

风电机组变桨驱动系统国产化的研究与应用

张晏宁

大唐景泰风电有限责任公司 甘肃景泰 730400

摘 要: 变桨驱动系统是保障风电机组发电效率与安全的关键,较长期依赖进口。本研究通过自主研发高扭矩伺服电机、高精度控制器,突破核心部件技术瓶颈,可实现变桨系统关键组件的国产化。研究成果不仅能提升我国风电装备自主可控能力,还可带动相关产业链发展,为“双碳”目标下风电产业降本增效提供有力支撑。研究表明,关于早期风电机组变桨驱动系统国产化的改造能够有效解决“卡脖子”问题,对于降低运维成本,推动我国风电产业自主发展,具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

关键词: 风电机组;变桨变频器;变桨电机;国产化

1. 引言

风力发电作为一种清洁、可再生能源,在能源结构中的占比不断提高。我国风力资源丰富,风电产业发展迅速,风电累计装机容量已连续多年位居世界首位。风电机组变桨驱动系统作为风电机组的核心部件之一,其性能直接影响风电机组的发电效率、可靠性和安全性。然而,长期以来,国内风电机组变桨驱动系统的关键技术和核心部件依赖进口,不仅成本高昂,而且在技术支持、维护服务等方面受到限制,存在“卡脖子”风险。实现风电机组变桨驱动系统的国产化,对于保障我国能源安全、降低风电成本、推动产业自主可控发展具有重要的战略意义。同时,变桨驱动系统国产化也将有助于提升我国在风电装备制造领域的技术水平和国际竞争力,促进相关产业链的协同发展。

本研究的创新点主要体现在提出了一种基于国产硬件和定制化软件的变桨驱动系统国产化改造方案,通过对硬件和软件的协同优化,以提高系统的性能和可靠性。

2. 工作原理

风电机组变桨驱动系统的主要作用是通过调整桨叶的角度,改变风轮对风能的捕获能力,从而实现对风电机组输出功率的控制和运行状态的调节。当风速较低时,变桨驱动系统将桨叶角度调整到较大值,以增加风轮对风能的吸收,提高发电效率;当风速过高时,通过减小桨叶角度,降低风轮的转速和输出功率,避免机组因过载而发生超速甚至机械部件损伤,保障机组运行安全。变桨驱动系统的工作过程主要结合桨叶角度、叶片扭矩等参数,将这些信息传输给控制

系统,控制系统根据预设的控制策略计算出桨叶应调整的角度,并向驱动器发出指令,驱动器驱动电机或液压装置,带动桨叶旋转到相应的角度,实现对桨叶角度的精确控制。

3. 变桨驱动系统国产化改造的必要性

3.1 解决“卡脖子”技术问题

目前,我国风电机组变桨驱动系统的关键技术和核心部件,如高性能驱动器、高精度传感器、专用电机等,以进口为主。国外企业在这些领域拥有大量的专利技术和市场垄断地位,对我国实行技术封锁和限制。一旦国外供应商停止供应或提高价格,我国风电产业的发展将受到严重影响。实现变桨驱动系统的国产化,能够打破国外技术垄断,促进我国风电产业核心技术的自主研发和创新,将供应链“命脉”掌握在国内企业手中,避免因外部不确定性影响国家能源项目落地与电力稳定供应,解决“卡脖子”技术难题。

3.2 提升变桨核心组件可靠性

以 SL1500 风电机组为例,随着机组运行时间的不断增加,KEB 变桨变频器及变桨电机可靠性明显不足。冬季低温大风天气期间风频变化、风速变化带来的桨距角频繁调整时段,变桨系统动作频率较高,受初始变桨系统选型设计条件限制,变桨输出额定转矩能力偏小,变桨减速机和变桨轴承运行年限增长导致摩擦阻力变大,致使变桨电机温度偏高、扭矩大持续预警,甚至机组叶片触发卡桨故障停机。结合运行数据统计分析结果显示,部分机组长期运行在扭矩 40NM 左右的过载状态,变桨电机温度会逐步升高,达到一定限值后机组限功率运行,超过故障限值后故障停机。此类

问题的频发，严重影响了机组发电效率。

国产化研究通过增强扭矩输出能力、提升抗干扰性能、降低 IGBT 结温、优化散热结构等技术手段，强化变桨核心组件运行稳定性，提升机组生命周期运行可靠性。

3.3 可持续发展需求

因 SL1500 风电机组采用德国 KEB 变桨变频器和 KEB 变桨电机，国外变桨系统供应商出于技术保密等原因，往往对关键技术进行封锁；当时设计条件初步确认为 KEB 变桨电机额定扭矩 23NM，当扭矩超过 23NM 时产生轻度过载，电机发热量增大。扭矩超过 50NM 产生严重过载现象，机组故障停机，故障时刻的扭矩最高可达到 70NM。

