

极限温度下的电力电子技术

徐殿国 李向荣

(哈尔滨工业大学电气工程系 哈尔滨 150001)

摘要 对近年来电力电子学在各个领域中的深入应用所涌现出的各种新技术进行了综述,其中包括高温环境下的新型碳化硅电力电子器件、各种器件的冷却散热技术、模块化功率电路和热电模块,以及低温环境下的电力电子技术、高温超导体技术等。指出了未来电力电子技术在极限温度下的一些发展趋势。

关键词: 电力电子技术 极限温度 碳化硅 冷却技术 低温电力电子 高温超导体

中图分类号: TN60

Power Electronics in Extreme Temperature Applications

Xu Dianguo Li Xiangrong

(Harbin Institute of Technology Harbin 150001 China)

Abstract New technologies mushroomed in various new applications of power electronics are introduced, including high temperature applications such as SiC devices, various cooling methods, power module and thermoelectric modular (TEM), as well as low temperature utilities such as cryogenic power circuit, high temperature superconductor (HTS). The future trend of power electronics in extreme temperature environment is also pointed out.

Keywords: Power electronics, extreme temperature, SiC, cooling methods, cryogenic power electronics, HTS

1 引言

1957 年,美国通用电气公司在晶体三极管三端、三层半导体结构的基础上发明了晶体闸流管,标志着电力电子技术的诞生^[1]。这项技术的诞生和发展使人类对电能的利用方式发生了革命性的转变,并且极大地改变了人们利用电能的观念。在世界范围内,用电总量中经过电力电子装置变换和调节的比例已经成为衡量用电水平的重要指标,目前,全球范围内该指标的平均数为 40%,而到 2010 年将达到 80%^[2]。这就对电力电子技术提出了新的挑战。

电力电子技术的应用范围十分广泛。它不仅用于一般工业,也广泛应用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等,在照明、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用。近年来,随着大功率电力电子装置的容量不断提升,器件的发热问题就凸现出来了。在某些温度超出室

温 200~600K 的应用环境下,如各种飞行器电路、汽车电子、地下钻井勘探和核反应堆等,电力电子开关器件和其他无源器件的散热条件开始恶化,轻则导致系统的整体效率降低、性能变差;重则有可能损坏器件,使整个系统瘫痪。此时就必须针对高温工作环境,从器件、电路结构和控制方法三个部分进行改进和优化,以适应这些恶劣的工作环境。另一方面,随着人们对物质世界探索的不断深入,新的工作环境也不断出现。在高海拔、高纬度地区,以及外太空的探索和考察中,环境温度往往比室温要低 100~200K,而电力电子装置在这些低温条件下,其性能也会发生不同的变化。人们对未知世界的渴望促使着科学考察不断深入,为了配合这一趋势,低温电力电子技术的发展也必须更加深入。

本文主要介绍电力电子技术在极端温度下应用的一些技术发展和最新动态。由于电力电子涉及的范围太广泛,在此仅对研究比较深入并已经有了很

多技术突破的领域进行阐述，包括：高温应用中的碳化硅器件、新型冷却和散热技术、高温无源器件和集成化电路，以及低温电力电子技术和高温超导技术。

2 高低温下的功率电路器件

目前绝大多数的电力电子设备工作在 $0\sim100^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内（考虑设备本身的发热），所有的电路元件以及电路的结构、控制方法等都是以这一工作范围为基础的。然而，在工作温度过高或者过低的时候，各个元件的特性都会发生不同程度的变化，这样一来，整个电路的性能也会随之变化。因此，在讨论各种新技术之前，有必要对电力电子电路中的各种器件在高低温环境下的不同表现予以说明。

首先，电力电子中标志性的而且是最重要的器件就是各种开关器件，而这些器件的性能也是受温度影响最严重的。现在高频电力电子电路中常用的 MOSFET 就是一种正温度系数器件^[3]，这意味着当器件温度增加时，其通态电阻要相应增加，同时高温会导致低电流。这一点在需要 MOSFET 并联工作时很重要，因为通过器件间良好的热通道，正温度系数可减少较热器件中的电流，并迫使电流更多地流向温度较低的器件，从而避免出现热失控。实际的 MOSFET 可以看成是由数千个微型功率 FET 单元并联工作的，由上述理论，并联单元阵列能保证器件可靠工作。但是如果 MOSFET 具有负温度系数，则目前的并联单元结构将引起严重的可靠性问题，实际上这种可能性是存在的。下图是 IR 公司生产的 IRFP450 的跨导曲线。

