

风电变流器散热方式分析及展望

徐慧琳

株洲中车时代电气股份有限公司 湖南 株洲 412001

摘要: 全球能源结构正在不断地向着绿色和低碳转型, 风力发电作为一种成熟的可再生能源技术, 装机容量也在持续不断地增长。风电变流器是风电机组中的核心部件, 其可靠性直接决定了整个风电机组的运行效率与寿命。随着变流器功率密度的不断提升, 变流器散热问题也日渐突出, 已成为了阻碍技术发展的关键。本文首先阐明了风电变流器散热的重要性与特殊挑战性; 继而系统地分析了现有主流散热方案的技术原理和优缺点; 在此基础上, 展望了未来散热技术的发展趋势。目的在于为风电变流器散热技术的优化和创新提供一定的理论参考和实践指导。

关键词: 风电变流器; 散热技术; 液冷系统; 相变冷却; 可靠性

引言; 风力发电已成为了推动全球能源革命和实现“双碳”目标的重要力量^[1]。随着风电机组单机容量持续攀升, 作为连接风机叶片与电网的“心脏”的变流器, 正在朝着更紧凑化、更高功率密度与更高可靠性的方向演变。变流器的核心功率半导体器件(如IGBT)在工作时会产生显著热量, 导致其结温上升。功率器件的失效机制与工作温度之间高度相关, 研究表明, 结温每升高10°C, 功率器件寿命将会减少约一半。温度过高不仅会引发材料老化、绝缘性能降低等问题, 还可能会导致器件失效, 造成风电机组非计划停机, 带来巨大的经济损失。因此, 有效的散热管理是确保变流器高可靠性、长寿命运行的前提。本文旨在系统分析梳理现有风电变流器散热技术的原理和优缺点, 并基于技术发展逻辑, 对未来发展趋势进行展望。

1 风电变流器散热的重要性与挑战

1.1 散热的重要性

风电变流器的热量主要来源于功率半导体器件的开关和导通损耗、磁件元件(例如电抗器、变压器等)铜损与铁损、连接母排与线缆上的损耗等。有效散热的价值体现在以下多个方面: 在保障运行可靠性方面, 对于功率半导体器件(如IGBT), 严格的将结温控制在安全区间内, 是防止器件提早失效的根本。对于柜内其他器件, 合理控制器件表面、柜内空气的温升, 也可以有效地防止器件失效, 提升其寿命和可靠性。在提升电能转换效率方面, 低温运行可以有效地降低器件的导通电阻, 减少电能损耗。在优化体积和度电成本方面, 高效的散热可以让器件在更高电流密度下工作, 有助于实现设备的小型化与成本降低。例如, 目前采用液冷冷却方案相较于空气冷却方案, 可以使变流器体积减少30%-40%, 功率密度提高20%以上。

1.2 风电应用中的特殊性挑战

风电变流器的散热面临实际应用中着很多特殊性挑战, 主要包括以下几个方面:

(1) 高功率密度: 为追求更低的度电成本, 同等功率等级的变流器柜体空间尺寸越来越小, 单位体积内所需要散发的热量(即功率密度)越来越大。(2) 恶劣运行环境: 风电机组通常位于沙漠、戈壁、荒漠、海上等环境恶劣地区, 面临着高湿度、高盐雾、沙尘、振动等极端恶劣环境, 因此要求散热系统具备很高的环境适应性。(3) 维护困难: 变流器位于塔筒或机舱内, 维护空间小; 部分海上风电项目可达性差, 且需要等待海上窗口期; 维护成本极高, 因此要求散热系统必须具备极高可靠性和长维护周期。(4) 能效要求: 散热系统本身也是能耗单元, 其自身能耗直接影响了整机效率, 散热系统的自身能耗通常占到变流器总损耗的5%-10%, 优化散热系统的能耗对提高整机效率具有重要意义。

2 现有主流散热方案分析

2.1 空气冷却方案

风电变流器领域使用的空气冷却方案主要有自然风冷、直接强制风冷、空空换热器冷却三种。

自然风冷完全依赖于空气自然对流和辐射效应, 具有结构简单、成本低、无额外能耗、无噪音等优点。但是由于空气的自然对流换热系数很低, 通常只有5-10W/(m²·K), 导致自然风冷方案换热能力极弱。这种散热方式只适用于功率很小的变流器, 在现代兆瓦级风电变流器中基本已经被淘汰。

直接强制风冷是采用轴流风机或者离心风机驱动空气, 使其流经需要冷却的器件表面或者散热器的散热翅片, 通过对流换热原理将热量带走。具有结构简单、成本较低、技术成熟、维护简便等优点。但也存在以下缺点:

