

# SiC功率半导体在电力设备上的应用

## Applications of SiC Power Semiconductors on Electrical Equipments

邓隐北, 王雷, 史谦东 编译

郑州天凯电气有限公司

中图分类号: TN6 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2016)02-5-127

### 1 前言

SiC 功率半导体元件已开始批量生产, 产品容易买得到。SiC 元件适用于变换器, 故对变换器的研究和开发, 近年来正积极展开。这点从很多采用 SiC 元件获得了高性能的报导中可以确认。一方面是与 Si 比较, SiC 的化学性稳定, 但制作元件的工艺过程比原来复杂, 元件的价位高。因此, 变换器中的 Si 元件只能与 SiC 元件个别置换, 若干的损耗降低和兑换, 可能导致大幅度的费用增加。很多情况下, 性能与费用应一起受到重视, 故这样的使用方式还不能说具有实用价值。

电力电子技术人员, 积极提出 SiC 元件的优越特性, 将补偿元件的费用增加部分外还有足够剩余这一有利点, 并充分予以发挥利用, 目标是指整个系统的建立, 现正热衷于对此进行技术开发, 具体的措施是: 削减冷却装置, 减少电路中的零部件数, 结果是实现小型化等。

SiC 元件对于负载设备和电源装置的实用性, 已从多个方面得到论证, 也已在逐步开始实用化。另一方面, 在连接到电力系统的电力设备中, 首先期待的是以高耐压元件为主的应用, 并推向实用化。故本文以电力设备为讨论热点, 对今后的开发在有关电力电子装置方面的研究事例予以介绍, 与此同时, 也考虑到 SiC 元件的应用效果。

### 2 适用于功率调节器 (Conditioner)

应用 SiC 元件的电力设备先行开发着的是家庭用光伏发电系统中的功率调节器, 为了将这设置在住宅内, 希望减小变换器的操作声音, 作为这一对策, 要将元件的开关频率提高到离可听区域以外的 20kHz 左右。在操作声音减小的场合下, 相应于频率的增加, 元件的开关损耗也增加。

原来使用 Si-IGBT (绝缘栅双极晶体管) 元件装置的变换效率约 96% 左右, 故需要大型的散热风扇。

作为适合高频操作的元件, 自 2011 年以来, 欧姆 (Rohm) 公司、三菱电机公司、富士电机公司等各个公司, 采用了 SiC-MOSFET (金属氧化膜半导体场效应晶体管) 和 SBD (肖特基势垒二极管)、耐压 1.2kV、额定电流 75~180A 的功率模块正在开发。MOSFET 和 SBD 都是单极性元件, 能大幅降低开关时的损耗。三菱电机公司将此应用到 5kW 的功率调节器, 提高了变换效率达到 98%。而富士电机公司则实现了额定功率 20kW 和 99% 的变换效率。如果降低损耗, 冷却风扇则能实现小型化。此外, 因为开关损耗小, 开关频率的进一步提高, 交流滤波器能减小, 将这些效果合并一起, 富士电机公司所试制的样机, 其体积比原来减小 1/4。而且, 冷却装置和无源元件的消减, 有利于制造成本的降低。即使 SiC 元件的价格高, 通过其他部件的消减, 整个装置的费用如能减少的话, 是可以考虑 SiC 元件的广泛利用的。

大规模光伏发电, 风力发电, 还有大容量电池电力储存装置, 当与系统联网时, 均需配备功率调节器。这些与家用光伏发电基本相同, 利用 SiC 元件旨在降低变换损耗和制造费用。但是, 这些的大多数, 其变换器容量从数百 kW 到数 MW, 现在可拿到手的 SiC-MOSFET 容量都不足, 需要很多的元件, 因此, 面向大容量的设备, 可考虑采用 Si-SBD 反并联组合的功率模块。Si-IGBT 的环流二极管, 采用 Si-Pin 二极管的场合 (图中的全 Si), 与采用 SiC-SBD 的场合 (图中的 SiC 混合式配对), 这二者损耗比较的结果如图 1 所示。如将二极管更换成 SiC-SBD 场合 (图中的标准驱动), 开关损耗可以降低, 且 Si-IGBT 的驱