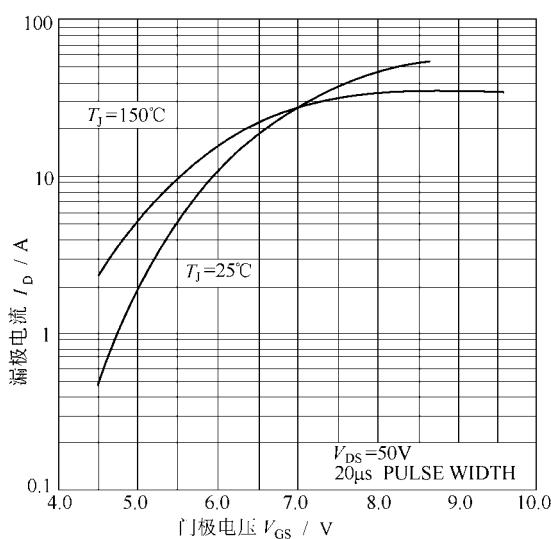


图 1 IRFP450 跨导曲线

Fig.1 The I_D vs. V_{GS} characteristics of IRFP450

从图 1 中看出，不同温度下的跨导曲线有一个交点，当栅源电压低于这个交点电压值时，温度系数为负；而当大于交点电压时，温度系数为正。这样当 MOSFET 工作在饱和区的时候就有可能处于负温度系数的范围。然而在电力电子电路中，MOSFET 多工作于开关状态，开关导通时的栅源电压一般都大于跨导曲线中的交点电压，因此通态电阻具有正温度系数，这样就能自动避免出现温度失控。一般来说，功率 MOSFET 不会出现二次击穿问题，这是它的一大优点，但在实际使用中，仍应注意留适当的裕量。

电力电子装置中最重要的无源器件当属电感、变压器等磁性元件。在传统的应用中，铁磁元件由于体积和重量大，运行时会发热，因此成为整个电路设计中的瓶颈。在高温和大容量应用情况下，随着散热条件的恶化、电感绕线中电流的增大，由电感和变压器所产生的热量就会非常大。当铁磁材料的温度升到一定程度时，铁磁材料会转化为弱磁性物质，开始转化的温度称为居里点。根据磁畴理论，当温度升高并超过居里点时，铁磁材料中的磁畴结构由于热运动而被破坏，以致完全瓦解，这时的铁磁物质转化为磁导率接近 1 的弱磁质，并保持不变。因此磁性元件的设计制造就显得更为重要，没有体积小、重量轻、耐高温的铁磁元件，新型开关器件的作用就不能完全发挥出来。目前广泛使用的磁性元件，工作温度一般都不超过 105°C ，最高也只有 150°C 。为了提高这一温度指标，世界各国都作了很多研究：美国航空航天局 Lewis 研究中心研究成功了工作温度 200°C 的逆变器；美国空军研究所也研制出了 1.5kW ， $270\sim280\text{V}$ 正激变换器中的变压器，它可以在大于 290°C 的环境中运行 600h 。这种变压器的铁心采用居里温度 310°C 以上的锰锌材料，并经过反复仿真和实验确定了匝数比、工作占空比等参数和绝缘层材料、绕线材料。这种变压器目前已经投入市场。

电容器是一种电力电子装置中常用的无源器件。在各种影响因素中，温度对电容性能的影响最大。而在不同种类的电容中，采用电解液作为阴极材质的电容，如铝电解液电容，受温度影响最为明显^[4,5]。因为在不同种类的阴极，如电解液、二氧化锰、固体聚合物导体中，只有电解液采用离子导电方式，而其余几种均采用电子导电方式。对于离子导电而言，温度越高，其离子活动性越强，电离程度也越强。然而温度过低的话，离子的活性将变差，

电离程度会变弱，而且对于某些水性电解液，在温度低于 0℃ 时，其中的电解液还有凝结的可能。因此，在温度不超过额定限度的前提下，电解液电容在高温状态下的性能要比低温状态下好。但是应该注意，即使是质量比较好的电容，如果长期工作在高温下，超出了电容的额定温度范围，同样会导致电解液体积增大，甚至使电解质受热分解，失去导电作用。对于水性的电解液，还会产生气泡，最终会爆开电解电容的保护阀，造成器件的损坏。相比之下，钽电解电容由于使用金属钽做介质，不需要使用电解液，很适合在高温下工作，而且具有寿命长、准确度高、滤高频载波性能好等特点。但是这种电容的容量较小、耐压值较低，价格昂贵，而且等效串联电阻 ESR 较大，有时需要并联工作以降低损耗。

功率电路中应用最多的器件当属各种电阻器。电阻本身就是一种电-热转换器件，在工作时，消耗的电能转换为热能。这些热能的一部分通过周围的介质向环境传递，另一部分则使电阻器本身的温度升高，直到传递到环境的热功率与其消耗的电功率相等时，电阻体的温度才会保持不变。一般固定电阻和可调电阻给出的阻值适用于 20℃ 的温度。当温度变化时，阻值也会变化。对于金属膜电阻，阻值随温度的升高而略有增大，而炭膜电阻的阻值则随温度的升高而减小。由于功率电阻通常都是在高温下工作的，其封装应该能够适应很宽的温度变化范围。

总之，对于极限温度下工作的电力器件，往往在某个工作点能够稳定工作并不代表在其他所有工作点都能保持同等的稳定性。在各种极限的工作温度下，对电子装置的要求往往比目前的军品还要严格，因此必须全面考虑电路结构的设计和器件的选择。

3 SiC 器件及其应用

近年来，以硅器件为基础的电力电子技术已经发展得相当成熟，对于器件的研究重点在于降低通态和开关损耗，提高工作频率并且提高器件的集成度。然而，目前硅器件的结构设计和工艺已经相当完善而接近其由材料特性决定的理论极限，特别是在高温应用领域其发展潜力已经十分有限。

