

# 功率模块主动热控制技术综述

皇甫宜耿, 宋少林(中国电源学会学生会员), 王晓鹏, 李 凡, 甘子瑜  
(西北工业大学自动化学院, 西安 710072)

**摘要:** 功率半导体器件是基于电力电子技术的电能变换、电力驱动等领域的核心, 在新能源发电、交通运输以及航空航天等领域有广阔的应用前景, 然而其发热原因造成的退化失效和可靠性等问题已成为其进一步发展的瓶颈, 亟需探究有效的热管理方法, 以提高其可靠性和使用寿命。在介绍功率模块的热管理方法的基础上, 重点综述了其主动热管理方法的研究进展。依据控制参量的不同将其分为器件级、系统级和多参量的综合方法, 并对各种方法进行了分析对比总结。最后提出了功率器件结温相关技术的发展趋势, 进行了展望, 以期为其后续研究应用提供参考。

**关键词:** 功率器件; 可靠性; 结温控制; 主动热控制

## Review of Research on Active Thermal Control Technologies for Power Modules

HUANGFU Yigeng, SONG Shaolin, *Student Member, CPSS*, WANG Xiaopeng, LI Fan, GAN Ziyu  
(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Power semiconductor devices are the core of electric energy conversion and electric drive based on the power electronics technology, which have broad application prospects in new energy generation, transportation, aerospace and other fields. However, the problems such as degradation, failure and reliability caused by heat generation have become bottlenecks that limit their further development, and it is urgent to explore effective thermal management methods to improve their reliability and service life. In this paper, based on the introduction of thermal management methods for power modules, the research progress in active thermal management methods is reviewed in detail, and these methods are divided into device-level, system-level and multi-parameter comprehensive methods according to the difference in control parameters. In addition, various methods are analyzed and compared. Finally, the development trend and prospect of technologies for power devices which are related to junction temperature are put forward, providing a reference for the subsequent research and applications.

**Keywords:** Power device; reliability; junction temperature control; active thermal control

在“碳达峰、碳中和”的双碳目标下, 随着如光伏发电机组、风机发电机组、电动汽车驱动系统和飞机电推进系统的不断增加, 包括其系统在内的电力电子装置得到了广泛应用, 同时也给系统的可靠性带来诸多问题。在电力电子系统中, 功率器件是实现电能转换和控制的重要组件之一, 也是最易发生故障的部件之一, 所以其可靠性对整个电力电子系统的稳定至关重要。

据调查统计, 电力电子系统的失效中约有 34%

由功率器件引起。而温度又是导致功率器件失效的主要原因, 约有 55%的器件失效与温度直接相关<sup>[1]</sup>, 并且功率器件的工作结温每上升 10 °C, 其失效概率以 2 的指数倍速上升<sup>[2]</sup>。在长期工作中, 功率模块受到电热力多物理场耦合作用, 在芯片的结温波动中, 由不同热膨胀系数材料构成的功率模块在遭受交变热应力冲击后, 其内部材料产生疲劳效应, 最终降低功率模块的可靠性。因此, 功率器件结温的控制对于器件的可靠性和使用寿命至关重要, 也是电力电子系统的重要设计环节。

本文综述了近些年功率器件的温度控制方法,

阐述了功率模块的主动热管理方法,分析了各种热管理方法的特点。最后,对现有研究方法进行总结和评价,并分析展望了未来相关研究。

## 1 基于主动热控制的管理方法

温度情况是影响功率器件寿命的关键因素,在温度精确获取的前提下对功率器件进行热管理,从而提升器件的运行效率与使用寿命,已经成为电力电子系统设计中1个重要方向。对于热管理而言,散热通常是其实现手段,通过散热器结构及冷却方式的设计,提高器件散热能力,进而提高可靠性,延长寿命<sup>[3-5]</sup>。冷却形式可分为风冷<sup>[6]</sup>、液冷<sup>[7]</sup>,基于相变材料的储热热控制方式也得到广泛研究和发展<sup>[8-9]</sup>。基于散热的热管理方式目的在于强化散热能力,从而实现器件温度的限制,该热管理方式虽然可以提升器件工作的安全性,但仍存在许多方面的不足。其一,不能从根本上缓解器件发热问题,在恶劣环境下散热系统难以正常工作时,器件的热量不能得以释放,从而造成器件损坏;其二,器件的寿命与器件工作时的结温波动有密切关系,而散热的热管理技术并不能调整器件的结温波动状况,所以对器件的工作寿命帮助有限;其三,散热器的设计往往具有盲目性,保有一定裕量,再加上散热器体积、重量较大,不利于系统的集成化、小型化。