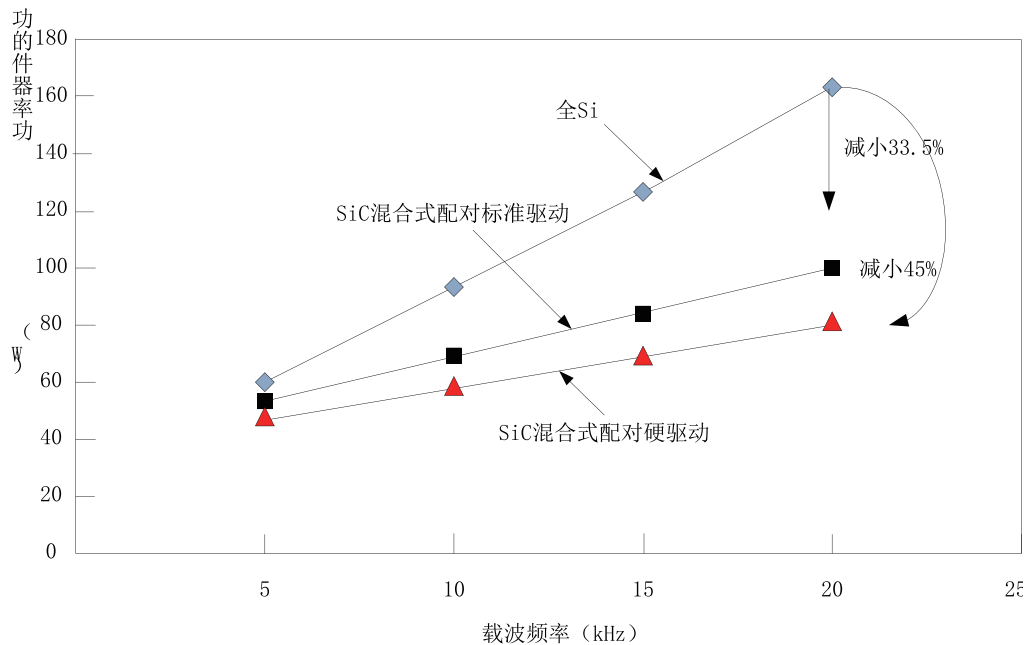


图1 Si-IGBT和SiC-SBD组合电路的功率损耗

动也最佳化（图中的硬驱动），损耗进一步的降低。这是因为SBD是单极性元件，不存在引起断开损耗的逆回复电流之故。

日立制作所开发了耐压3.3kV、额定电流1.2kA的功率模块；东芝公司和三菱电机公司开发了耐压1.7kV、额定电流1.2kA的功率模块。这些模块已经应用到铁道部门的电动机驱动装置上。这样一来，与原来的Si元件一起，仅效果高的部分采用SiC，由此，这也是一种旨在变换损

耗低和制造费用低两方面兼顾的可取之法。

### 3 适用于配电系统用STATCOM

配电系统用的STATCOM（静态无功功率补偿装置），旨在保持配电线路的电压在正确的范围之内，对SiC元件引用到STATCOM上进行了讨论。光伏发电系统集中于特定的配电线路，当连接配电线时，配电线上的电力存在反潮流的现象，此时，如图2(a)所示，在配电线的末端