在这种情况下，SiC 电力电子器件应运而生^[6]。由于碳和硅之间的共价键比硅原子之间的要强，因此 SiC 器件的击穿电场强度是硅器件的 10 倍，导热

性是其 3 倍，这些使得 SiC 器件具有更高的性能^[7]。高的击穿场强可以使 SiC 电力器件的掺杂区更薄，掺杂浓度更大，降低了通态电阻。这样就可以极大地减小通态和开关损耗，同时可以提高器件的工作频率。良好的导热性可以使 SiC 器件在固定的结温下得到较高的开关容量。另外，由于 SiC 器件属于宽禁带材料，其最高工作温度有可能超过 600℃。所有这些特性都决定了 SiC 器件能够胜任现代电力电子技术的各种应用，尤其是在高温场合其优越性就更明显了。电力电子器件的发展过程中，功率频率乘积这个指标可以很好的反映器件水平的进展和状态，如图 2 所示。可以看出 SiC 器件在这一指标上要明显优于传统的器件。以下将分别介绍 SiC 器件以及这些器件的各种应用。

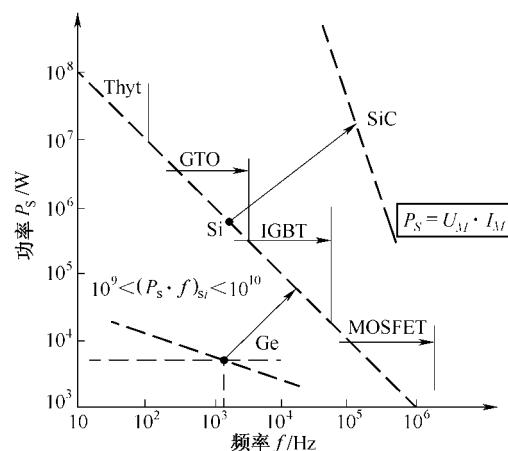


图 2 功率半导体器件的频率功率乘积^[8]

Fig.2 The power frequency product of the semiconductor power device^[8]

SiC 材料在很多种类的电力电子器件中都有应用，按器件种类可分为三类^[9]：①SiC 肖特基二极管是目前技术比较成熟的 SiC 电力电子器件，其结构如图 3 所示。它在关断时几乎没有反向恢复电流，在 300~3000V、开关频率高于 50kHz 的应用场合格外有吸引力。市场上已经有 600V/6A 等级的产品供应。②SiCMOSFET 在结构上和传统的硅器件区别不大，但是由于 SiC 半导体的击穿场强很高，2000 年采用 4H-SiC 已经实现阻断电压 2000V 以上，最高可达 7000V 的报道，并且其通态阻抗比硅器件低 250 倍。③此外 SiC 还可以制成阻断电压很高的双极器件，如高压 pin 二极管和晶闸管等。最近对 SiC 晶闸管的研发活动开始向 GTO 集中，2000 年已经有阻断电压 3100V，50℃ 时关断增益仍高达 41 的 4H-SiC GTO 的报道。

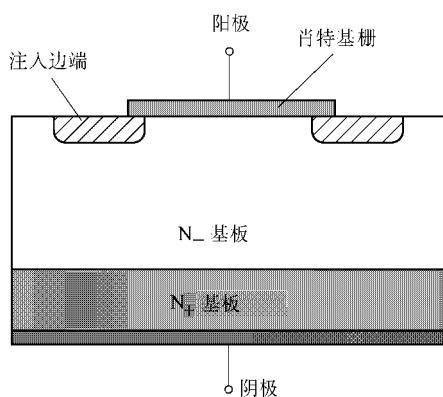


图 3 碳化硅肖特基二极管结构示意图

Fig.3 The structure of SiC Schottky diode

由于 SiC 器件在击穿电压、通态电阻、开关频率和器件容量等多方面均优于目前传统的硅器件，在制造技术进一步完善和成本进一步降低的基础上，SiC 器件完全可以取代目前所有的硅器件，并且有望在航空航天、高温辐射环境、石油勘探、自动化、雷达与通信、汽车电子化等方面发挥重要作用。就航空航天来说，高性能军事飞行装备、喷气式飞机、民用飞机都需要能够承受高温工作的传感器、电子控制器、电力电子器件，以提高飞行器的可靠性，消除冷却装置，减轻重量。下一代涡轮控制系统要采用在 350℃ 高温下工作的电子装备，另外，高温电力电子器件也是民用飞机所急需的。高温辐射环境包括核反应堆、制备氟系统装置、核废物存储装置等这些环境温度常常高达几百度，并受到 γ 射线和中子辐照，这些都需要耐高温、耐辐射的电子系统。此外，大功率相控阵雷达主要受热耗散的限制，SiC 功率器件有望能解决这一难题。

可以看出，新型的 SiC 器件具有耐高温、大容量、低损耗、高频率等突出特点，应用前景非常广泛，但是目前还有许多问题亟待解决，特别是器件可靠性问题，要走入市场，实现实用化，预计还要有一段时间。

4 新型冷却和散热技术

随着电力电子元器件容量不断增加、频率不断提高，器件发热的问题就凸现出来了。特别是在一些高温的应用场合，如果没有适当的散热措施，就可能使器件的温度超过所允许的最高结温，从而导致器件性能的恶化以致损坏。所以在电路设计中，选择适当的冷却和散热方式并合理地进行设计是使器件的潜力得到充分发挥，提高电路可靠性不可缺