上述不足促使功率模块热管理的改进。Murdock D A 等<sup>[10]</sup>提出主动热管理概念,通过该技术融合器件模块的控制方法,希望能够从器件自身发热出发,通过控制手段平滑结温波动,减小器件由于热循环导致的失效风险,提高器件可靠性。主动热控制方法在近年来得到了广泛关注。迄今为止,学者们探索与 IGBT 模块损耗相关的量如开关频率、驱动电路和调制方式等进行温度调节的主动热管理策略,并从理论和实验上证明了其可行性。

基于主动调节的热管理方式提取出功率器件不同控制层中的变量,以改变其热行为。图1描述了不同的控制层级,其中栅极驱动器的层级最低,对于该层而言,驱动电压、电流和栅极电阻可以调

整,以改变功率器件的损耗和温度。调制层级可以通过调节开关频率来控制热行为,该方法可以在不影响变换器性能的前提下,降低功率器件的开关损耗和导通损耗。在更高的水平上,热控制可以通过改变输出电压、输出电流、直流电压、有功功率和无功功率来实现<sup>[11]</sup>。按照调节参数的不同,可以将这些方法分为器件级热管理方法和系统级热管理方法<sup>[12]</sup>,同时对于综合不同热管理方法的形式,能够弥补单一方法的缺陷,使得热管理更强力有效,也是一种重要的方法。

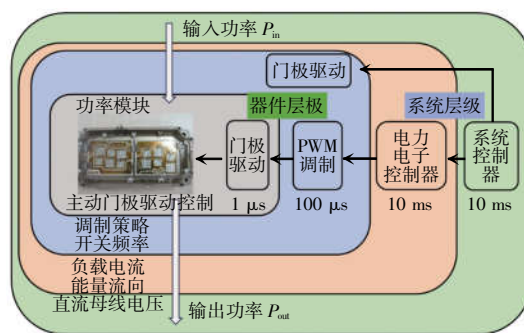


图1 管理功率转换器热行为的各种控制层

Fig. 1 Various control layers that manage the thermal behavior of power converters

## 2 器件级主动热管理方法

直接作用于器件的热管理参数有开关频率、驱动电压、栅极电阻和调制方式等。功率模块的开关频率与其开关损耗有密切的关系,其关系可表示为

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off})f_{sw} \quad (1)$$

式中: $P_{sw}$  为开关损耗; $E_{on}$  为开通损耗; $E_{off}$  为关断损耗; $f_{sw}$  为开关频率。可见,由于功耗和频率成正比,因此可通过控制开关频率来降低或者增大结温。

许多文献以此为基础尝试结温波动的改进措施,其中效果比较显著的是采用滞环频率控制<sup>[13-14]</sup>,当器件的结温波动低于较小设定值时升高开关频率,当结温波动高于较大设定值时降低开关频率,从而减小因工况发生变化引起的低频结温波动,具体方法如图2所示,结果显示,该方法可使最高结温降低约30℃。文献[15]提出一种变开关频率的功率模块结温控制方法,文中表明,结温波动在5℃

以内时对器件的损伤会降到最低,所以建立在结温波动为 5 °C 时的频率与电流之间的数学关系,通过电流控制开关频率进而控制结温,最终应用在三相并网逆变器中,验证其可行性,可将温度波动幅值从 10 °C 限制到 5 °C 以内。

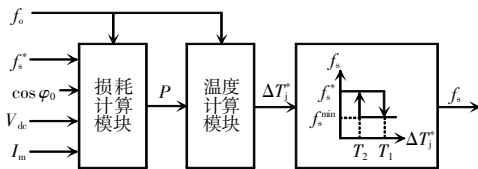


图 2 基于  $T_j$  控制的开关频率的 PWM 控制方法<sup>[13]</sup>

Fig. 2 PWM control method of switching frequency based on  $T_j$  control<sup>[13]</sup>

开关频率作用于器件,也是整个系统的重要设计参数。开关频率的降低会导致输出波形的谐波畸变率增加,同时频率的变化对于后级滤波器的设计要求提高,也会影响到系统性能及稳定性等指标。所以开关频率的调节范围有限,进而导致其调节能力有限。

为了不影响系统输出性能,基于栅极电阻、栅极电压的方法得以提出。栅极电阻会影响栅极电容的充、放电速度,从而导致 IGBT 模块的开关速度发生变化,使得开关损耗增大或减小。基于此,文献[16]提出了一种可控的栅极驱动器,来减少功率器件工作时的结温波动,如图 3 所示。

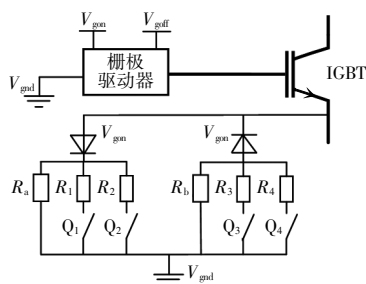


图 3 具有可切换栅极电阻网络的传统电压源栅极驱动器<sup>[16]</sup>

Fig. 3 Traditional voltage source gate driver with switchable gate resistance network<sup>[16]</sup>