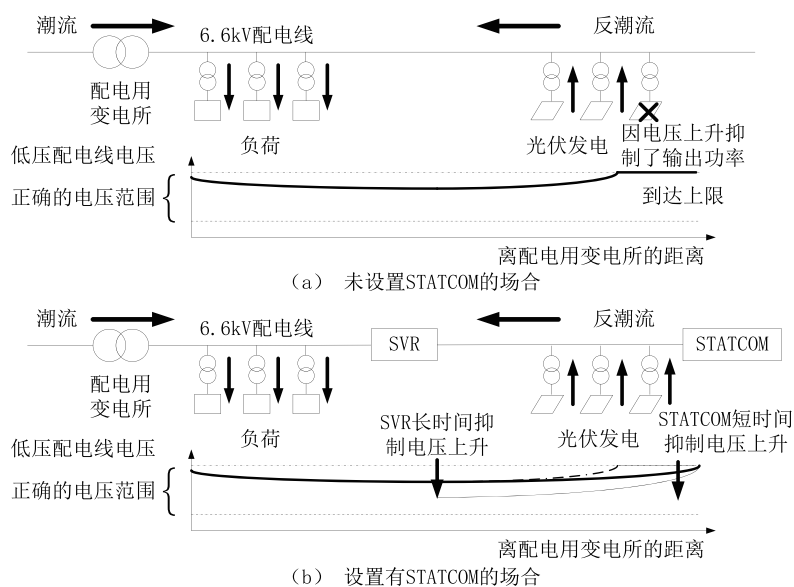


图2 配电系统用STATCOM的效果

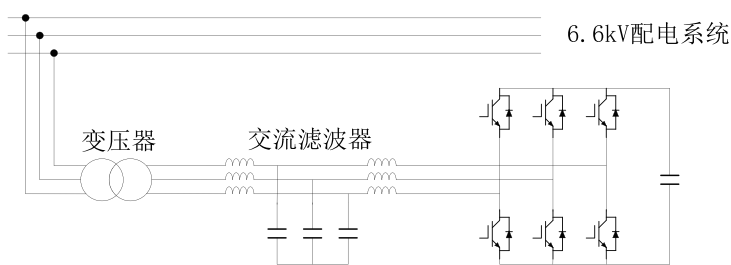
电压会升高。将超越基于日本电力规程的正确电压范围(101 ± 6V)。当检测到电压上升时,为保持正确的电压范围,必须抑制发电系统的输出功率,因而可能放弃了一些发电的时机。

作为对此采取的对策,是在配电路的中途设置 SVR (自动电压调节器),自动的将变压器的分接抽头进行切换,以防止超越正确的电压范围。但是,这无法适应快速的日照强度变化,相应于日照强度的变化须对分接抽头进行频繁切换,维护的频度(次数)也增加。因此,如图 2(b) 所示,在配电线末端设置 STATCOM,关于由日照变化引起较短周期的电压变化,我们考虑到由 STATCOM 提供给系统的无功功率来进行补偿。此时,因难于确保配电线周围设置新设备的用地,故期望能设置在柱上的小型 STATCOM。图 3(a) 为原来方式的 STATCOM 电路结构,通过变压器降压以后连接到变换器。变压器及交流滤波器

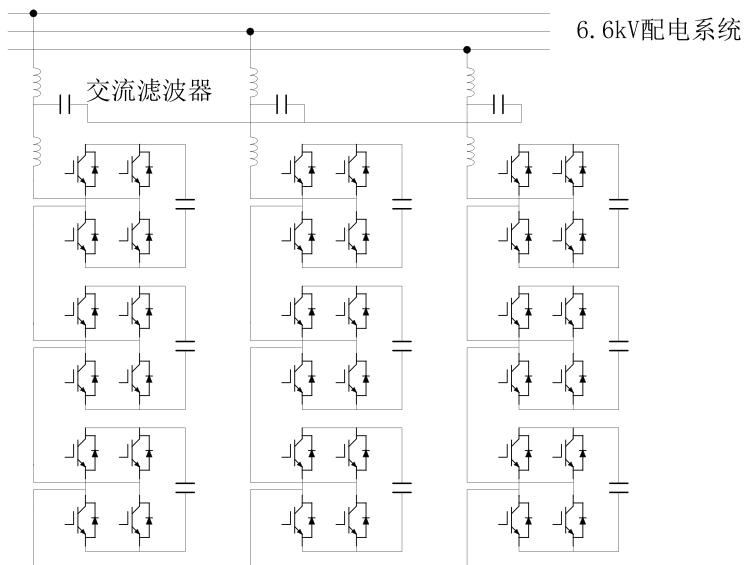
的重量和体积都大,如实现柱上设置的话,重量和体积均要减小。

这里,东芝公司和电力中央研究所共同热衷于开发了可以柱上设置的 STATCOM。图 3(b) 就是这次采用的 MMC (模块化多电平变换器, Modular-Multi-Level) 的电路结构,将逆变器模块多个串联连接,构成一个变换器。因多个模块的输出电压相加,故能获得高电压的输出功率,而无需变压器。此外,由于采用了 SiC 元件,实行了开关的高频率化,可使得交流滤波器小型化以及冷却装置的消减。至此,开发了下面 2 种型号的试制样品。

