤波器的小型化和静噪化

因采用 SiC 器件的优点，可列出由开关频率的高频化导致滤波器电路的小型化。图 3 所示为，PCS 额定工况下运转时的开关频率得到的效率测定结果。原来机型的开关频率为 10.3KHz，而新机型的开关频率达到了 40KHz，与原来机型比较，可提高 2% 以上的效率。假定开关频率变化到 30KHz，滤波器用电抗器的电感（inductance）值比旧机型，将减小到 1/3 左右，故机器的小型化是可能的。对于三相 PCS，滤波器的电感线圈交流直流结合，配置了三个，同时滤波器用的电容器也能减小，故由高频化的 PCS 能大幅度实现小型化。而且，开关频率提高以后，从电抗器产生的高频音可以减轻，达到了 PCS 的静音化。

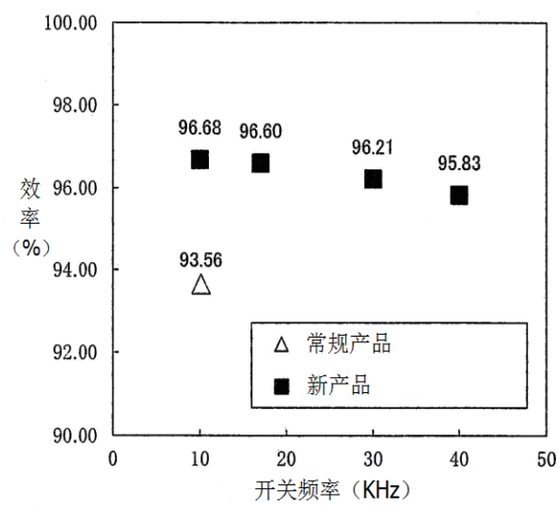

图 3 开关功率与效率的关系

2.3 浪涌（Surge）电压的抑制效果

原来的 Si-IGBT 中，电流从顺方向到逆方向切换的瞬间有过渡电流流过，这期间因过渡到逆偏压状态已产生损耗。另方面，SiC-MOSFET 是电传导中不使用少数载流子的多数载流子器件（单极性器件），故原理上不会产生少数载流子的积蓄。从而与 Si 器件比较，损耗可削减，起因于再生电流（recovery）的浪涌电压和噪音均能削减。本 PCS 中，由于采用了 SiC 器件，再生电流减少，由于配电线的优化电感也减小，原来必须保护主电路元件的缓冲电路（snubber）也可取消，实现了“无缓冲电路的设计”。

2.4 对盐害地区的适应

由于使用了 SiC 器件，效率得以改善，由于铝质压铸件筐体的空冷技术，可以有效的排热，故能取消冷却风扇。且因装置的密封，可提高适应环境的能力，即使设置在盐害地区也无妨。为对盐害地区的适应与否进行判断，实施了按 JIS（日本工业标准）规定的 PCS 盐水喷雾试验和 PCS 内部零件的中性盐水喷雾试验，并已确认：电气性能没有问题。此外，将 PCS 设置在实际的盐害地区，实施了现场检验，针对盐害现在也已得到毫无问题的结果。

3 系统稳定化的必要条件

以下，对配置在本 PCS 的系统稳定化必要条件的有关「功率因数恒定控制」、「事故时继续运转」、「输出控制」以及「新型有源检测」等重要技术予以介绍。

3.1 功率因数恒定控制

本 PCS 为了抑制因输出有功功率导致的系统电压上升，将功率因数可以设定在 1.00 ～ 0.80 的范围内。细分刻度能设定为 0.01，以 10KVA 为上限，通过有功功率和无功功率的调整来控制功率因数。由 PCS 内部的运算，应追随所示电流波形的正弦（SIN）波形，以此作为基准信号对电流进行控制。控制功率因数之际，对应于 SIN 波形注入与无功功率相应的余弦（COS）波形，将其加在一起，因而改变最终的电流指令值的相位。

3.2 事故时继续运转

由于系统送电线路事故导致广范围的瞬时电压下降、瞬时频率上升和大规模的电源掉落，相对于因系统分离造成的频率波动，本 PCS 能不停止而继续运转。在联网规程中，三相短路（剩余电压 20%、0%）以及二相短路（Y 结线：额定电压的 87% 及 24° 的相位变化；⊿结线：额定电压的 52% 及 41° 的相位变化），在这种情况下有 0.3 秒延续的瞬时电压下降，階梯状的 +0.8Hz（50Hz 系统）、+1.0Hz（60Hz 系统），对应于持续 3 个周期的频率变动以及斜面（ramp）状的 2Hz/ 秒的频率变动而继续运转，这是 PCS 附加的任务。

本 PCS 为电流控制，即使系统电压的剩余电压降到 0% 的场合，也保持电流波形，可继续运转。此外，剩余电压在 2% 以下的瞬时电压降低时，可保持即将电压降低之前的频率；系统电压刚回复后的 PCS 输出，可确保瞬时电压降低前的 80% 以上。图 4 所示为本 PCS 在三相短路时（剩余电压 0%）的试验结果。瞬时电压下降时选通脉冲不阻断（block），继续保持电流波形的运转，并确认刚恢复电以后的电流也满足规定值。