根据工频周期内电流的大小划分区间,不同区间采用不同的驱动电阻,从而使结温波动减小。选择原则为:在小电流下选择最大的栅极电阻,使得开关损耗增加;在大电流下选择最小的栅极电阻,减少损耗。虽然该方法可以降低 IGBT 模块的基频

结温波动,但是需要额外的驱动电路,控制方法也会随之复杂化。

由功率器件的输出特性可知,在电流不变的情况下增大驱动电压可以减小导通压降,进而降低导通损耗。同时研究表明,驱动电压对器件的开关损耗也有影响,关断损耗的大小与驱动电压无明显关系,但驱动电压的增大会降低开通损耗,所以改变驱动电压也成为主动热控制的方法之一。由于栅极电压米勒平台的存在,在驱动时可采用两步式栅极驱动器。首先输出器件的米勒平台电压,然后输出器件的典型驱动电压,通过在栅极驱动器中调整米勒平台电压持续时间来改变功率器件导通电压的下降速率和导通电流的上升速率,进而改变功率器件开通损耗,从而达到控制结温的目的<sup>[17-18]</sup>。结果表明,最大热循环幅度从 13 °C 降低至 7 °C。

不连续脉宽调制策略 DPWM(discontinuous pulse width modulation)可以使 IGBT 模块的损耗更低。基于此,对风电变流器中的 IGBT 模块结温波动进行调节,当风速超过某个值时,采用不连续脉宽对变流器进行调制,正常情况采用正弦脉宽调制 SPWM(sinusoidal pulse width modulation)。该方法可以有效降低 IGBT 模块长时间任务工况下的低频结温波动,但是对切换调制方式下运行工况的电能质量有一定影响。不连续调制策略又可分为 DPWM0、DPWM1、DPWM2、DPWMMAX 和 DPWMMIN,在不同功率因数角下,不同的断续调制策略损耗也有不同,所以动态的不连续调制策略也是可行的热控制方法<sup>[19]</sup>。

### 3 系统级主动热管理方法

可用于热管理的电力电子系统级别的方式有负载电流限幅、直流母线电压、有功调节和无功调节功率动态分配等。由于负载电流对 IGBT 模块的损耗影响较大,可通过设定结温阈值的方法限制负载电流,该方法不仅可以使基频结温的平均值减小,还可以降低结温波动,但是会影响变流器的输出功率,所以应用的局限性较大。与传统限流方法相比,通过结温反推动态调整电流幅度限制来监控

温度并控制损耗具有明显优势,既可以充分利用逆变器的容热能力,又可以增强逆变器的负载能力<sup>[20]</sup>,其动态电流限幅控制器原理如图4所示,使用器件温度解算器件电流最大值,取其最小值与逆变器极限电流  $I_{cmax}$  的较小值作为系统电流动态限幅值。

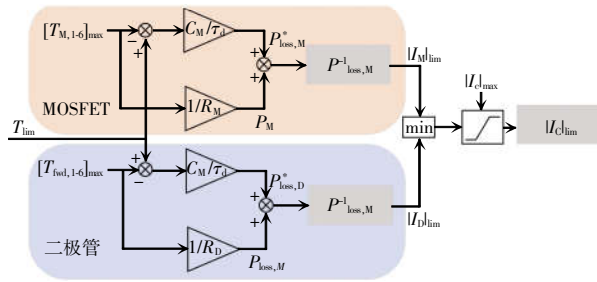


图4 动态电流限幅控制器<sup>[20]</sup>

Fig. 4 Dynamic current limiting controller<sup>[20]</sup>

IGBT的开关损耗  $E_{IGBT}$  和续流二极管的反向恢复损耗  $E_{FWD\_re}$  分别为

$$E_{IGBT} = (E_{on} + E_{off})k(T) \frac{E(R_g)}{E(R_{rated})} \frac{V_{DC}}{V_{DC\_rated}} \quad (2)$$

$$E_{FWD\_re} = E_{re}k(T) \frac{E_{re}(R_g)}{E_{re}(R_{rated})} \frac{V_{DC}}{V_{DC\_rated}} \quad (3)$$

