

基于TwinCAT3的潮流能机组控制系统设计

毛杨杰 李 嘉

杭州林东新能源科技股份有限公司 浙江 杭州 310051

摘要: 能源自主是国家安全与社会经济发展的核心保障, 双碳战略有效提升了我国能源体系安全性。潮流能储量丰、密度高、可预测, 是重要海洋可再生能源。本文基于TwinCAT3平台, 以CX5130-0135控制器为核心, 搭建潮流能机组控制硬件平台, 采用状态机模式、MPPT控制与自动变桨策略, 实现机组高效稳定运行。同时对比分析潮流能与风电的特性差异, 优化控制方案。该研究提供了完整控制系统技术方案, 对推动我国潮流能发电产业化发展意义重大。

关键词: TwinCAT3; 潮流能发电; 永磁同步电机; 控制

0 引言

潮流能为潮汐海水动能, 我国理论装机容量1400万kW, 以浙江舟山、福建平潭海域为主^[1]。潮流能机组以水平轴机型为主, 是主流研发方向。英国SeaGen、我国LHD-L-1000型机组相继投运, 技术突破明显, 但控制技术较风电仍显滞后。传统控制器功能单一, 而TwinCAT3实时性强、扩展性好, 本文基于该平台设计潮流能机组全流程控制系统, 为其可靠运行提供技术支撑, 具重要工程价值^[2]。

1 潮流能研究内容

1.1 潮流能发电技术发展现状

国外潮流能发电技术起步早、发展成熟, 英国处于行业领先地位, MCT、ATKearney等企业推出多款主流发电装置, 法、德、挪威等国也形成多元技术路线^[3]。我国潮流能发电系统性研究起步较晚, 但近十年发展迅猛, 高校与企业协同推进机组研发, 2016年浙江舟山兆瓦级潮流能发电场投运, 标志国内步入规模化发展阶段。

相较于风电机组, 潮流能机组控制技术研究仍相对滞后, 其水下运行环境恶劣、安装运维难度大, 对控制系统可靠性要求极高, 研发适配潮流能发电特性的控制系统, 具备重要工程应用价值。

1.2 潮流能与风力发电的区别

潮流能与风力发电同属可再生能源发电, 能量转换原理、机组结构相近, 但核心差异显著, 是控制系统设计的关键依据:

- (1) 能量载体: 海水密度是空气的800余倍, 潮流能能量密度远高于风能, 机组发电效率更优;
- (2) 运行环境: 潮流能机组水下运行, 需抵御海水腐蚀、海洋生物附着、垃圾缠绕, 运维难度大幅提升;
- (3) 运行特性: 风电机组靠偏航系统对风, 潮流流

向周期性反转, 无需偏航, 对变桨系统性能要求更高;

(4) 能量预测: 潮流周期性规律显著, 可精准测算, 更利于电网调度与运维规划;

(5) 防护要求: 机组需满足水下密封防水、水压耐受及应急监测控制要求。

2 系统总体设计

本潮流能发电控制系统采用分层分布式架构, 由上位机SCADA监控层、现场PLC控制层和部件设备传感器执行驱动层三部分组成。系统架构设计遵循开放性、稳定性、可扩展性原则, 采用模块化设计和面向对象控制方法, 便于后期维护、升级、功能扩展。

2.1 系统架构设计

(1) 上位监控层: 设于陆上集控中心, 通过SCADA平台实现机组远程监控、数据管理、故障报警与运维调度;

(2) 现场控制层: 以德国倍福CX5130-0135嵌入式控制器为核心, 运行TwinCAT3实时系统, 负责逻辑控制、算法执行、故障保护等核心功能;

(3) 设备驱动层: 涵盖变流器、变桨驱动器、各类传感器等, 通过EtherCAT总线与控制器连接, 实现数据上传与指令接收。

2.2 通信网络设计

系统采用多协议结合的通信方案: 现场设备层采用EtherCAT总线, 通信周期达250 μ s, 满足系统实时性要求; 控制器与变流器、变桨系统采用CANopen协议通信, 实现精准控制; 上位机与现场控制器通过TCP/IP协议通信, 适配远程监控需求。

2.3 控制器选型

控制器是潮流能机组控制系统的关键电气元件, 其性能关系到整个控制系统的稳定和运行效果。本系统选

用德国倍福CX5130-0135嵌入式控制器作为CPU核心控制单元。

CX5130是倍福公司推出的一款高性能嵌入式控制器，搭载Intel Atom多核处理器，时钟频率1.75 GHz，具有强大的数据处理能力。该控制器内置TwinCAT3实时操作系统，可以实现微秒级的任务调度和中断响应，满足高速控制应用的需求。

