

# 风电机组变流模块国产化替换的技术路径分析

李 星

中国大唐集团有限公司辽宁分公司 辽宁沈阳 110000

**摘 要：**当前，风电机组核心部件变流模块国产化程度较低，大量依赖进口导致供应链安全隐患、成本高昂。鉴于此，本文系统分析风电机组变流模块国产化替代的关键技术路径。全文重点叙述变流模块基本原理和主要功能，分析进口模块现实状况、存在问题以及国产化模块发展具体情形，着重探讨国产化替代的关键技术走向，最后突出四条并行发展路径，既依靠自身力量开展研发创新、引入先进技术进行二次创新、促进产业链协同合作。期望本文有助于打破国外技术长期垄断、保证我国风电产业链和供应链稳定安全、增强风电产业核心竞争力、降低风电度电成本、推动风电产业实现健康，助力国家实现“双碳”目标。

**关键词：**风电机组；变流模块；国产化替代；技术方向；路径策略

全球风能理事会（GWEC）2024发布数据显示，全球新增风电装机容量为117GW，创历史新高。这一趋势主要得益于技术进步带来的成本下降、各国对清洁能源政策的支持以及应对气候变化的迫切需求。而我国作为全球最大的风电市场，风电装机规模持续扩大。据国家能源局公布数据报告，截至2024年底，我国风电累计并网装机容量为5.21亿千瓦（约52100万千瓦）。其中，陆上风电4.80亿千瓦，海上风电4127万千瓦，连续多年位居世界首位。然而，在市场规模庞大下，风电机组核心部件变流模块国产化程度仍相对较低。目前高端变流模块市场依旧被ABB、西门子、施耐德等国际巨头垄断，国内企业市场占据份额有限。高度依赖进口带来供应链安全方面隐忧，尤其是在国际形势复杂且多变的背景下，关键部件出现断供的风险不容忽视，同时进口变流模块价格非常高昂，显著增加风电项目初始投资方面的成本，进而削弱风电的市场竞争力。因此，加快推进变流模块国产化替代，不仅是解决当下供应链瓶颈、降低成本的现实需要，更是保障我国风电产业安全稳定发展、提升产业链供应链韧性与安全水平的内在要求，对增强我国风电产业整体竞争力具备长远战略价值。

## 一、风电机组变流模块概述

风电机组变流模块（图1）主要功能是完成电能变换以及控制电机的运行，进而将风能高效转化成电能。

其变流模块工作原理主要涵盖整流和逆变这两个关键环节，在整流环节，变流模块将风轮驱动发电机所产生的交流电转换为直流电，该过程通常是通过由多个二极管或晶闸管组成的整流器来实现，整流器能将交流电转换为稳定直流电<sup>[1]</sup>。在逆变环节，变流模块将直流电再次转换为交流电并通过逆变器输出到电网，逆变器通常由多个IGBT（绝缘栅双极晶体管）组成，能够精准控制输出交流电的频率和电压以适应电网需求。此外，变流模块在风电机组当中的作用不只是电能的变换，还通过控制电机的运行状态来实现风能的最大捕获以及发电效率的最优化，其性能直接影响到风电机组的发电效率、可靠性与经济性，所以在风能转化过程中有着至关重要的作用。



图1 风电机组变流模块（三菱）

## 二、变流模块发展现状

国内风电机组变流模块研发和产业化起步较晚，随着国家对风电产业大力支持以及科技投入不断增加，部

**作者简介：**李星（1984.04-），男，汉，河北邢台人，本科，高级工程师，研究方向：火电技术。

分国内企业例如禾望电气、Woodward、荣信华州等在变流模块领域取得突破，推出具备自主知识产权的高性能变流器产品并在国内风电市场逐步扩大市场份额。其国产化变流模块在技术水平、产品质量和可靠性方面已接近或达到国际先进水平且部分产品实现出口。然而，当前我国风电机组使用的变流模块主要供应商仍是ABB、西门子、施耐德等国际知名企业，进口变流模块存在价格昂贵、供货周期长、售后服务响应慢等问题，对我国风电产业发展造成一定制约。这一现象的主要原因是国内企业在品牌影响力、技术积累和市场认可度方面还需进一步提升。此外，国产化变流模块在高端市场和技术创新方面仍面临核心元器件依赖进口、技术标准缺失等情况。尽管如此，国产化变流模块发展前景广阔，近年来国家政策支持、市场需求增长以及技术不断创新为其发展提供了有利条件。