式中:  $E_{on}$ 、 $E_{off}$ 、 $E_{re}$  为器件数据手册中在基准情况下IGBT的开关损耗和二极管的反向恢复损耗;  $V_{DC}$  为直流母线实际电压;  $V_{DC\_rated}$  为直流母线基准电压。由此可见,  $V_{DC}$  的动态调节亦能影响功率器件的损耗<sup>[12]</sup>。该方法在电机驱动方面得以应用,在大转矩和低速状态的运行状态下,将导致逆变器功率器件结温波动大、峰值高。文献[21]提出一种考虑开关损耗和导通损耗均衡的变直流电压控制方法,使得IGBT启动时的峰值功率损耗从6 700 W降低至1 800 W,最大结温降低了15 °C,定子电流纹波更小。文献[22]考虑因素更多,将电机转矩、转速、 $d$ 轴 $q$ 轴电流均作为调节电压因素,通过PI控制母线电压变化,提升了电机与逆变器的整体效率,但该方法的主要缺点是直流母线电压的控制会增加系统的复杂度和成本,且此策略不适合用于如风力发电这类需要维持恒定电压以接入电网的应用。

在风力发电和光伏发电中,常用的控制策略为最大功率点跟踪MPPT(maximum power point tracking)控制,但在此策略下,难以平衡逆变器输出功率

最大与其工作寿命最长之间的矛盾,因此有功功率控制被用于限制光伏或者风机的最大输出功率,采用有功功率控制和最大功率点跟踪相结合的方法降低热负荷<sup>[23]</sup>。而无功功率的调节引入无功电流,可以改变功率变流器的电压、电流大小和相位,从而改变功率器件损耗的大小和分布。文献[24]提出通过控制并联变流器之间的无功功率循环,在可以接受对其他器件或并联变流器的热应力增加的前提下,稳定阵风时电力设备的热波动,为提高风电转换系统的可靠性提供新的途径。同样,在高压大功率场合下,功率变换器通常由多个子模块单元串、并联组合而成,使各子模块承担相同的功率。而在老化或者不均流等因素的影响下可能会导致不同子模块之间承担功率并不相同,因此合理的功率动态分配方法能够使用电压、电流等可自由调节的参量,动态分配功率从而提高系统可靠性<sup>[25-26]</sup>。文献[27]在一个四模绕组永磁同步电动机驱动系统提出基于功率分配的主动热控制方法,实时采集各逆变器温度,由热控制器计算出功率分配系数,并最终计算出4个电流环的电流参考值,用以平衡各模块承担功率,进而平衡热分布。

## 4 综合主动热管理方法

研究发现,SiC MOSFET开关损耗同时受到开关频率、驱动电阻和母线电压等多种因素的影响。然而,当正常工作条件下的开关损耗本身较小时,单独使用变开关频率或者变驱动电阻方式时的结温控制效果十分有限,多种方式共同作用的方法可以大范围调节,使得芯片的结温控制也更加有力<sup>[28]</sup>。因此,相比单一的控制方法,综合多方式的热管理方式也是重要的发展方向,在提升结温控制效果的同时又能综合各种方式的优点。在功率模块热传递过程中,芯片-环境之间的热阻直接影响热量传递的效率,所以也有文献考虑改变外部散热条件来对结温进行调节。主动控制散热这种方法可通过反馈闭环控制结温或底板温度,当结温较高时调节制冷装置,可以对结温的大幅波动进行有效平滑。虽然

设备的温度应力可以降低,但 2 个额外的控制回路使其相对复杂<sup>[29-30]</sup>。基于上述通过结温改变外部散热条件的方法,文献[15]分析了变流器在变开关频率、变负载、变环境温度下的结温波动情况。针对负载突变的情况,设计了一种变开关频率与变散热风扇转速相结合共同抑制结温波动的方法,相比于仅使用其中任何一种方法,均存在优势。在无热控制时,负载电流由 50 A 跳变至 80 A 会带来 15 °C 的平均结温跳变,在仅使用变开关频率或变散热风扇转速的情况下跳变分别减至 5.0 °C 或 3.5 °C,二者同时使用时温度跳变仅为 1.6 °C。证明了所提方法的有效性。而文献[31]提出基于区域导向的主动热管理策略,控制框图如图 5 所示,在考虑开关频率与外部散热器调节的基础上,还使用输出电流对高频下的平均结温进行限制。在较低输出频率时,对温度波动进行监控,滞环控制开关频率;在较高输出频率时,对电流进行限幅,降低器件的平均结温,将两者优势结合起来。结果表明,在初始输出频率较低、结温波动较大的情况下,滞环控制使得结温波动降低,在输出频率逐渐增高后采用风扇散热和电流限幅的方式限制平均结温,最终可将最大结温波动减少 20 °C、平均结温下降 10 °C 左右。

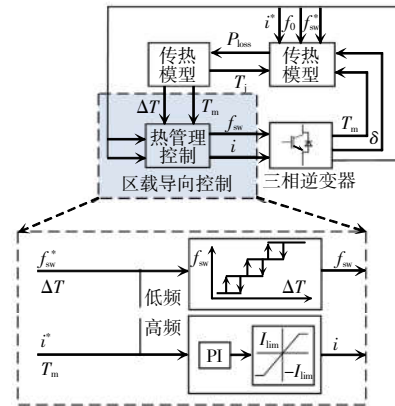


图 5 逆变器主动热管理控制系统框图<sup>[32]</sup>

Fig. 5 Block diagram of inverter active thermal management control system<sup>[32]</sup>