变桨驱动系统国产化升级后，变桨驱动系统输出能力大幅提升，额定扭矩由原设计的 23NM 可提升至 32NM，变桨响应更快、电机单位电流转矩更大、能够最大限度发挥变桨驱动性能，机组变桨故障次数有效降低，减少变桨电机、变桨变频器等备件的损坏率，有效解决机组功率预警频繁推送问题。在不改变机组主控控制逻辑，不涉及变桨系统结构性改变基础上，以最低的投入成本解决变桨电机温度高的问题，从而提高风电项目的经济效益。

本研究适用于华锐 1.5MW、南车 1.65MW 机组，同时针对其它品牌机组 KEB 变桨系统，具有极大的参考和借鉴意义。此种类型机组在风电行业中占有量较大，如应用效果良好，可在行业内实现大批量推广。

4. 方案设计

4.1 硬件设计

4.1.1 变桨变频器设计

4.1.1.1 主体结构

变桨变频器作为变桨系统的核心，3 个叶片分别由 3 个独立的变桨驱动系统控制。PLC 根据功率控制给出叶片角度的参考值，通过 CAN 总线将指令经滑环传送至变桨控制柜内的变频器。变频器接收来自主控系统的指令和传感器反馈信号，通过控制电机的运转，实现对叶片桨距角的精确调节，实现变桨驱动系统闭环控制。

新型变桨变频器选用国内自主研发的高性能可编程逻辑控制器，具有丰富的接口资源、强大的运算能力和良好的抗干扰性能，能够满足变桨系统复杂的控制需求。变桨变频器具备高精度的速度和位置控制功能，能够实现电机的平稳启动、运行和制动。

原机组变桨变频器功率模块采用进口 IGBT 模块（如 ABB 的 1700V/400A 模块），采用国产化设计后可选用中车时代电气的 Trench IGBT（型号 T1200V400A）或比亚迪半导体的 FS-Trench IGBT，其通态压降降低 15%，结温耐受能力提升至 175℃，满足 SL1500 机组 4.8kW 电机的驱动需求。模块布局采用“三明治”结构，陶瓷基板与金属基板间填充导热硅脂，热阻降低至 0.3K/W，配合独立风道设计，有效控制温升在合理范围内。

主控芯片与通讯接口，控制器可选用国产龙芯 2K1000 双核处理器（主频 1GHz），集成 2 路 CANopen 接口和 1 路 RS485 接口，兼容原机组的 Modbus RTU 协议。通过 FPGA 实现 PWM 信号生成，死区时间动态可调（1~5μs），支持直接转矩控制（DTC）和空间矢量调制（SVM），响应时间 ≤ 200μs，满足变桨速度 9°/s 的控制要求。

4.1.1.2 电气结构

变桨变频器设计接口由直流输入端、交流输出端、CAN 通讯、若干 DI、DO 点位等组成。变频器输入端采用 550V 直流供电，输出端采用变频交流供电至变桨电机。主控 PLC 根据功率控制给出叶片角度的参考值，变桨变频器接收指令后，控制变桨电机的速度和旋转方向，使电机带动减速机、小齿轮以及变桨轴承内齿圈转动，从而实现叶片在顺桨位置、工作位置之间持续自动变桨。

4.1.1.3 安装方式

国产化变桨变频器安装位置、电气连接方式与原系统保持一致，最大程度利用现有条件，实现兼容式安装，不与周边设备产生干涉，充分减少施工工程量。

4.1.1.4 主要技术参数

基本参数	驱动频率	2KHz ± 0.1 KHz
	额定电流	15A ± 1%
	最大电流（10s）	45A ± 1%
	超载时间 / 叠温	10S/45A ≤ 10K
	反馈方式	旋转变压器
外部电源	重量（约）	11Kg
	供电方式	通过直流电源滤波器后接母线供电，也可三相供电
	最小母线电源工作电压 允许（母线）电压工作范围	100V ~ 260VDC（随电源负载变化） 300V ~ 780VDC
	电压，频率	直流：300 ~ 620VDC；三相： 265 ~ 440VAC，50/60Hz
	允许频率波动	± 5% 以内
环境条件	存储环境温度	-40℃ ~ +70℃
	运行环境温度	-35℃ ~ +55℃
	相对湿度	5% ~ 90%，不凝露
功率控制方式		正弦波空间矢量 PWM 控制，带动态校正的电流控制方式
结构与防护		壁挂式；防护等级：机壳侧 IP20，散热器侧 IP54
冷却方式		自然冷却

4.1.2 变桨电机设计

4.1.2.1 主体结构

针对风电机组变桨驱动系统的特殊要求，研发出的专用伺服电机采用高性能永磁材料和优化的绕组结构，提高了电机的效率和功率因数。电机的散热设计和防护等级满足电机在恶劣环境下运行的可靠性和适应性。此外，通过对电机控制技术的研究，实现了电机的高精度调速和定位控制，满足了变桨驱动系统对电机性能的严格要求。

