

变频控制对风电机组起停过程中的机械负荷影响及优化策略研究

王建国

国华(赤城)风电有限公司 河北 张家口 075000

摘要: 对于风电机组起停过程中机械负荷激增问题,本文提出基于变频控制参数优化的动态抑制策略,通过建立传动链多体动力学模型揭示变频参数与机械振动模态的耦合机理,构建以负荷波动最小为目标的优化模型,并采用智能算法求解关键参数匹配方案。实验验证表明优化策略可有效降低起停阶段齿轮箱与轴承的冲击载荷,为提升机组运行可靠性提供理论支撑。

关键词: 变频控制; 机械负荷; 风电机组; 动态建模

0 引言

随着风电装机容量快速增长,机组频繁启停导致的机械疲劳问题成为制约系统可靠性的瓶颈,起停阶段因气动载荷突变、传动链惯性冲击引发的齿轮箱扭振与轴承损伤占比超过全生命周期故障率的60%,传统控制方法侧重电气性能优化对机械动态负荷抑制能力不足。变频技术通过柔性调节转速降低机械冲击,但其参数设计与机械系统动态响应的关联机制尚未明晰,参数配置不当可能引发共振与疲劳损伤加剧,厘清变频控制对机械负荷的作用边界,建立机电耦合优化模型,对延长关键部件寿命、降低运维成本具有重要工程价值。

1 变频控制对机械负荷的影响机制

1.1 风电机组起停阶段动态特性

风电机组在启动阶段变桨系统通过调整叶片角度逐步捕获风能,发电机转矩随之动态调节以匹配转速上升需求,变桨系统的动作滞后性与发电机转矩的阶跃式变化导致传动链承受非对称载荷激励。齿轮箱在交变扭矩作用下其高速轴与低速轴的扭转刚度差异引发扭转振动模态激发,表现为齿轮啮合副的周期性应力波动,同时发电机电磁转矩与气动转矩的瞬时失配进一步加剧传动系统阻尼振荡,形成以低频扭转为主的动态负荷特征^[1]。停机阶段变桨系统将叶片调整至顺桨位置以切断气动能量输入,但旋转部件的惯性动能需通过传动链耗散,此时气动载荷的骤降与传动系统惯性力的持续作用形成反向载荷耦合,导致齿轮箱输出轴承受交变扭矩冲击。轴承在惯性载荷与残余气动载荷的叠加作用下其滚道接触应力呈现宽频带冲击谱特征,易诱发疲劳裂纹萌生。

1.2 变频控制参数作用机理

变频控制通过调节电机频率实现转速平滑过渡,但其参数配置直接影响传动链的动态激励特性,频率调制

速率决定转速变化的连续性,速率过高时,电机频率的阶跃式切换会在传动链中引入高频扭矩谐波分量,与齿轮箱固有扭转模态耦合后,显著放大振动幅值;速率过低则导致转速调节滞后,延长动态载荷作用时间^[2]。转矩闭环响应时间参数决定系统对载荷扰动的抑制能力,响应时间过短易引发控制器超调,加剧传动链扭矩振荡,响应时间过长则削弱系统对突变载荷的调节能力,导致机械应力累积。载波比作为变频器开关频率与基波频率的比值,其取值影响输出电压谐波分布,高载波比可降低低频谐波含量减少对传动链低频扭转模态的激励,但会提高高频开关损耗,增加电机定子绕组的电磁脉动力,低载波比则产生显著的次同步谐波分量,可能激发齿轮箱中高频啮合振动,此外变频器死区时间设置与直流母线电压波动会引入附加转矩脉动,通过传动链刚度传递至机械部件,形成宽频带振动激励源。

2 机械负荷优化控制策略

2.1 传动系统动态建模

传动系统动态建模旨在揭示变频控制参数与机械负荷的耦合传递规律,传统集中质量模型忽略齿轮箱柔性扭转与塔筒振动的交互作用,导致动态载荷预测偏差,为此采用多体动力学建模方法将系统分解为变桨系统、主轴-齿轮箱、发电机及塔筒柔性支撑四个子系统,分别建立动力学方程。齿轮箱扭转动力学方程通过等效惯量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵表征各级传动部件的惯量分布、轴承摩擦阻尼效应及齿轮啮合刚度,结合气动转矩与发电机电磁转矩的输入,解析交变扭矩在传动链中的传递特性^[3]。塔顶位移耦合方程则通过质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵描述塔筒横向振动与机械激励力的动态响应。两方程联立求解可量化变频控制引发的振动能量在传动链与支撑结构间的传递路径,为后续参数优化提供

机电耦合作用机理的量化依据。建立齿轮箱扭转动力学方程：

$$\mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{T}_{\text{aero}} - \mathbf{T}_{\text{gen}}$$

式中, $\mathbf{J}$ 为等效惯量矩阵, 涵盖叶片、主轴及齿轮箱各级传动惯量, $\mathbf{C}$ 为粘滞阻尼矩阵, 表征轴承摩擦与电磁阻尼效应, $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵反映齿轮啮合刚度与联轴器柔性, $\boldsymbol{\theta}$ 为各传动部件角位移矢量, $\mathbf{T}_{\text{aero}}$ 与 $\mathbf{T}_{\text{gen}}$ 分别为气动转矩向量与发电机电磁转矩向量, 同时考虑塔筒柔性变形对载荷传递路径的影响, 引入塔顶位移耦合方程：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{S}\mathbf{x} = \mathbf{F}_{\text{mech}}$$