其散热效率相对较低,很难满足超高功率密度变流器的需求;轴流风机或者离心风机作为运动部件,可靠性相对较低,需要定期检查维护;系统的开放性设计导致整柜很难做到完全密封,灰尘、盐雾等很容易随着空气进入柜体,削弱散热并且会引发绝缘问题。尽管存在以上缺陷,但因为具有成本优势,直接强制风冷方案目前在很多对成本敏感的陆上中低功率风电机组中仍然有所应用。

空空换热器冷却是一种间接冷却方案,工作原理是通过内部循环空气与外部环境空气之间的热交换来实现散热,如图一所示。具有完全密封防护、维护成本低、环境适应性强、能效较低等优点。但该方案也存在一些局限性,主要包括散热效率相对较低、受环境温度影响较大、风机数量较多等。该方案目前主要应用在“沙戈荒”恶劣环境下的中功率等级变流器。

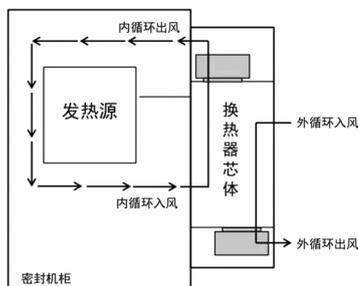


图1 空空换热器冷却循环示意图

2.2 液体冷却方案

液体冷却方案是目前应用最广,技术成熟度高的风电变流器散热方式,已经成为了当前主流的大功率风电变流器解决方案。液体冷却方案是利用冷却液远超空气的比热容和导热系数来进行热量传输,常用的冷却液包括去离子水、水-乙二醇混合液等,其中水-乙二醇混合液因为具有良好的防冻性能(可达 -40°C)和稳定性,应用最为广泛。典型的液体冷却系统主要由冷板、泵、换热器、储液箱、管路及控制单元组成。冷却液在泵的驱动下流经吸收热量的冷板,将热量带走,然后流经换热器,将热量最终传递给外部环境,冷却后的液体再循环使用^[2]。

液体冷却方案的核心优势显著:首先,散热效率很高,同等体积下,散热能力可达到风冷的数十倍,能有效控制大功率器件的温升;其次,可以支持高功率密

度,可以使得变流器的设计更加紧凑、小型化;再次,环境隔绝性好,柜体可以完全密封,可以有效抵御的外部恶劣环境的侵袭,以提高系统的整体可靠性;最后,噪音水平比较低,主要噪音源是风扇和泵,噪音水平低于强制风冷中使用的大量高速风扇。但是液体冷却方案也存在着一些潜在劣势:其系统复杂性很高,初始投资成本较大,维护成本也较高;存在泄漏风险,对管路密封材料与工艺水平要求很高。

2.3 相变冷却方案

相变冷却方案是利用工质相变过程(例如液相到气相)中会吸收大量潜热的原理来进行冷却,主要包括热管技术和沸腾冷却两种形式。

热管技术是一种高效被动传热元件,由管壳、吸液芯和工质组成。工作原理是:在热管蒸发段,工质吸收热量蒸发;蒸汽在压差作用下流向冷凝段;在冷凝段释放潜热冷凝成液体;液体通过吸液芯的毛细力作用返回蒸发段。具有等效导热系数极高、等温性好、无运动部件、可靠性高等优点。但在设计不当时易存在传热极限,而且成本相对较高,目前几乎未在水电变流器冷却中使用,极少数使用也只是作为辅助散热手段。

沸腾冷却是让冷却液在发热表面直接发生核态沸腾,利用汽化吸收大量潜热来带走热量,散热能力极强。但有成本较高、系统集成复杂、压力控制难度高、气体分离问题等缺点。在水电变流器冷却领域的主要应用有相变功率模块、相变换热器等,近年来被作为一种实现水电变流器高防护性能的冷却方案所广泛开发。

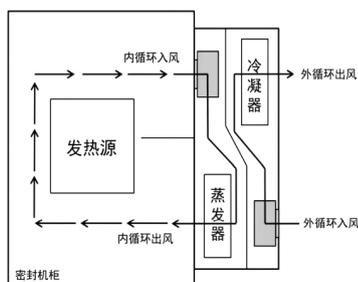


图2 相变换热器冷却循环示意图

2.4 散热性能对比

现有主流散热方案的性能对比可见下表所示:

表1 现有主流散热方案性能对比

特性	空气冷却方案			液体冷却方案	相变冷却方案	
	自然风冷	直接强制风冷	空空换热器冷却		热管技术	沸腾冷却
散热效率	低	中	中	高	极高	极高
功率密度	极低	低	低	高	极高	极高
系统复杂度	低	中	高	高	高	高
初始成本	低	低	高	高	高	高