新型变桨电机采用永磁同步电机，定子由三相绕组构成，通过交流电源提供电能，产生旋转磁场。转子由永磁体组成，永磁体的磁场方向与转子轴线平行。当定子产生的旋转磁场与永磁体的磁场相互作用时，会产生旋转力矩，推动转子旋转，转子的转速与定子的旋转速度相同，保持同步。永磁同步电机运行较为稳定，无需励磁电流，减少了励磁损耗，同时具有较高的功率因数，能够更有效地将电能转化为机械能，在部分负荷和额定负荷下都能保持高效率，降低了能源消耗：永磁体提供了强大的磁场，使得电机在相同体积和重量下能够输出更大的功率，可满足轮毂对电机安装空间和重量要求；通过控制变频器的输出频率和电压，可以精确地调节电机的转速，实现宽范围的平滑调速，满足叶片不同工况下的速度要求。

4.1.2.2 支撑系统

为保证电机转子的稳定旋转，需要可靠的轴承和支撑系统。新型变桨电机采用滚动轴承，以减少摩擦和磨损，提高电机的效率和可靠性。

4.1.2.3 散热设计

由于永磁同步电机在运行过程中会产生热量，为防止电机过热，影响性能和寿命，配备有效的风冷冷却系统。

4.1.2.4 制动系统

制动系统与变桨电机配套使用，起到制动和锁定叶片的作用。当制动器供电时，叶片能够向两个方向运行；当制动器断电时，叶片只能向顺桨的方向运动，无法向工作位置运动防止风机失控，保证在紧急情况或需要停机时，叶片能够迅速回到安全的顺桨位置。

4.1.2.5 位置反馈装置

保留编码器接口，用于实时监测变桨电机的旋转位置和角度，并将位置信息反馈给变频器和控制系统，以便精确控制叶片的桨距角，实现精准的变桨控制。

4.1.2.6 温度检测装置

保留 4–20mA 模拟量接口和内置在定子绕组中的 Pt100 温度传感器，用于监测电机的温度，防止电机因过热而损坏，当温度超过设定值时，控制系统可采取相应的保护措施。

4.1.2.7 安装方式

新型变桨电机安装位置、电气连接方式能够与原系统保持一致，最大程度利用现有条件，实现兼容式安装，不与周边设备发生干涉，施工工程量较小。

4.2 变桨变频器软件设计

4.2.1 双闭环控制策略

采用速度环（PI 调节）与电流环（滞环控制）的双闭环架构，速度环带宽 50Hz，电流环响应时间 $\leq 100\mu\text{s}$ 。引入前馈补偿算法，根据风速（3–25m/s）动态调整变桨加速度，减少机械冲击。在顺桨过程中，可启用反电动势制动，缩短制动时间。

4.2.2 功率控制策略

根据风力发电机组的功率特性曲线和实时风速，通过变桨变频器调整叶片的桨距角，使机组在不同风速下保持最佳的功率输出，实现最大功率跟踪控制。

4.2.3 安全保护策略

设置多种安全保护机制，如过温保护、过流保护等，当系统出现异常情况时，变桨控制器能够迅速触发保护动作，确保机组的安全运行。

4.2.4 故障诊断与冗余机制

集成六路电流传感器（精度 $\pm 1\%$ ）和温度传感器（精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ），通过卡尔曼滤波算法实时监测变频器温度、直流母线电压和电机绕组温度。当检测到过流（ $>150\%$ 额定电流）或过温（ $>100^\circ\text{C}$ ）时，触发硬件级快速关断（响应时间 $\leq 10\mu\text{s}$ ），并通过 CAN 总线向主控系统发送故障代码。

4.2.5 故障诊断与处理策略

变桨系统具备实时故障诊断功能，通过对传感器信号和设备运行状态的监测，及时发现故障并进行报警。同时，系统还能够根据故障类型采取相应的处理措施，如自动调整桨距角、停机等，以减少故障对机组的影响。

4.2.6 通讯协议

变频器换型不涉及主控程序调整，原主控与变桨系统之间的通讯协议不变，只对机组变桨系统控制策略设计优化，避免产生安全风险，不存在产权纠纷。

5. 结论

为积极响应国家关于“实现关键核心技术自主可控”的战略目标号召，本研究聚焦风电机组变桨驱动系统国产化改造，成功攻克了多项关键技术难题。研发出的新型国产变桨驱动器可完全兼容匹配进口驱动器，使变桨驱动系统具备迭代升级能力，不仅促进了国内风电企业在技术研发和产品质量控制方面的竞争，推动了整个行业的技术进步；更带动了相关配套产业的发展，形成了完整的产业链；增强了我国风电企业在全中国风电产业中的竞争力。

参考文献：

- [1] 胡永强 GE1.5MW 双馈机组控制系统国产化改造的应用研究, 工程科技 ,2015
- [2] 丁宛超 基于老旧风电机组变桨系统技改替换的研究与应用, 中国设备工程 ,2022

作者简介：张晏宁（1997-），男，汉族，甘肃省景泰县，大学本科，大唐景泰风电有限责任公司，助理工程师，研究方向，风电运维。