在上述方法的基础上,文献[32]同样从器件损耗和散热系统 2 个维度,进一步考虑了栅极电阻的影响,提出了一种综合主动结温控制方法,如图 6 所示,一定程度上解决了单独冷却系统不能快速控制的缺陷。使用负载电流跳变的方式,仿真和实验验证了主动结温控制策略的可行性,且 IGBT 与二极管的结温波动均下降 15 °C 左右。

需要进一步考虑的是,不同限温策略对系统的影响以及不同限温策略之间的协调作用,需要对不同策略施加相应的权重以调节触发节点。

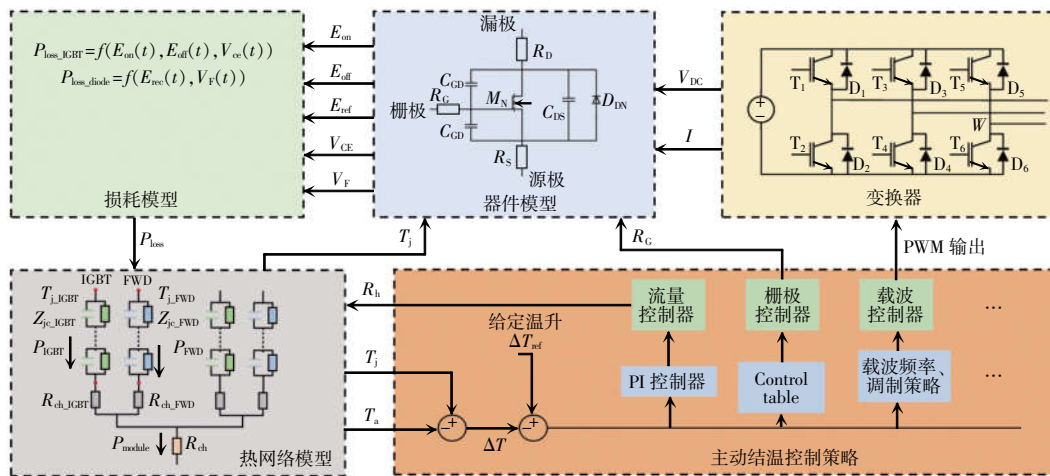


图 6 综合主动结温控制系统框图<sup>[33]</sup>

Fig. 6 Block diagram of integrated active junction temperature control system<sup>[33]</sup>

## 5 主动热控制小结

不同的热管理方法在其影响参量、应用场景和

调节方式等诸多方面均存在差异,因此不能从单一角度对其进行评价。表 1 中对本文所提的基于散热的热管理方法、器件级的主动热管理方法、系统级主动热管理方法以及综合热管理方法,考虑其影响参