少的重要环节之一。电力电子器件散热设计的基本任务是根据传热学原理，为器件设计一个热阻尽可能低的热流通路，使器件发出的热量尽快地散发出去，从而保证器件运行时，其内部的结温始终保持在允许的温度范围之内。以下将按照设备结构设计和冷却介质的不同介绍几种常用的散热技术。

长期以来，利用空气冷却是最简便易行的方法，应用非常广泛^[10]。从冷却形式上，可以将空气冷却分为自冷式和强迫风冷两种。自冷式即为传统的加装散热器方式，虽然散热的效率很低，但是它具有结构简单、无噪声、维护方便，特别是没有旋转部件，可靠性高，适用于额定电流 20A 以下的器件或简单装置中的大电流器件。与之相反，强迫冷却方式主要是指配备风机的散热装置，可以胜任额定电流 50~500A 的大容量场合，但是噪声大、可靠性低、维护困难阻碍了这种方法的发展。

对于上述的空气冷却方式，增加翅片散热的表面积，加大风量可降低对流热阻和空气温升热阻。然而此举与降低传导热阻正好矛盾。因此传统散热器是在有限的传导热阻之中取尽可能大的散热面积。而使用热管可以解决这一矛盾^[11]。热管是一个密闭封焊的蒸发冷却器件，由密封管、吸液芯和蒸气通道组成，利用充在其中的工作液体的循环作用将热量传导并散发。热管诞生于 1963 年，并迅速应用于人造卫星上，但是由于成本太高，始终不能广泛使用。当前，随着电力电子装置高频化、小型化的趋势以及热管散热器的价格降低，将热管散热器用于功率电路的前景非常广阔。

如果在高温下应用电力电子装置，那么传统的散热方式就不能满足越来越严格的散热要求。因此，针对大容量、高工作温度的应用场合，提出了液态冷却^[12]。根据实验，与气体冷却和油冷却相比，液态冷却可将导热系数提高 2 个数量级（见表 1），一直被公认为处理变流器大功率损耗的有效方法。法国科学家在对航空电子设备的强迫风冷、热管冷却和液体冷却进行分析后指出，对于功率密度大（ 600W/cm^2 ）的电力电子装置而言，液体冷却是最好的选择。液体冷却系统是利用循环泵来保证冷却液在热源和冷源之间循环交换热量。这一系统通常由冷却液循环泵、液-气热交换器、膨胀箱和散热器组成。20 年来国内外的运行经验表明，这种装置的故障率很低，并且具有冷却效率高、体积小、无污染等突出优点，在大功率、高工作温度的场合得到了广泛的应用。

表 1 冷却装置散热效率比较^[12]

Tab.1 The comparison of the cooling efficiency of some cooling methods^[12]

冷却形式	冷却效率 (%)	紧凑性 (%)	环境影响 (污染、噪音)
水冷(密闭循环)	0.055	0.11	均小
油冷	0.135	0.18	污染
风冷	0.21	0.36	噪音大

注: 冷却效率为系统功耗/装置功率; 紧凑性为模块体积/模块功率。

5 电路模块化和热电模块

目前电力电子的发展方向之一是电路模块化, 这样设计人员就可以致力于提高每一模块的性能和可靠性, 并使整体设计过程得到简化。近年来, 人们对恶劣环境下电力电子设备的需要不断增长, 例如内燃机、汽车和飞行器等等。在很多高温应用场合, 装置的空间都比较小, 散热条件更加恶劣, 此时传统的电力电子电路由于体积庞大、发热量高已经不适合应用于这些新的环境。因此, 功率装置的小型化、模块化已经成为大势所趋。

VLSI 技术的飞速发展, 不但扩展了它们的容量和性能, 而且大规模的生产也降低了制造成本, 使得计算机、通信等领域迅速发展。人们很自然就联想到, 电力电子系统集成技术也能产生类似的效果。一个标准的、模块化的、可编程的系统有利于加速系统级水平的设计, 使得电力电子系统真正成为现代工业自动化大系统中的一个名副其实的智能部件^[13]。所谓电力电子的集成化, 就是将电力电子装置中的功率器件、驱动电路、控制电路和保护电路封装到一个集成模块内部, 成为一个功能相对完整的、具有一定通用性的元件。它是一个高度集成的、能完成特定功能的、标准的电能处理单位。图 4 是一种典型电力电子模块的示意图。

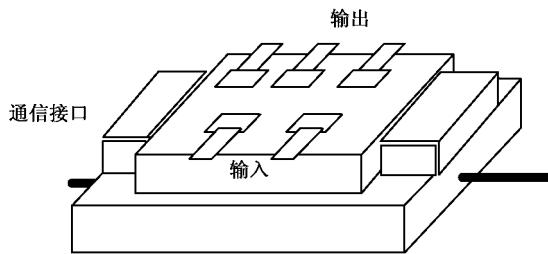
图 4 典型电力电子智能标准模块示意^[14]

Fig.4 Typical power electronic intelligent module^[14]

为实现系统集成, 必须对标准模块与应用系统

控制器之间建立一套适合于电力电子系统的高速通信总线和能量传输母线技术, 建立标准的通信协议, 将各类标准模块自由、灵活及可靠地集成成为一个实际的电力电子应用系统。若干标准模块集成一个小系统, 若干小系统可以进一步集成更大的应用系统, 如图 5 所示。