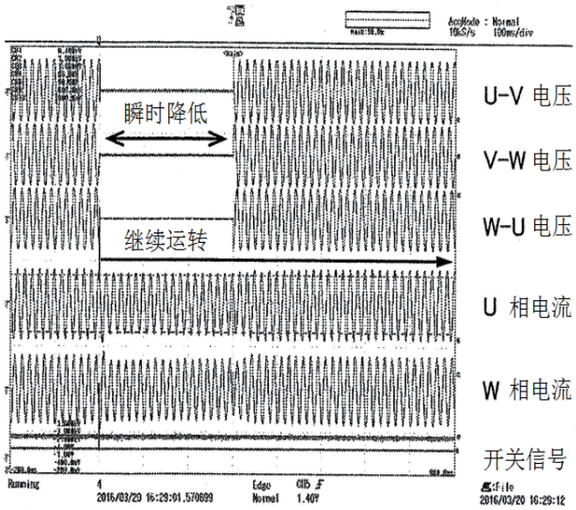

图 4 事故时继续运转的评价结果

3.3 输出控制

本 PCS 通过 RS485 通信接口，与专用的网络卡进行通信，由于控制交流输出的功率（有功功率），对应于输出控制的必要条件。输出控制值的刻度为 0 ～ 100%，输出变化时间 5 ～ 10 分钟的刻度为 1 分钟，在此情况下能接受信息。受信的输出控制值比光伏发电的功率小时，将太阳电池的电压从输出功率最大点开始慢慢上升，控制着交流输出功率。受信的输出控制值比光伏发电功率大的场合（阴天时等），输出控制不操作，继续 MPPT（最大功率点跟踪）的操作。

输出控制功能由电力公司的服务器（以下简称电力

server）分配的输出控制信息，经过互联网，再由网络卡（network card）接受信息，控制着 PCS 的输出。当网络卡不能确定与电力 server 的通信场合下，利用初次通信时取得的固定程序表（schedule）继续操作。经过固定程序表期间，在固定程序表终结时将 PCS 安全停止。再开启与电力 server 的通信，程序表信息能更新的场合下，PCS 再开启自动的运转。此外，没有互联网环境的系统场合下，由外部存储器设备等，将固定于网络卡的程序表保存。保存的固定程序表能够操作。

3.4 新型有源检测

本 PCS 中，借助注入相应于系统电压的频率偏差的无功功率，促进了频率的变化，对单独运转进行了检测。新型有源检测方式（检测方式名称：阶梯式附带频率反馈方式）可以高速检测单独运转。没有多余的操作，原理上也无对其它方式的干扰。而且，具有因有源信号对系统的影响小这一特点。PCS 的交流输出电流，可由对应于控制电路内部电流基准的频率偏差进行控制，因而注入无功功率。无功功率注入量的最大值是 PCS 额定输出的 0.25(相对单位)，此时的功率因数为 0.97（功率因数 =Cos[$\tan^{-1}$(0.25/1) =0.97]）。

PCS 与系统连接的场合，系统电压的频率因等于商用频率，故没有无功功率的注入，但系统停电形成单独运转状态下，由于单独运转的前后有微小的频率变化，为要注入无功功率，相应于无功功率的注入量，频率的变化大。因此无功功率注入量进一步增加，频率变化也不断增加，故可检测出单独运转。

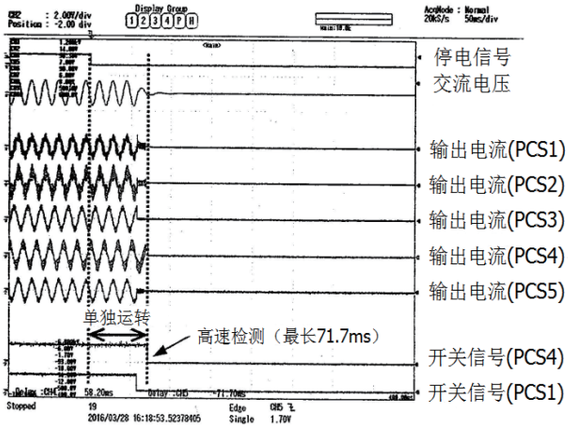

图 5 多台单独运转防止试验

频率偏差检测的整定值为 ±4.5Hz/ 秒，如果在同一方向连续超过这一整定值对单独运转进行判定，则 PCS 的选通脉冲阻断（gate block）并使联网中断。本功能的动作时间为 0.2 秒以下。即使在更多台 PCS 连接系统的场合下，也无必要使 PCS 之间的有源方式同步。此外，PCS 连接系统的场合下，由于负荷投入等产生频率变化，因频率的变化是一瞬间，不用担心有源方式的误操作。图 5 所示为多台连系时防止单独运转的试验结果。即使 5 台 PCS 连系时也实现了 0.1 秒以内的高速检测。