第一个是全 SiC 型,预计开发未来耐压 3.3kV 的 SiC 元件,整个模块内均采用 SiC-MOSFET 和 SiC-SBD,每一相为 3 段模块,设计容量为 100kVA。目前市面上尚未销售 3.3kV 的 SiC-MOSFET,故采用将电压按比例减小 (Scale Down) 到 1/3。耐压 1.2kV 的 SiC-JFET,容量 33.5kVA 的



(a) 原来方式 (2 电平变换器) 的电路结构



(b) MMC 方式的电路结构

图3 配电系统用STATCOM的电路结构

试制品,对此进行了制作和验证(图4)。各个模块在3.4kHz下进行开关操作,交流滤波器上施加20.4kHz的高次谐波电压,滤波器可以减小尺寸。因为SiC元件的损耗小,元件的冷却,仅使用自然的空气冷却就行。由此结果,对全部实体尺寸的装置,其试算的重量约为500Kg。

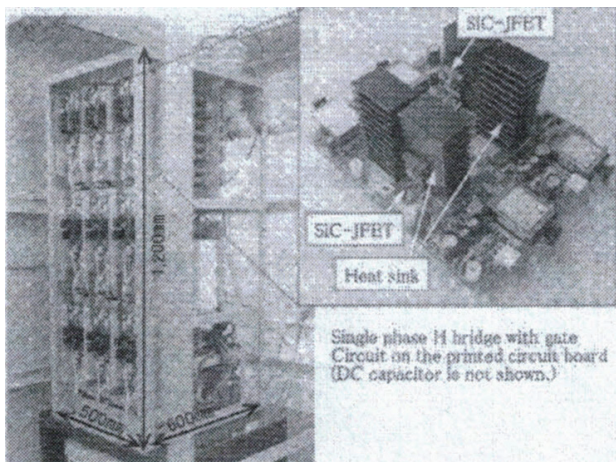


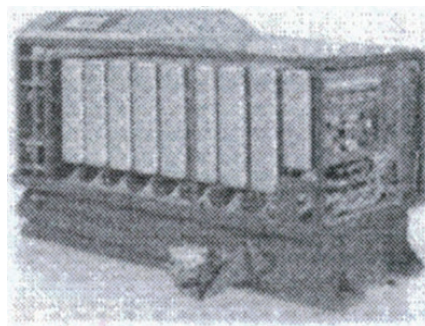
图4 全SiC型STATCOM试制品

第二个是SiC与Si的混合型,采用了批量化的耐压1.2kV SiC元件,迨至近几年这已成为可以制造的电路方式。每1相由4段模块构成,其中2段由耐压4.5kV的Si-IGBT元件构成,剩余2段由耐压1.2kV的SiC-JFET元件构成。SiC元件的模块与电源电压同步,1周期仅开关1次,输出高压的方波形,因输出频率低,为50Hz或60Hz,即使对Si元件,产生的损耗也降低。另一方面,SiC元件的模块,借助4.7kHz的脉宽调制(PWM),对波形进行整形,在整个变压器中,能组合成高次谐波降低的电压波形。这样,我们制作了与交流6.6kV联网,容量100kVA的全部实尺寸规格的试制产品,并实施了工作验证。