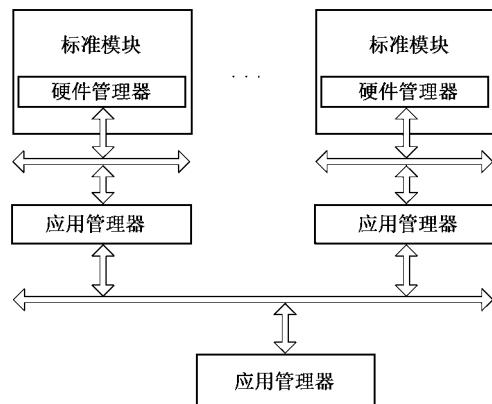
图 5 基于电力电子标准模块应用系统集成模型^[14]

Fig.5 The integrated module based on standard power electronic module^[14]

世界各国对于集成化电力电子技术的研究已经非常深入, 并取得了很多进展^[15]: 德国 EUPEC 公司开发了中等功率传动用 IGBT 模块, 模块的基板上内置电流取样电阻, 可测得 35kW 等级逆变器的电流; 德国 Semikron 公司于 1996 年开发了 MiniSKIip 型 CIB (整流、逆变、制动斩波) 模块, 并已经推向了市场; 2002 年, Semikron 又推出新一代 MiniSKIip-II 型 CIB 模块, 使用当今前沿的芯片封装技术, 改善热阻、减小尺寸, 为了适应高温环境, 模块内还集成了温度传感器, 以检测模块内温度; 美国 Power Integration 公司推出的三端离线式 PWM 开关 TOPSwitch 是一种高频开关电源专用模块, 2002 年已经开发了第四代产品 TOPSwitch-GX, 其特点是外围电路简单、成本低廉。可以看出, 当前的电力电子产品正逐步向模块化、集成化方向发展, 以适应不断变化的应用环境, 特别是航空航天, 恶劣地质环境等的应用。

虽然模块化的功率电路可以简化电路设计、降低制造成本, 但是随之而带来的问题也是比较突出的: 随着输出功率的提高和装置体积的减小, 功率密度被极大地提高, 导致整个装置的发热量激增, 导致稳定性下降、效率降低、故障率上升。此时传统的风冷和液体冷却技术已经远不能满足新装置对于散热的要求, 因此有着更加紧凑的结构和散热效率的热电模块 (TEM) 出现了。

应用于电力电子模块中的热电模块是一个固态能量转换器，其基本作用是遵循 Peltier 效应，利用电能来传递热量。具体来说，其工作原理如下^[16]：一个基本的热点转换器是由一系列 N 型和 P 型热电偶交替组成的，并是在电路上串联的。由两块陶瓷膜片将这些单元夹在中间，这种陶瓷材料可以做到对电绝缘同时导热性能良好。当在 TEM 两端施加正电压时，电子由 N 区移动到 P 区，电势降低并释放热量；相反，当 TEM 两端施加负电压时，电子反方向移动，电势升高并吸收热量。基于这个原理，就可以通过对 TEM 施加不同的直流电压来控制模块两端的热量。在应用于电力电子模块时，可以给 TEM 加上合适的直流电压，使模块内部的高温区和环境温度形成的温差尽可能低，将内部过多的热量通过 TEM 散发到周围环境中去。

目前 TEM 已经广泛应用于制冷或者需要精确控制温度的场合。它的热动力学效率比传统的电阻加热器要高得多。但是 TEM 也存在着一些问题，如需要低电压大电流的直流电源、温度的可调范围有限、价格还比较昂贵。从长远来看，TEM 由于结构紧凑，散热效率高，是大功率电力电子模块散热的首选方案。

6 低温电力电子

在高温下，电力电子装置会因为散热条件恶化而导致性能不稳定甚至损坏。相比之下，在低温的工作环境中，由于功率开关器件的通态阻抗会显著减小，其开关损耗也会随之减小，再加上低温有利于器件热量的散发，因此整个装置的效率、瞬态响应和功率密度都会比现在高温和室温下的装置有很大的提高。由于高温超导体（HTS）是低温领域最热门的新材料，本节主要讨论工作在低温环境下的电力电子装置的一些特性。

目前随着电力电子技术深入到各个领域，在很多低温场合出现了它的身影。例如在海洋深处进行地质考察、生物种群研究、石油勘探，以及在高海拔、高纬度地区进行的科学考察，这些工作环境的温度基本上在-80~0℃之间。在这些工作场合的电力电子设备有各种科学考察仪器、深海潜艇和极地舰船的动力装置，以及在这些地区的发电设备等。由于上述原因，在低温下，这些电力电子装置的散热条件很好，有时甚至不需要借助于附加的散热装置就可以稳定地工作。但是当前研究最为广泛和深入的低温应用当属外太空环境中的各种装置，它们

的工作环境是地球表面所没有的，通常的工作温度在-200~-100℃之间，此时器件和电路的特性都和地表的情况有所区别。

航空电力电子系统大多数都可以看作是一个由电力电子变换器、太阳能电池阵列和直流配电网络构成^[17]。利用直流一直流和直流一交流变换器为不同功率等级的负载提供电能。现在已经在使用中的航空电力系统的应用有国际空间站（ISS）、飞行器和卫星动力系统、伺服系统，以及各类太空飞船，包括外层空间探测器、行星登陆车和一些行星表面探测仪器。电力电子器件和装置在执行太空任务，尤其是外层空间和宇宙深处探测的应用中，由于环境温度非常低（见表 2），必须保证很高的效率和稳定性。