### 三、国产化替代关键技术方向

#### (一) 电力电子技术

高性能功率半导体器件的研发和应用，以及电力电子电路整体性能的有效提升，功率半导体器件尤其是绝缘栅双极晶体管（IGBT）模块及其驱动电路属变流模块核心，其性能直接决定变流器的效率、功率密度和可靠性。国产化需突破高电压、大电流、快速开关的IGBT芯片设计和制造工艺，以此降低导通损耗和开关损耗并提高工作结温，进而提升整体效率和减少散热需求<sup>[1]</sup>。同时需要研发与之相匹配的高性能栅极驱动电路，确保IGBT能够快速、精确且安全地进行开关。在电路拓扑结构设计方面需要探索更优化的主电路拓扑。例如，可改进的LCL滤波器拓扑、多电平拓扑结构等，从而降低谐波含量、提高功率因数、减小器件电压电流应力并提升系统的功率密度。可通过先进的脉宽调制（PWM）策略如空间矢量脉宽调制（SVPWM）的改进算法，或者采用模型预测控制（MPC）等先进控制方法，精确控制功率器件的开关状态，进一步减小开关损耗和输出波形畸变以及提高能量转换效率。

#### (二) 散热技术

变流模块在运行过程当中功率半导体器件开关损耗和导通损耗会转化成热量致使器件结温升高，有效的散热技术可保障变流模块乃至整个风电机组长期稳定运行。国产化变流模块须攻克高效散热技术方面的难题。目前，常用的风冷技术结构相对简单成本较低，但散热效率受风速影响较大且体积较大。液冷技术如使用水或专用冷

却液散热效率高，但系统结构复杂成本较高且存在泄漏风险。针对国产化变流模块需根据其功率等级、安装空间、成本预算及可靠性要求综合评估来选择合适的散热方案，建议探索采用高导热材料如铜基板、石墨烯复合材料优化热传导路径，设计优化的散热器结构如采用翅片、扰流设计增强对流换热，或者研究将风冷与液冷相结合的复合散热方案。此外建立热模型预测器件在不同工况下的温度分布，并设计智能的温度监控和保护策略，确保变流模块在各种环境温度和负载条件下都能把关键器件的温度控制在安全范围内，进而保障其高可靠性。

#### (三) 电磁兼容技术

国产化变流模块在电力电子变换过程当中会产生较强电磁干扰（EMI），诸如高 $di/dt$ 和 $dv/dt$ 所引起的共模和差模干扰情况，不仅影响变流模块自身控制系统稳定性，还对电网里其他设备以及风电机组内部敏感电子设备造成干扰。具体而言，针对传导干扰需要在直流侧和交流侧设计有效的EMI滤波器，合理选择电感、电容参数并优化其布局<sup>[3]</sup>。针对辐射干扰需通过合理的结构设计、屏蔽措施如屏蔽罩、屏蔽电缆以及良好的接地设计来抑制。在提高抗干扰能力方面，需加强元器件的选择与布局工作，采用滤波、隔离、屏蔽等手段提高系统的EMS性能，确保控制单元和敏感电路在复杂电磁环境中能稳定工作，确保其满足相关的标准要求，保障风电机组乃至整个电力系统的安全、稳定运行。

### 四、风电机组变流模块国产化替换路径

#### (一) 自主研发创新

要实现风电机组变流模块的国产化替换，自主研发创新是根本动力，意味着要彻底摆脱对国外技术依赖，相关企业应当将自主研发放在战略核心位置上，显著加大研发资金投入量，确保持续资金流支持长期技术攻关工作。同时还需要积极构建高水平专业化研发团队，吸纳和培养电力电子控制理论等领域顶尖人才。同时，开展产学研合作，通过和高校科研院所的紧密联动，能加速基础研究成果向工程应用转化，共同攻克相关技术难题<sup>[4]</sup>。此外，需制定长远技术发展规划，聚焦关键瓶颈技术进行持续不断投入，建立容错机制用来鼓励创新探索活动，探索多元化融资渠道缓解资金方面压力。并通过标准化模块化设计等方法缩短研发周期，降低产品研发成本。