表 1 功率模块热管理方法总结

Tab. 1 Summary of thermal management methods for power modules

| 方法分类     | 控制方式            | 外加电路 | 引入损耗 | 输出影响 | 实现难度 | 响应速度 | 热应力缓解程度                         | 优点                           | 缺点                              | 参考文献         |
|----------|-----------------|------|------|------|------|------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------|
| 基于散热器热管理 | 风冷              | 否    | 否    | 无    | 容易   | 慢    | 热阻降低 10%~20%<br>降低温升 5~10 °C    | 简单易实现                        | 外加散热器、体积较大                      | [4][6][7]    |
|          | 液冷              | 否    | 否    | 无    | 容易   | 慢    | 最高结温降低 10~20 °C                 | 简单易实现                        | 外加散热器、体积较大                      | [5][8]       |
|          | 相变材料            | 否    | 否    | 无    | 较复杂  | 慢    | 降低结温波动 30%                      | 利用材料自身优势提升模块性能               | 需重新设计封装结构                       | [9][10]      |
| 器件级主动热管理 | 变开关频率           | 否    | 否    | 有    | 容易   | 快    | 降低结温波动 50%                      | 动态响应迅速<br>应对负载变化能力强<br>外加器件少 | 滤波器设计困难<br>受到极限开关频率、电能质量和散热条件约束 | [13][14][15] |
|          | 变调制策略           | 否    | 否    | 有    | 较复杂  | 快    | 结温降低 8~10 °C                    | 动态响应迅速<br>不需要修改外电路           | 控制复杂<br>调节范围有限                  | [19]         |
|          | 变栅极电阻           | 是    | 是    | 无    | 复杂   | 快    | 结温波动降低 20%<br>平均结温降低 8%         | 响应速度快<br>不影响模块的正常工作          | 需额外的驱动控制<br>电路控制较为复杂<br>调节效果有限  | [16]         |
|          | 变栅极电压           | 是    | 是    | 无    | 较复杂  | 快    | 结温波动降低 30%~40%<br>平均结温降低 8%~10% | 不影响变流器输出性能                   | 需额外的驱动控制电路                      | [17][18]     |
| 系统级主动热管理 | 负载电流限幅          | 否    | 否    | 有    | 容易   | 较快   | 输出功率提升 40%                      | 提升器件过载能力                     | 降低系统性能                          | [20]         |
|          | 直流母线电压          | 否    | 否    | 无    | 较复杂  | 较快   | 最大结温降低 15 °C                    | 控制简单、控制量易采集                  | 母线电压对系统稳定性重要、使用场景较少             | [12][21][22] |
|          | 有功调节            | 否    | 否    | 有    | 容易   | 慢    | 最高结温降低 7 °C                     | 可减少成本<br>对输出、寿命有合理折中         | 限制系统输出性能                        | [23]         |
|          | 无功调节            | 否    | 否    | 无    | 容易   | 慢    | 结温波动最大降低 40%                    | 不影响系统的正常运行                   | 影响电能输出质量<br>仅缓解结温波动情况           | [24]         |
|          | 功率动态分配          | 否    | 否    | 无    | 容易   | 较快   | 最高壳温下降 6 °C<br>器件最大寿命提升 1.5 年   | 不影响系统的正常运行                   | 增加非薄弱模块的应力                      | [25][26][27] |
| 综合调节方式   | 变频、变风扇流量        | 是    | 否    | 有    | 较复杂  | 快    | 切载时结温跳变减小 80%<br>结温波动减少 20 °C   | 弥补单一方式缺陷                     | 策略间存在耦合问题                       | [15]         |
|          | 变频、限流、变风扇流量     | 是    | 否    | 有    | 复杂   | 快    | 平均结温下降 10 °C                    | 弥补单一方式缺陷                     | 需重点考虑各种方式的触发节点                  | [32]         |
|          | 变频、限流、变栅极电阻、变流量 | 是    | 是    | 有    | 复杂   | 快    | 结温波动均下降 15 °C                   | 弥补单一方式缺陷                     | 需重点考虑各种方式的触发节点                  | [33]         |

量、应用场景和调节方式等,建立综合考虑其是否需外加电路、是否额外引入损耗、对输出有无影响、响应速度快慢、实现难度、热应力缓解程度及其优缺点

等多方面因素的评价体系。具体说明如下。

(1)外加电路,即热管理方法是否需要通过增加外围设计或添加设备实现,如通过调节驱动电压

和栅极电阻的方法,均需重新设计栅极驱动器,而变频方法只需对控制算法进行改进即可。

(2)输出影响,即热管理方法的使用是否会对输出电能质量造成影响,如基于开关频率的方法会提前考虑运行最低频率和最高频率,以限制频率调节范围,以防止输出的畸变或谐波过大。

(3)响应速度,即热管理方法的温度变化做出调节的反应速度,如器件级的响应速度往往快于系统级响应。

(4)实现难度,即对于热管理方法实现的综合考虑,如是否需要更改原电路结构、算法上的难度等。

(5)热应力缓解程度,即热管理方法的使用所起的作用,如平均结温、结温波动减小程度。

## 6 研究展望

当前,功率模块的研究领域对其主动热控制、故障机理、结温获取和寿命预测等已取得显著进展,但仍然存在难以量化模块内部故障机理过程、难以在线实时获取模块健康状况和剩余寿命的问题,对于功率半导体器件封装的优化设计、封装准确可靠的失效诊断与评估策略也需进一步研究,展望如下。

### 6.1 在线状态监测与寿命预估

器件运行方面,对外部状态参数的演化规律与失效形式、失效位置之间的关系在全生命周期下的规律认识仍不充分,需要进一步研究,从而为器件的老化程度、损伤位置和剩余寿命监测提供理论支撑。而如何在不增加拓扑复杂性和不改变原运行状态的前提下进行状态参数(如导通压降、门极阈值电压和短路电流等)在线测量,进而在线评估器件状态和寿命预估,是重要的研究方向。现有寿命预测方法有解析、物理模型和数据驱动等方式,涉及电气工程、材料、信息处理和数理统计等学科,难度较高,所以实时工况下的寿命预测是亟待解决的问题。加之寿命与功率模块自身封装结构、工艺流程等均有密切关系,所以在新型封装结构迅速发展的现阶段,探索快速、可靠、准确的寿命预测方法,是器件研究的重要方向。