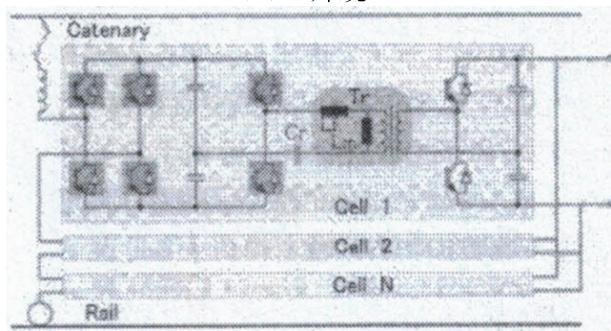
#### 4 适用于半导体变压器

变压器是电力设备中重量最大的主要部件之一,旨在变压器的轻量化和小型化,利用电力电子装置实现升压/降压的功能,现正着手研究半导体的变压器。例如,装载移动物体的场合,需要频繁移动设置的场合,在有限空间内必须设置机器的室内变电设备及地下配电等场合下,期望变压器能小型化、轻量化。才考虑到应用的可能性。但是,目前的半导体变压器,变换效率及价格的优越性并未显示出来,还不能用来更换一般变电所及柱上变压器中使用的定置用变压器。

目的是进行技术评价,ABB公司试制了电力机车用的半导体变压器(图5)。这台变压器接收的电源为15KV,16.7kHz的单相交流,电动机驱动用的三相逆变器(inverter)(图中未绘出),图5(b)所示为供给直流电流的变换器电路结构,包含1台备用变换器,共9台绝缘型变换器,采取一次侧为串联连接、二次侧为并联连接的结构。各个绝缘型变换器,将输入功率转换成1.75kHz的交流,由高频变压器进行降压,其后整流成1.5KV的直流而输出。试制样品由耐压6.5KV及3.3KV的Si-IGBT组成,连续额定功率1.2MW,短时间输出功率1.8MW。试制样品的重量4500Kg,变换效率为88~90%。由Si-IGBT构成的场合,在不超过与原有变压器相同重量的情况下,要求进一步显示优越性的轻量化。



(a) 外观



(b) 电路结构

图5 电力机车用的半导体变压器

半导体变压器由于采用了SiC元件,使其更加小型化和轻量化。同时也有改善变换效率的研究事例。美国DARPA(国防高等研究计划局)的设计项目中,制作了耐压10KV、额定电流120A的SiC-MOSFET模块,计划用于船舶上的电源,制作了容量1MVA、输入/输出电压为13.8KV/270V的半导体变压器(图6)。SiC-MOSFET在高电压下进行高频率变换,用于变压器一次侧的逆变器部分。与已有的商用变压器(60Hz)比较,重量减少到75%,体积缩减50%,变换效率

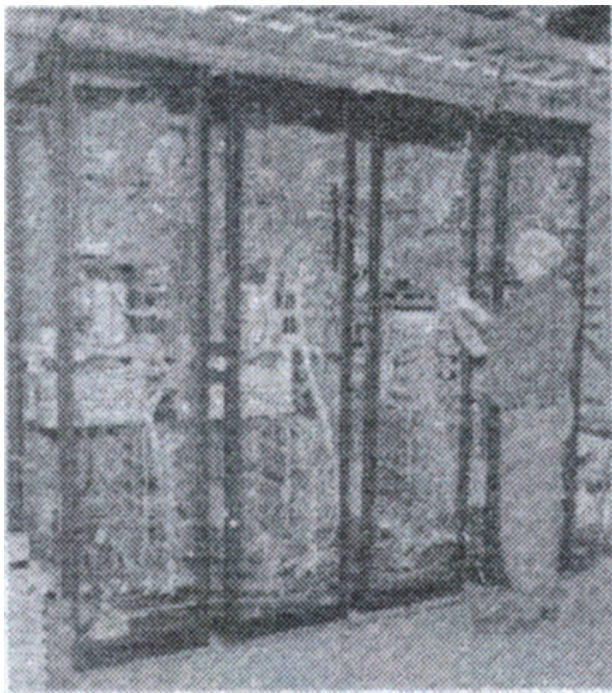


图6 采用 SiC 元件的半导体变压器

可提高到 97%。而且, 无论在美国的产学研联合工程项目 FREEDM 中, 也可预见到耐压 15KV 的 SiC-IGBT 的实用化, 现正进行着 1MVA 级半导体变压器的开发。