表 2 太空飞船的典型工作温度

Tab.2 Space missions and the environmental temperatures

任务	温度/℃
火星	-20~-120
木星	-151
土星	-183
天王星	-209
海王星	-222
冥王星	-229

美国宇航局实施的土星光环探测计划，各种电子装置的工作温度约为-183℃。当前，部分工作在这些低温环境的宇宙飞船上采用放射性同位素加热装置（RHU）来维持飞船内电力电子装置的工作温度为 20℃左右^[18]，同时 RHU 的正常工作还需要其它设备来配合完成，而且即使在整个装置的温度很高的时候，RHU 仍然会加热，这就需要一个温度控制系统来调节工作温度。因此，如果这类航空电力装置可以直接在超低的环境温度中工作的话，就能去掉 RHU 以及相关的装置和温度控制系统。这样一来，整个装置的尺寸和重量都可以大大减小，系统开发和发射的成本也能降低，同时装置的可靠性和寿命都能得到提高。

这一领域的研究已经非常深入，美国 Mueller、Jackson、Schempp 和 Mukhopadhyay 等人相继发现，在各种开关器件中，绝缘栅 MOSFET 最具有低温应用的发展前景。1994 年，这些科学家的研究报告指出，工作在环境温度 77K 时的 MOSFET 具有低通态电阻、快速开通关断、较低的二极管反向恢复电流、器件体积小、较高的半导体材料导热性等优点。

与此相比, 电阻、电容、电感和变压器等传统的无源器件虽然也能在低温下工作, 但是各自的特性发生了不同的变化。金属膜电阻能够在低温下正常工作, 然而电容器就不同了: 电解液电容器的电解液会凝固, 使电容失去作用; 而聚丙烯和聚苯乙烯电容则会表现为耐压值升高和损耗降低; 聚酯电容虽然也能正常工作, 但是电容值会有很大变化。目前, 已经有一种陶瓷电容可以工作在环境温度 77K, 而且直流耐压值超过 2000V, 被称作低温超电容 (CHC)。传统的铁氧体和坡莫合金材料磁性元件可以工作在 77K, 但是其损耗和室温环境下相比几乎没有变化, 因此目前亟待发现具有低损耗和适当磁导率的低温铁磁材料。

据美国 National Research Council 和 NASA Lewis 研究中心的研究人员指出, 低温电力电子应用的两大核心问题是高温超导体器件和低温半导体开关技术。目前他们已经研制成功了使用定制的超导体电感和其他元件组成的直流变换器, 和可以适应低温大电流负载的高电子迁移率晶体管开关。

7 高温超导体 (HTS)

早在 1911 年荷兰莱顿实验室的 Kamerlingh Onnes 发现超导体后, 人们就期待超导体能很快地在电力技术中得到应用^[19]。直到上世纪 60 年代, 实用的非理想第 II 类超导体 NbTi 和 Nb3Sn 陆续被发现后, 超导电力技术的研究开发才得以广泛地开展, 各种超导电力设备的概念设计方案和试验原形样机相继问世。20 世纪 80 年代初, 低交流损耗的极细丝复合多芯 NbTi 超导材料研制成功后, 超导电力技术的研究开发再次活跃起来。1986 年, IBM 瑞士研究中心的 J. G. Bednorz 和 K. A. Mueller 发现了 La 系高温超导材料。随后的两年里, Y 系、Bi 系和 Ti 系高温超导材料 (临界温度为 85~125K) 相继被发现。高温超导设备可以在液氮温度运行 (77K), 与低温超导设备相比 (运行于液氦温度 4.2K) 不仅运行成本大大降低, 而且磁-热稳定性大大提高。但是作为一种陶瓷材料, 高温超导体并不像 NbTi 超导材料那样容易制成具有载流能力很高的柔软导线, 直到上世纪 90 年代中后期, 实用高温超导带材的制备才取得了重大进展。用超导电力技术中比较重要的高温超导复合导线举例来说: 目前, 采用 PIT 制备长 1.0~2.0km 的 Ag 基 Bi 系多芯复合导线的技术已经比较成熟。工程电流密度 (J_e) 达到 100~150A/mm² (77K)、长度 100~1000m 的

Bi 系多芯复合导线开始商品化, 售价为 200~300 美元/kA·m。表 3 为国际上主要制备高温超导带材的单位及技术水平。

表 3 国际主要研制 HTS 带材的单位及技术水平^[19]

Tab.3 The major institutes interested in HTS belt material and their achievements^[19]

单位	技术水平
美国超导公司 (ASC)	100~400m $J_e > 100$ A/mm ²
丹麦北欧超导 (NST)	100~1000m $J_e > 70$ A/mm ²
德国真空冶炼 (VAC)	100~1000m $J_e > 70$ A/mm ²
日本住友电气 (SEC)	100~500m $J_e > 70$ A/mm ²
澳大利亚超导公司 (AST)	100~500m $J_e > 60$ A/mm ²
中国西北有色金属研究院	100~200m $J_e > 100$ A/mm ²
北京英纳超导技术公司	100~1000m