3 硬件系统设计

选用永磁同步发电机作为能量转换装置，其无需外部励磁、效率高、功率密度大，运行转速范围宽，可适配潮流能流速波动的运行特点，满足机组高效稳定发电需求。

3.1 发电机选型

发电机是潮流能发电机组的最核心能量转换子系统，其性能直接影响机组的发电效率和工作可靠性。本系统选用永磁同步发电机（PMSG）作为能量转换装置。

永磁同步发电机使用永磁体励磁，无需外部励磁电源，具有效率高、功率密度大、可靠性好等优点。与双馈异步发电机相比，永磁同步发电机在全功率变流器控制下可以实现更宽的转速运行范围，更适合潮流能发电机组流速不断变化的运行需求。

本系统采用的永磁同步发电机主要技术参数如下：

额定功率：1600 kW

额定电压：690 V

额定转速：380rpm

极对数：8对

额定频率：50 Hz

功率因数：0.97

绝缘等级：F级

防护等级：IP54

冷却方式：水冷

3.2 变流器选型

采用国产全功率变流器，基于三电平NPC拓扑，具备效率高、谐波含量低、动态响应快等优势，实现发电机控制、功率调节、并网脱网及故障保护功能，通过CAN总线与控制器完成指令与状态信息交互。

3.3 变桨系统选型

变桨系统集成驱动、电机、传感等模块，采用两层控制架构，实现系统级、单轴级协同控制，通过CAN总线完成桨距角精准调节，兼顾功率捕获效率与机组运行稳定性。

3.4 安全链设计

采用倍福软安全链作为机组最后一道安全屏障，采

集急停、振动、超速、设备故障等安全信号，通过内部安全CPU逻辑判断，触发对应停机动作。系统设置正常停机、电网故障停机、变桨故障停机、安全停机、紧急停机五种停机模式，依托CASE语句实现状态切换，执行对应顺桨、脱网等停机逻辑，全方位保障机组安全。

4 控制系统软件设计

控制程序软件是实现机组智能运行的核心，TwinCAT3平台提供了强大的软件开发环境，支持IEC 61131-3标准编程语言，还支持C++、Matlab等高级语言，让控制程序向高级语言一样面向对象、使用了接口和继承，倍福TcWind架构大大提升了机组程序开发的效率。本章详细介绍控制系统软件的配置的主要功能模块和控制算法。

4.1 运行模式设计

潮流能发电机组的运行模式管理是控制程序的重要功能之一。根据机组的不同运行状态，本系统定义了以下主要运行模式，他们都继承自IOperationMode接口，如表1。

表1 机组运行模式

模式代码	模式名称	说明
OpMod_Ini	初始化模式	系统上电后的初始化过程，包括自检、通信建立、参数加载等
OpMod_Stb	待机模式	系统初始化完成，等待启动命令的状态
OpMod_Srv	服务模式	用于现场调试和维护，可手动控制各子系统
OpMod_DirRev	换向模式	根据涨潮还是退潮调整桨叶运行角度范围功能。
OpMod_Str	启动模式	执行启动流程，包括预充电、励磁建立、转速攀升等
OpMod_CutIn	切入模式	启动后变桨先开桨到一定位置，当叶轮转速偏差满足条件后继续开桨到最优转矩角运行
OpMod_Prd	发电模式	已并网发电状态，执行功率控制
OpMod_AnyStop	任意停机模式	如果有故障停机，执行停机后把运行模式切换到停机流程

各运行模式之间按照一定的逻辑条件进行转换，模式转换条件包括时间条件、状态条件、人工干预等多种因素。模式管理采用状态机实现，每个扫描周期根据当前状态和转换条件确定下一状态。

4.2 停机模式设计

停机模式用于保障机组安全平稳停机与故障保护，系统按触发原因与紧急程度设置多级停机模式：

正常停机（eTcWStpMod_Nrm）：调度或手动停机，缓慢收桨并保持MPPT，转速/功率低于阈值后脱网，冲击最小。

电网故障停机 (eTcWStpMod_Grd): 电网异常时快速收桨、停止MPPT, 实现快速停机脱网。

变桨故障停机 (eTcWStpMod_Pit): 变桨卡桨时退出MPPT, 执行EFC紧急顺桨, 防止飞车。

安全停机 (eTcWStpMod_Sft): 严重故障时快速收桨, 变流器转矩闭环切开发并斜率降零, 转速/功率达标后脱网。

紧急停机 (eTcWStpMod_Emg): 人工急停触发, 动作同安全停机, 实现最高优先级强制停机。

4.3 转矩控制算法

最大功率跟踪 (MPPT) 是目前风电系统上和潮流能发电控制的主流技术之一。由于潮流能的能量密度高、变化相对规律, 通过最大功率跟踪控制可以使机组在不同的流速条件下始终保持最优运行状态, 从而实现能量获取效率最大化。