### 5 在基于系统用交直流变换装置上的应用

用于远距离送电的直流输电和控制交流系统间电力潮流的直流连接装置, 以及在不同频率的交流系统间使电

力畅通无阻的变频装置中, 均可使用超过数百 MVA 的大容量交直流变换装置。现在, 这些交直流变换装置, 多数是使用晶闸管的它励式变换器, 近年来也从国外引进了使用 IGBT 等的自励式变换器。在无功率的控制和高次谐波的降低等方面, 自励式变换器具有它励式变换器所没有的很多特点。另一方面, 它励式变换器的变换效率高达 99% 左右, 自励式变换器中, 效率也高达 97 ~ 98% 左右。在这样的大容量设备中, 损耗部分的电力成本是很大的, 是导致运转费用增加的重要因素。此外, 它励式变换器中使用的晶闸管元件(耐压 8KV, 额定电流 3.5KA)正在开发。元件的串联连接也能较易的实现。

为此, 在大容量化方面它励式的已先行一步。以上所述它励式变换器, 在变换效率和容量方面具有优越性。在没有利用系统制约等课题的情况下, 基于系统用的交直流变换装置多数仍采用它励式变换器。

近年来, 作为自励变换器的新方式, 图 7 所示的 MMC (模块化多电平变换器) 已推向实用化。在 MMC 中, 因能以模块单位进行串联连接, 适用于大容量化, 开关次数少, 开关损耗也降低。因此, 具有接近它励式变换器的变换效率, 加上可实现大容量化的条件。由 IGBT 构成的设备在国外已经实用化了。

对于采用这一 MMC 的交直流变换器, 假定使用 SiC-JFET 元件时, 试算过变换器主电路的效率为 99.8%。由此,

下转 136 页

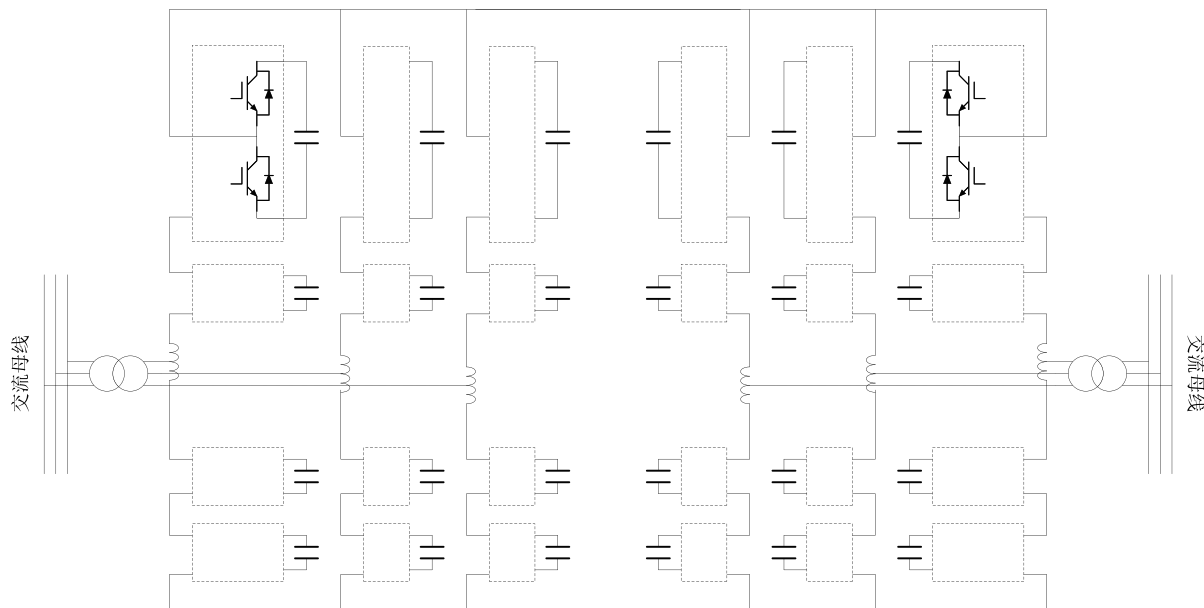


图7 由 MMC 组成的直流连接