超导材料现在已经深入电力技术的各个层面, 在传输电网、电力电子器件和电路、电力传动等领域都有广泛应用, 以下将就其中发展比较迅速的应用领域进行介绍。

(1) 高温超导体变压器: 与常规变压器相比, HTS 变压器具有总损耗小 (为常规的 30%)、质量轻 (45%)、总成本低 (80%)、体积小、过载能力强、无油运行可避免火灾和环境污染问题, 运行阻抗小, 有限流功能, 降低故障冲击, 改善电网电压稳定性等等优点。至今研制规模最大的样机来自 ABB 公司和美国威斯康星的 Woukasha, ABB 合作研制的三相 630kVA (18.7kV/420V) 变压器, 已在日内瓦电网中运行 1 年; 目前能源部又资助 1100 万美元, 由 ABB 的美国伙伴为美国公用事业研究、制造、安装、试验接近 10MVA 的第二套装置, 估计对 30MVA 以上的变压器, 1 年可有 30 亿美元的市场。

(2) 超导磁性储能系统 (SMES)^[20~23]: SMES 可改进电源质量和可靠性, 提高电网能力, 可用于均衡电力负载, 对电源的不同要求可迅速连续作出响应, 不降低电源质量。在 EUCAS'99 会议上, 以色列报道了储能 60J (77K) 和 130J (64K) 的装置; 芬兰和德国报道了运行在 20K 储能 5kJ 的装置。另一种是飞轮储能装置, 利用 Y 系块材与永磁铁做的磁浮无摩擦轴承, 这也是研究的热点。与其他储能方式比, 其优点在于: 高的储能密度 (约 30 倍), 较低的制冷成本和寿命循环成本 (比电池基 UPS 系统低 5 倍)。美国 (休斯顿和波音)、欧洲 (德国、法国和西班牙; 芬兰和德国; 英国) 和日本 (CHUBU

电工和三菱重工), 都有项目在进行。其中波音公司已发展了可用于宇航着陆的小型飞轮储能装置, 储能几百瓦小时; 欧洲联合研究的项目为“磁悬浮和能量转换用 MTG YBCO 材料”, 芬兰和德国的装置储能达 300Wh, 英国等研究了 15kWh 的试验系统; 日本研制的模型系统储能已达 1.4kWh, 用了 9 块直径 60mm 的 YBCO, 飞轮用碳纤维增强塑料(CFRP)制作, 转速达 21000r/min, 目前正在研究 10MWh 的样机。

(3) 高温超导输电电缆^[20]: 1996 年, 美国电力研究所在美国能源部的支持下和 Pirelli 电缆公司及 Southwire 公司采用 ASC 的 Bi-2223/Ag 带状导线研制出长 30m、115kV、2kA 的三相交流高温超导电缆模型, 其目标是研制 1km 的高温超导电缆。Southwire 公司已在其总部安装一根试验用的长 30m、12.5kV、1.25kA 的三相交流高温超导电缆, 该电缆已累计满负荷运行 3000h 以上。Southwire 在 2001 年 1 月在公司内开始使用第一个工业高温超导输电系统, 该系统使用 3 条 30m 长的超导电缆, 连续 1.27 万小时向下属 3 座工厂输送电力。美国底特律的爱迪生电力公司现已铺设了 3 条各 120m 长超导电缆, 可向该市中心 1.4 万户居民供电。在欧洲, 2001 年 5 月, 丹麦哥本哈根市在电网上使用了一条 30m 的高温超导电缆, 现正向 15 万居民供电。2002 年, 巴黎电力公司的一些用户也通过高温超导电缆获取电力。

目前超导电力技术走向产业化已经不是能否实现的问题, 而是用多久实现的问题。结合高温超导技术、电力电子技术和现代控制技术而形成的有源超导限流器、超导储能系统和超导限流—储能系统将首先实现产业化。但是超导电力技术的大规模应用还有赖于在以下两个方面取得突破^[24~27]: 一是制备低成本、低损耗、机械性能良好的高温超导线材; 二是提高低温系统和制冷系统的长期运行可靠性, 降低其造价和运行维护的费用。

8 结论

本文从几个侧面回顾了现代电力电子技术在高温和低温应用场合的主要方向和发展新动向。总的来说, 电力电子技术所涉及的应用领域越来越广泛, 并且开始向高海拔、极地甚至外太空等特殊的工作环境拓展。在这些极端的应用场合, 高温和低温对电力电子系统的影响上升到首要的位置。因此, 为了进一步扩展人类的生存空间、探询尚不为人所知