#### (二) 技术引进吸收再创新

在目前自主研发能力还存在不足阶段，通过技术引

进、消化吸收再创新是实现国产化替换现实可行且效率较高的路径，其核心是“引进”作为手段而“再创新”是目标。技术引进的方式多样，可通过购买国外成熟技术许可证或专利来快速获得先进技术方案。也可与国外技术领先企业或研究机构建立合作关系共同开展研发项目并在合作中学习先进技术。值得注意，在技术引进过程中须高度注意知识产权保护，要明确技术许可范围和保密义务以避免陷入侵权纠纷。同时，要充分评估引进技术的“技术适配性”，系统判定引进技术是否与国内原材料供应、生产工艺水平、成本控制要求以及实际运行环境如电网条件、气候条件相匹配。并在对引进技术深入理解和掌握基础上结合国内实际情况和市场需求进行二次开发和创新优化，让其更符合国情、提升性能、降低成本，最终形成具有自主特色和核心竞争力的国产化产品<sup>[5]</sup>。

### （三）产业链协同发展

风电机组变流模块国产化替换属于系统工程需要全产业链协同配合，上游原材料与零部件供应是整个国产化替换工作的基础支撑。目前，国产化变流模块需要大量硅钢片等原材料以及IGBT芯片等关键零部件，然而国内上游产业存在部分关键原材料质量不稳定、高端零部件依赖进口、生产工艺存在差距等问题。建议建立长期稳定的原材料与零部件供应关系并与优质供应商结成战略伙伴，鼓励上下游企业共同研发关键原材料和零部件产品，通过产业基金以及税收优惠等方式支持上游企业进行技术改造和产能升级。其中，中游变流模块制造是国产化替换工作的核心环节，制造企业在生产工艺、质量控制、自动化生产以及生产规模等方面存在提升空间，需引进先进的生产设备与检测仪器以提升生产效率和产品一致性，健全质量管理体系从而确保产品质量可靠，通过规模化生产降低生产成本以实现规模化、标准化、高质量生产目标。下游风电整机集成与运维是国产化变

流模块的应用终端，企业需针对国产化模块与整机的兼容性、性能匹配度以及长期可靠性，运维企业关注模块的易维护性等相关问题，建立信息共享平台以促进上下游企业间的技术交流，开展联合技术培训与认证活动，共同制定运维标准和规范并优化运维策略以提高风电系统运行效率和可靠性。

### 结束语

本文认为，当前风电机组变流模块国产化程度低、依赖进口严重，可从电力电子、控制、散热、电磁兼容等关键技术进行创新发展。通过自主研发创新、技术引进吸收再创新、产业链协同发展，保障供应链安全，降低成本，提升我国风电产业竞争力，助力“双碳”目标实现。展望未来，随着加大政策扶持力度，鼓励企业加大研发投入，将进一步推动国产化变流模块的应用推广。

### 参考文献

- [1] 陈海军, 宫伟, 张锐, 等. 关键环境因素对风电机组输出功率的影响[J]. 船舶工程, 2023, 45(S02): 5-12.
- [2] 侯焱. NBT器10929—2022《风力发电机组可靠性技术规范》标准解析变流[J]. 电器工业, 2024(3): 19-21.
- [3] 杨培文, 李洪涛, 杨锡运, 等. 风电机组技术现状分析及未来发展趋势预测[J]. 电力电子技术, 2020, 54(03): 79-82.
- [4] 朱艳丽, 徐艺博, 王聪杰, 杨凯, 张明杰. 不同荷电状态磷酸铁锂电池热失控温度与产气特性分析[J]. 安全与环境学报, 2024(01).
- [5] 宋来丰, 梅文昕, 贾壮壮, 王青松. 绝热条件下280 Ah大型磷酸铁锂电池热失控特性分析[J]. 储能科学与技术, 2022(08).