4 现场试验

图 6 所示为现场试验的概要。PCS 设置在图中太阳电池面板台架的里侧，配置在离海约 10m 远的盐害显著的地方。试验的目的是在实际现场进行盐害试验（耐环境试验）。有关盐害试验，所处现场装置内部均未发现腐蚀和生锈，外观及电气性能均已确认无问题。

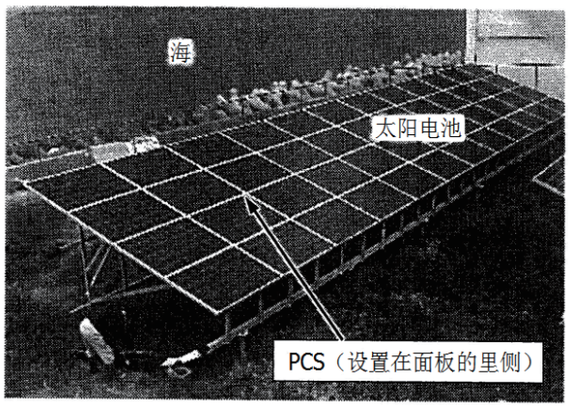

图 6 现场试验

5 结束语

这次新开发的 10KW 功率调节器（PCS）中，系统稳定化必要条件的「功率因数恒定控制」、「事故时继续运转」、「输出控制」以及「新型有源检测」等功能均已相应具备。不仅是系统异常时的自主适应系统，而且也是盐害地区可以应用的先进设计。由于进一步来用了 SiC 器件，达到了高效率化，并因高效率化导致发热减少，以及由于铝压铸件筐体的空冷技术实现了自冷结构。

近年来，热衷于清洁能源的社会环境时刻在变化着，

对 PCS 要求的规格也在变化着。为将竞争力高的产品投放市场，细致掌控好市场的需求，必须快速地适应这一发展趋势。为此，今后也应更多、更积极的进行研究、开发。

原文出处：林　　健　太　郎，SiC デバイスを用いた高効率な太陽光発電用パワーコンディショナの開発，《电气评论》2017 NO.3 P45-48

上接161页

DSP 引擎可以执行单周期 MAC 操作，具有最高 40 位分辨率、数据饱和、零开销循环和桶形移位功能，可支持快速控制环执行。这些器件包含专门为电源转换而设计的外设。诸如高速 PWM 发生器、ADC 和模拟比较器之类的外设可使用内部的可配置控制线路联系在一起，使这些外设直接交互，从而在智能电源或数字电源应用中获得极好的性能。

例如在数字纯正弦波不间断电源（UPS）设计应用：该设计使用单个 dsPIC33F“GS”数字电源 DSC 实现，用于对 UPS 应用采用数字电源技术，通过更加纯净的正弦波输出来降低噪音与电气噪声。此外，它还支持这些方面：通过软件进行简便修改、使用更小的磁性元件、构造效率更高的紧凑设计，以及低物料清单成本。该设计证实了智能电源转换减少了系统元件数，为磁性元件和电源元件提供了宝贵的电路板空间。

*dsPIC 开关式源（SMPS）和数字电源转换以及电机控制和电源转换系列及应用

整个大的闪存器件系列代码和引脚兼容，最高 70 MIPS 的 16 位 CPLU，采用提高编译器效率的架构内置 DSP 引擎，支持高速的高精度数字电源控制环，40 位累加器，高精度的高速内部振荡器，不需要外部晶振元件，全面的系统集成特性。

例如并网太阳能微型逆变器设计中的应用：该设计用于 SMPS dsPIC DSC 在并网太阳能微型逆变器系统中的灵活性和强大功能，其最大输出功率为 215W，并且可确保介于 20V 至 45V DC 之间的光伏（PV）面板电压实现最大功率点跟踪，通过实现新的带零电压开关（ZVS）的交错有源钳位反激拓扑来获得高效率。

例如在 720W 交流 / 直流设计中的应用：该设计可用于 dsPIC DSC 在开关电源（SMPS）中的灵活性，具有 94.1%的峰值效率，达到了 ENERGY　CSCI 白金级。它具有一个双相交错式功率因数校正升压转换器，并跟随一个带同步整流功能的双相交错式双开关正激转换器。

* 高级片上智能电源外设

16 位 dsPIC DSC 提供了专门针对高性能智能电源设计的片上外设：电源 PWM 模块（高速 PWM 模块），其最高 1 纳秒分辨率，高度可配置，支持所有通用拓扑；16 位定时器、输入捕捉、电路、输出比较器和 PWM 发生器的额外通道，其通信接口包括 LJART、SPI、12C、PMB 和 CAN。

4　后话

智能电源的创新是智能制造中一典例的研发课题。它是属于充分利用信息通讯技术和信息物理系统相结合的手段，对生产 / 价值链进行实时监控和大数据分析，从而将制造业向智能化转型。其最前沿的“工业 4．0”制造技术会与制造企业实战相结合，全方位展示“工业 4．0”给制造企业带来的收益和应用实例。