的科学发现, 就必须从功率器件, 电力电子电路和控制方法等多方面进行更为深入的研究。

参考文献

- 1 王兆安, 黄俊. 电力电子技术. 北京: 机械工业出版社, 2004: 1~5
- 2 Lee F C, Peng D M. Power electronics building block and system integration. IPEMC'2000, The Third International. 2000, 1: 1~8
- 3 Alan Ball. MOSFET 的热稳定性. EDN 电子设计技术, 2004, (10): 24~28
- 4 Richard R Grzybowski. Long term behavior of passive components for high temperature applications—an update. IEEE HITEC 1998: 207~214
- 5 何维满, 张长生. 电子节能灯专用长寿命铝电解电容器技术研究. 江西能源, 2002, (3): 18~20
- 6 Philip G Neudeck. SiC technology. NASA Lewis Research Center, 1998: 2~40
- 7 王引书, 李晋闽, 林兰英. SiC 单晶的生长及其期间研制进展. 材料研究学报, 1998, (6): 11~13
- 8 Van J D Wyk. Power electronics technology at the dawn of a new century-past achievements and future expectations. Conference Record of IEEE-PIEMC, 2000: 9~20
- 9 陈裕权. SiC 电力电子器件喷薄欲发. 世界产品与技术, 2002, (3): 55~57
- 10 Davis S. 冷却趋势: 电力电子系统将依赖于散热技术. 变流技术与电力牵引, 2002, (6): 12~24
- 11 陈登科. 电子器件冷却技术. 低温物理学报, 2005, (8): 2~8
- 12 陈建业. 大功率电力电子装置冷却系统的原理与应用. 国际电力, 2002, (12): 18~20
- 13 钱照明等. 电力电子系统集成理论及若干关键技术. 科学技术与工程, 2004, (7): 24~28
- 14 钱照明等. 我国电力电子与电力传动面临的挑战与机遇. 电工技术学报, 2004, (8): 23~29
- 15 蔡宣三. 电力电子器件的模块化与集成化. 今日电子, 2004, (9): 22~26
- 16 Marc Hodes. One-dimensional analysis of thermoelectric module. Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 2004: 242~250
- 17 Jose M Davis, Robert L Cataldo, et al. An overview of power capability requirements for exploration missions. NASA Glenn Research Center, 2004, (22): 12~22

- 18 Patterson R L, Hammoud A, et al. Development of electro- nics for low temperature space missions. 4th European Workshop on Low Temperature Electronics, June 21-23, 2000: 132~136
- 19 肖立业. 超导电力技术应用前景分析. 世界科技研究与发展, 2003, (2): 12~24
- 20 汪京荣, 冯勇, 张平祥. 高温超导体材料应用进展和展望. 新材料产业, 2001, (2): 4~8
- 21 范则阳, 戴陶珍等. 超导磁储能系统对舰船电力系统供电品质的改善研究. 船电技术, 2004, (1): 22~26
- 22 张广明, 熊兰英. 《通信用不间断电源——UPS》标准中电性能指标的说明. 电信技术, 2002, (6): 10~22
- 23 Robert Habner, Jeseph Bener, Alan Walls. Flywheel batteries come around again. IEEE Spectrum, 2002, (8): 9
- 24 Rosner C H. Emerging 21st century markets and outlook

(上接第 41 页)

- 3 Luigi Malesani, Paolo Tenti, Paolo Tomasin, Vanni Toigo. High efficiency quasi-resonant DC link three-phase power inverter for full-range PWM. IEEE Trans. on IA, 1995, 31: 141~147
- 4 Jung G Cho, Hack S Kim, Gyu H Cho. Novel soft switching PWM converter using a new paralell resonant DC-link. IEEE PESC, 1999: 241~247
- 5 Donker R W De, Lyons J P. The auxiliary quasi-resonant DC link inverter. IEEE PESC, 1991: 248~251
- 6 Lai J S, Young R W, Ott G W, et al. A delta configured auxiliary resonant snubber inverter. IEEE Trans. on Ind. Appl., 1996, 32(3): 518~525
- 7 Mao H, Lee F C. Improvement on zero-voltage transition three-phase rectifier inverter. In: Proc. of 1995 VPEC Seminar, 1995, 13: 19~27
- 8 Song B M, Lee S R, Lai J S. An improved three-phase auxiliary resonant snubber inverter for AC motor

- for applied superconducting products. Advances in Cryogenics Engineering, 43A, 1998: 12~13
- 25 Tanaka S. The superconductor industry in the 21st century. ISTE Journal, 2003, 13(4):9
- 26 Nagamatsu J, Nagamatsu, Nakagawa N. Superconductivity at 39K in magnesium diboride. Nature, 2001, (3): 410, 63~64
- 27 Jerome D, Bechgaard Klaus. Condensed-matter physics: Superconducting plastic. Nature, 2001, (3): 410, 162~163
- 28 Schon J H, Kloc C, Batlogg B. High-temperature superconductivity in lattice. Science, 2001, 293: 2432~2434

作者简介

徐殿国 男, 1960 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动、电机与电器等。

李向荣 男, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

applications. Conf. Rec. of IEEE PESC, Hukuoka, Japan, 1998: 423~428

- 9 Lee S R, Ko S H, Kwon S S, et al. An improved zero-voltage transition inverter for induction motor drive application. TENCON 99, Proceedings of the IEEE Region 10 Conference, 1999: 986~989
- 10 陈国呈, 金东海. 在最优化 PWM 模式控制下变频器的输出特性. 中国交流电机调速传动学术会议论文集, 北戴河, 1989, 1: 204~207
- 11 陈国呈, 周勤利, 孙承波. 软开关三相 PWM 逆变器载波方式的选择. 电工技术学报, 2003, 18(1): 52~56

作者简介

陈国呈 男, 1944 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子及电机驱动。

孙承波 男, 1970 年生, 高级工程师, 研究方向为电力电子及电机驱动。