工业上应用最为广泛的MPPT控制方法为最优转矩增益法。该方法基于潮流能叶轮的功率特性, 叶轮捕获的功率与转速的三次方成正比, 因此最优电磁转矩设定值与转速的平方成正比:

$$T_g = K_{opt} \times \omega^2 \quad (1)$$

式中: T_g 为发电机电磁转矩设定值 ($N \cdot m$); ω 为发电机角速度 (rad/s); K_{opt} 为最优转矩增益系数

K_{opt} 系数需要根据叶轮的水动力特性和传动链参数确定, 计算公式为:

$$K_{opt} = \frac{1 \times \rho \times A \times C_{p_opt} \times R^3}{2 \times (\lambda_{opt} \times i^2)} \quad (2)$$

其中: ρ 为海水密度 (kg/m^3); A 为叶轮扫流面积 (m^2); C_{p_opt} 为最优功率系数; R 为叶轮半径 (m); λ_{opt} 为最优叶尖速比; i 为齿轮箱传动比。

本系统通过FB_TorqueControl功能块实现转矩控制功能, 采用PID控制器实现发电机转速的闭环控制。控制器根据当前转速与最优转速的偏差, 计算转矩补偿值, 然后与最优转矩相加得到最终的转矩设定值。

在低流速区域, 转矩控制使叶轮尽可能加速以接近最优转速点; 在高流速区域, 当转速达到限值时, 转矩控制转为功率限制模式, 防止机组过载损坏。

4.4 变桨控制设计

变桨桨距角控制是潮流能机组功率调节的核心手段, 主要实现功率控制、启动控制与紧急停机控制。

系统采用系统级+单轴分层控制架构: 系统级依据机组运行状态与功率偏差, 计算总桨距角需求, 通过调节桨距角大小, 稳定机组发电功率, 使其维持最优运行状态; 单轴控制由变桨驱动器内置PLC执行, 接收主控制器

位置指令, 通过位置闭环精准调控桨距角, 同时集成过载、限位、限速等保护功能, 保障变桨系统安全运行。

4.5 变流器控制设计

变流器是发电机与电网电能转换的核心, 控制程序采用状态机与需求控制分离架构, 包含状态管理与需求控制两大功能块。

变流器启停遵循严格时序逻辑, 依次完成直流预充电、功率模块使能、母线电压建立、机侧并网、网侧并网等步骤, 保障启动安全可靠。

4.6 安全链控制

基于TwinSAFE功能块开发安全链控制程序, 实时监测全系统安全信号, 触发故障时执行顺桨、停机、报警等联动保护动作, 同时记录故障运行数据, 为后续故障排查与分析提供支撑。

5 潮流能与风力发电控制差异化设计

5.1 功率与环境差异

海水密度远高于空气, 潮流能能量密度大幅领先, 机组发电效率更具优势; 潮流能机组水下运行, 需做好防腐、防附着设计, 同时增设漏水、气体、振动等环境监测与应急保护逻辑, 环境适应性要求更高。

5.2 控制策略差异

启动控制上, 部分潮流能机组需变流器辅助启动; 最大功率跟踪与功率限制环节, 因潮流能能量密度高、功率变化快, 对控制响应速度要求更高; 新增潮流流向判断与换向运行控制, 并网控制时序也与风电存在差异。

6 结语

本文完成基于TwinCAT3的潮流能机组控制系统设计研究, 主要结论如下: 以倍福CX5130-0135控制器为核心搭建完整硬件平台; 采用分层分布式架构, 依托EtherCAT总线满足系统实时性需求; 软件通过状态机实现机组多模式顺畅切换; 运用最优转矩增益法实现最大功率跟踪, 采用统一变桨策略兼顾发电效率与运行稳定性; 明晰潮流能与风电核心差异, 为控制策略设计提供理论支撑。

本研究为潮流能机组控制设计提供完整技术方案, 助力其产业化发展, 未来潮流能发电将在清洁能源体系中发挥重要作用。

参考文献

- [1] 林东, 姜芳, 甘敏, 等. 海洋潮流能涡轮水轮机保护系统的研究[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(06):63-66.
- [2] 李伟, 史宏达, 刘臻, 等. 中国海洋能研究现状及未来发展建议[J]. 太阳能, 2024, 7:79-88.
- [3] 白杨, 杜敏, 周庆伟, 等. 潮流能发电装置现状分析[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(03):57-63.