### 6.2 封装优化与主动热控制

随着第三代半导体技术的迅猛发展,SiC、GaN器件也受到广泛重视。在与硅基器件具有同等性能的同时,SiC、GaN器件具有比硅器件更小的体积,这为功率模块和电力电子变换器的小型化、轻量化以及功率密度的提升带来可能性。但SiC、GaN器件也对高温、寄生参数等表现出高敏感性,导致传统封装形式不能充分发挥出其高频、高温优势,所以需要在设计与实践中往返迭代,探索低杂散参数、高散热性能和高可靠性的功率半导体器件封装理论和方法。同时主动热控制方法在功率器件的应用中变得愈发重要,是解决器件热问题、延长其寿命的有效方法。考虑到SiC、GaN功率器件与硅基器件的温度特性有差异,所以SiC、GaN功率器件的主动热控制方法也有待深入研究。又因为在不同的应用场合中对电能质量的要求不同,如:在并网逆变器中要求电流谐波总畸变率不超过5%,新能源互联网、新能源汽车中要求母线电压稳定等,为了在最大范围内满足电能质量要求,同时对电力电子器件做到最大程度的保护,因此需要量化主动热管理策略与系统自身性能之间的关系,并取得一个良好的折中方案。因此主动热控制方法与系统性能之间的综合评价体系也亟待建立,使得对电力电子系统热管理方法的选择有据可依。

## 7 结语

本文综述了功率半导体器件的主动热管理方法,对不同方法的性能及优缺点进行了深入分析与评价。功率器件的故障机理已逐渐明晰,热相关研究日益成熟,温度管理策略已经取得众多成果并得到实际应用。而器件在线的状态监测和现阶段的封装优化与新型封装结构仍需进一步研究,以确保未来更高性能功率器件能可靠稳定地长期运行。

### 参考文献:

- [1] Yang Shaoyong, Bryant A, Mawby P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters

- [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.
- [2] 袁鹏, 徐冬, 邹志强, 等. 电磁搅拌电源 IGBT 结温检测系统研究与应用[J]. 电工技术, 2023(14): 108-111, 114. Yuan Peng, Xu Dong, Zou Zhiqiang, et al. Research and application of IGBT junction temperature monitoring system for electromagnetic stirring power supply [J]. Electric Engineering, 2023(14):108-111, 114 (in Chinese).
- [3] Shah A, Sammakia B G, Srihari H, et al. A numerical study of the thermal performance of an impingement heat sink-fin shape optimization [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2004, 27(4): 710-717.
- [4] Xie Jiekai, Liu Xiangyun, Zhang Guoqing, et al. A novel strategy to optimize the liquid cooling plates for battery thermal management by precisely tailoring the internal structure of the flow channels [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 184: 107877.
- [5] Xie Jiekai, Wang Ye, He Shuming, et al. A simple cooling structure with precisely-tailored liquid cooling plate for thermal management of large battery module [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 212: 118575.
- [6] 李卫飞. 车用电驱动系统逆变器温升预测建模与散热器翅片优化设计[D]. 合肥: 安徽大学, 2021. Li Weifei. Prediction modeling of inverter temperature rise and optimization design of heatsink fin for vehicle electric drive system [D]. Hefei: Anhui University, 2021 (in Chinese).
- [7] 夏侯国伟, 王当, 刘业鹏. IGBT 功率模块冷却技术的综述[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2017, 42(1): 63-67, 84. Xiahou Guowei, Wang Dang, Liu Yepeng. Summary of IGBT power module cooling technology [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 42(1): 63-67, 84 (in Chinese).
- [8] 方鑫. 填充相变材料以抑制结温波动的功率模块可靠性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021. Fang Xin. Reliability enhancement of power modules by restricting junction temperature fluctuation through increased transient thermal capacity [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021 (in Chinese).
- [9] Shao Weihua, Wu Ruizhu, Ran Li, et al. A power module for grid inverter with in-built short-circuit fault current capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10567-10579.
- [10] Murdock D A, Torres J E R, Connors J J, et al. Active thermal control of power electronic modules [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(2): 552-558.
- [11] Moghassemi A, Rahman S M I, Ozkan G, et al. Power converters coolant: Past, present, future, and a path toward active thermal control in electrified ship power systems [J]. IEEE Access, 2023, 11: 91620-91659.
- [12] 魏云海, 陈民铀, 赖伟, 等. 基于 IGBT 结温波动平滑控制的主动热管理方法综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1415-1430. Wei Yunhai, Chen Minyou, Lai Wei, et al. Review on active thermal control methods based on junction temperature swing smooth control of IGBTs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1415-1430 (in Chinese).
- [13] Wei Lixiang, Mcguire J, Lukaszewski R A. Analysis of PWM frequency control to improve the lifetime of PWM Inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(2): 922-929.
- [14] 吴军科. 非平稳工况变流器 IGBT 模块结温平滑控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. Wu Junke. Study on junction temperature control of IGBT module in power converter under power fluctuation condition [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese).
- [15] 孙建平. 变流器变开关频率 IGBT 模块热特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022. Sun Jianping. Research on thermal characteristics of IGBT module for inverter with variable switching frequency [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022 (in Chinese).
- [16] Luo Haoze, Iannuzzo F, Ma Ke, et al. Active gate driving method for reliability improvement of IGBTs via junction temperature swing reduction [C]// 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems(PEDG). Vancouver, BC, Canada, 2016: 1-7.
- [17] Prasobhu P K, Raveendran V, Buticchi G, et al. Active thermal control of GaN-based DC/DC converter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3529-3540.
- [18] Prasobhu P K, Buticchi G, Brueske S, et al. Gate driver for the active thermal control of a DC/DC GaN-based converter [C]// 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCCE). Milwaukee, WI, USA, 2016: 1-8.
- [19] 陈权, 候书乐, 李国丽, 等. 基于动态 DPWM 的三电平损耗及结温研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(11): 131-