续表:

特性	空气冷却方案			液体冷却方案	相变冷却方案	
	自然风冷	直接强制风冷	空空换热器冷却		热管技术	沸腾冷却
维护成本	低	中	中	中	中	高
环境适应性	差	差	良	优	良	良
可靠性	高	中	中	中	高	低

3 未来发展趋势与展望

随着风电机组朝向更大容量、更高功率密度方向发展,传统的散热方案已很难满足未来需求。目前,全球功率最大的风电机组“启航号”功率等级已达20兆瓦,为了应对未来更大容量的风电机组需求,散热技术可能会呈现出以下几方面的演进趋势:

3.1 混合冷却技术协同散热

冷却方式各有优劣所在,单一的冷却方式很难在所有运行条件下都表现优异。未来将会是多种冷却方式混合冷却的协同散热时代。

“液冷+热管”协同散热:以液冷为主要散热方式,热管负责处理局部高温区的温升控制或者协助将热量传递到主冷板,这种组合散热方式可以进一步提升散热均匀性和系统可靠性。

“相变浸没+二次液冷”协同散热:将功率模块直接浸没在绝缘相变工质中,通过沸腾吸热,产生的蒸汽在外部冷凝器(由二次液冷循环冷却)中冷凝回流。以这种方式来实现极高热流密度的散热,可能是未来超高热流密度散热的解决方案之一。

3.2 智能化热管理系统

随着大数据、物联网和人工智能技术的逐渐发展,散热系统将会从“被动响应”走向“主动预测”和“智慧管理”。

智能预测模型(MPC):通过建立变流器的热模型,再结合天气预报和机组载荷预测,来提前预测未来一段时间内的变流器发热量,从而实现智能调节泵速、风扇转速等,来实现按需冷却,在保证散热的前提下最大程度降低冷却系统自身能耗。

状态监测与健康管理系统(PHM):在冷却系统中集成温度、压力、流量、液位、电导率等传感器,建立实时状态监测系统。通过对多互感器所收集数据的综合分析,来实现故障的早期预警、冷却液性能评估和预测性维护决策等,以此来提升运行可靠性。

3.3 新材料应用

未来新材料的出现和逐步应用,可能会从根本上改变散热系统的设计理念和性能极限。

碳化硅器件:碳化硅器件具有更高工作结温、更低

开关损耗^[1]。这将会使散热需求从“散去大量热量”变成“散去相对更少的热量但可在更高温度下运行”,将会使系统设计简化,甚至可能会让部分应用场景回归到最原始的风冷方案。

先进导热材料:高导热金属基复合材料(Al-SiC)、导热石墨膜、高性能导热界面材料等,可以有效降低从芯片到散热器之间的接触热阻和传导热阻,以此提升整个热通路的导热效率。

3.4 全生命周期散热设计

散热系统不是一个独立的子系统,而是和电气、结构、电磁兼容等等深度融合,未来的散热系统设计将会使进行系统级的协同设计。

多物理场协同设计:通过三维建模和流体动力学仿真,在设计初期优化布局与流道,以实现更改合理的温升控制。

全生命周期综合成本对比:在进行设计时不仅考虑初始建设成本,而是更综合考量散热系统运行能耗、维护成本和停机损失,来追求全生命周期内的综合成本最低。

结束语

风电变流器的散热技术是保障风电机组高效、可靠、长寿命运行的关键之一。本文的分析表明,直接强制风冷受限于性能劣势,在风电变流器领域的应用可能会逐渐减少;液体冷却方案综合性能占优,目前已经是大功率风电变流器的主流解决方案;而空空换热器冷却和相变冷却方案,因其在高防护风电变流器方面的应用,重要性正在日益凸显。展望未来,风电变流器散热技术将会朝着高效混合化、管理智能化、材料革新化和设计系统化的方向发展。混合冷却技术协同散热、智能化热管理系统、新材料应用以及全生命周期散热设计将会共同推动下一代风电变流器散热技术的突破和发展。

参考文献

- [1]周旺,贺西,李炳樟,等.电压源型全功率风电变流器控制策略研究[J].控制与信息技术,2023(02):40-47.
- [2]张琳琳,罗永金,马根坡,等.风电变流器水冷控制系统优化及设计[J].电工技术,2019(07):45-50.
- [3]盛况,唐苇羽,吴赞.碳化硅功率模块封装及热管理关键技术[J].机车电传动,2023(05):01-09.