134.  
Chen Quan, Hou Shule, Li Guoli, et al. Research on three-level loss and junction temperature based on dynamic DPWM [J]. Power Electronics, 2023, 57(11): 131-134 (in Chinese).
- [20] 张星. 基于新型热网络模型的逆变器主动热控制策略 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.  
Zhang Xing. Active thermal control of inverter based on new thermal network model [D]. Changsha: Hunan University, 2019 (in Chinese).
- [21] Wang Xubin, Wang Xuemei, Yuan Xun. An optimal DC bus voltage control method to improve the junction temperature of IGBTs in low speed operations of traction applications [C]// 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC). Auckland, New Zealand, 2016: 1-6.
- [22] Deng Weiwen, Zhao Yang, Wu Jian. Energy efficiency improvement via bus voltage control of inverter for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1063-1073.
- [23] Yang Yongheng, Koutroulis E, Sangwongwanich A, et al. Minimizing the levelized cost of energy in single-phase photovoltaic systems with an absolute active power control [C]// 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC, Canada, 2015: 28-34.
- [24] Ma Ke, Liserre M, Blaabjerg F. Reactive power influence on the thermal cycling of multi-MW wind power inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(2): 922-930.
- [25] Falck J, Andresen M, Liserre M. Active methods to improve reliability in power electronics [C]// IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China, 2017: 7923-7928.
- [26] Liserre M, Andresen M, Costa L, et al. Power routing in modular smart transformers: Active thermal control through uneven loading of cells [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2016, 10(3): 43-53
- [27] Yan Hao, Zhao Weiduo, Buticchi G, et al. Active thermal control for modular power converters in multi-phase permanent magnet synchronous motor drive system [J]. IEEE Access, 2021, 9: 7054-7063.
- [28] 陈常乐. 碳化硅逆变器的热观测与热优化控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.  
Chen Changle. Research on thermal observation and optimal control of silicon carbide inverter [D]. Changsha: Hunan University, 2020(in Chinese).
- [29] Wang Xiang, Castellazzi A, Zanchetta P. Regulated cooling for reduced thermal cycling of power devices [C]// Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. Harbin, China, 2012: 238-244.
- [30] Lemmens J, Vanassche P, Driesen J. Optimal control of traction motor drives under electrothermal constraints [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(2): 249-263.
- [31] 陈叶宇. 基于实时温度估测的 PWM 逆变器主动热管理控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.  
Chen Yeyu. Active thermal management control of PWM inverter based on the estimation of real-time temperature [D]. Changsha: Hunan University, 2017 (in Chinese).
- [32] 刘文业, 康力璇, 刘海涛, 等. 高可靠牵引变流器 IGBT 主动结温控制技术[J]. 机车电传动, 2021(5): 115-122.  
Liu Wenye, Kang Lixuan, Liu Haitao, et al. Research on high reliability traction converter IGBT active junction temperature control [J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(5): 115-122 (in Chinese).

---

#### 作者简介:



皇甫宜耿

皇甫宜耿(1987-),男,通信作者,博士,教授。研究方向:新能源与混合动力。E-mail:yigeng@nwpu.edu.cn。

宋少林(2000-),男,中国电源学会学生会员,硕士研究生。研究方向:功率器件可靠性。E-mail:songshaolin@mail.nwpu.edu.cn。

王晓鹏(2000-),男,硕士研究生。研究方向:混合动力无人机能量管理。E-mail:wang\_xiaopeng@mail.nwpu.edu.cn。

李凡(1999-),男,硕士研究生。研究方向:燃料电池建模与能量管理。E-mail:lfan@mail.nwpu.edu.cn。

甘子瑜(2000-),女,硕士研究生。研究方向:功率器件可靠性。E-mail:ganziyu@mail.nwpu.edu.cn。