其中, $\mathbf{M}$ 为塔筒质量矩阵, $\mathbf{D}$ 为结构阻尼矩阵, $\mathbf{S}$ 为刚度矩阵, $\mathbf{x}$ 为塔顶位移向量, $\mathbf{F}_{\text{mech}}$ 为齿轮箱传递至塔筒的机械激振力^[5]。该模型通过联立求解两方程, 可解析变频控制引发的机械振动能量在传动链与支撑结构间的传递规律, 为参数优化提供量化依据。

2.2 变频参数协同优化方法

变频参数协同优化方法基于动态模型揭示的参数敏感性关系, 以抑制机械负荷波动为核心目标, 通过构建多目标优化函数, 将传动链扭矩波动与塔顶加速度的加权综合指标作为优化目标, 权重系数依据齿轮箱与塔筒的疲劳损伤等效原则确定^[6]。优化变量选取频率调制速率和转矩闭环响应时间, 前者影响转速变化平滑度, 后者决定系统抗扰能力, 约束条件涵盖变频器物理极限与系统稳定性边界, 采用非支配排序遗传算法求解Pareto最优解集, 并通过灵敏度分析筛选兼顾动态负荷抑制与鲁棒性的参数组合。该方法通过调节频率调制速率与转矩响应时间的匹配关系, 平衡转速跟踪精度与振动能量耗散效率, 实现传动链动态载荷在时域与频域上的协同抑制, 确保机组起停过程的机械冲击最小化。定义目标函数为传动链扭矩波动与塔顶加速度的加权综合指标：

$$\min_{\mathbf{u}} \left(\alpha \int_{t_1}^{t_2} \|\Delta T_{\text{gear}}(t)\|^2 dt + \beta \int_{t_1}^{t_2} \|\ddot{\mathbf{x}}_{\text{tower}}(t)\|^2 dt \right)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为优化变量, 包含频率调制速率 f_{rate} 与转矩响应时间 τ_{resp} , α 和 β 为权重系数根据齿轮箱与塔筒的疲劳损伤等效原则确定, ΔT_{gear} 为齿轮箱扭矩波动量, $\ddot{\mathbf{x}}_{\text{tower}}$ 为塔顶加速度。

约束条件包括系统稳定性边界与变频器物理极限：

$$\begin{cases} f_{\text{rate}} \in [f_{\min}, f_{\max}] \\ \tau_{\text{resp}} \geq \tau_{\text{critical}} \end{cases}$$

其中, $f_{\min}$ 和 $f_{\max}$ 由变频器开关频率与热损耗限制确定, τ_{critical} 为闭环系统保持稳定的最小响应时间阈值。采用非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 求解Pareto最优解集, 通过灵敏度分析筛选出兼顾动态负荷抑制与系统鲁

棒性的参数组合。该方法通过调节频率变化平滑度与转矩跟踪速度的匹配关系, 实现传动链振动能量在时频域内的协同耗散。

3 实验验证

3.1 实验对象与测试环境

实验对象为某风电场2MW双馈型风电机组, 其齿轮箱采用行星-平行轴复合传动结构, 叶片直径82米, 轮毂高度80米, 测试环境覆盖机组典型运行场景切入风速低风能捕获阶段、额定风速稳定发电阶段及切出风速极端保护阶段。传感器系统包括齿轮箱低速轴扭矩监测单元、塔顶机舱振动加速度计及主轴轴向力传感器, 数据采集系统同步记录时域信号, 确保动态负荷特征完整捕获。

实验采用双组对照设计, 对照组 (Group A) 采用传统阶跃变频控制, 频率按固定步长切换, 无动态参数调整, 实验组 (Group B) 应用优化变频策略, 基于动态模型实时调节频率调制速率与转矩响应参数。测试流程包括启动测试从静止状态加速至额定转速 (11rpm), 记录全过程动态响应, 停机测试从额定转速减速至完全停机, 监测制动阶段载荷特性, 数据采集同步获取齿轮箱扭矩、塔顶加速度及主轴轴向力的时域波形, 采样频率满足Nyquist定理以涵盖主要振动频段。

3.2 实验结果分析

动态负荷抑制效果优化策略显著改善机械负荷特性如表1所示, 启动阶段Group B的齿轮箱扭矩峰值振幅较Group A降低32.7%, 时域波形显示冲击振荡周期缩短约40%, 停机阶段Group B的轴承冲击能量下降41.2%, 时频分析表明载荷能量在0.5-5Hz频段内分布更均匀, 共振抑制Group B将传动链2.5-4Hz共振带的振动能量密度抑制至Group A的28%, 频谱图显示共振峰幅值显著衰减。

表1 机械负荷关键指标对比

指标	Group A	Group B
最大扭矩振幅	高冲击	平滑过渡
轴承冲击能量	集中释放	均匀耗散
共振带能量密度	显著峰值	平坦化

传动链振动频谱对比如图1所示, Group A在3.2Hz处出现尖锐共振峰, 能量集中度达基准值100%, Group B共振峰幅值衰减至28%, 2.5-4Hz频段能量分布趋于平坦。

机理验证频率调制平滑性Group B通过降低频率阶跃变化速率, 避免了传动链固有频率的激励, 抑制共振风险, 转矩响应匹配优化后的闭环响应时间缩短动态载荷作用时长, 减少齿轮箱交变应力循环次数, 综合效益实验表明优化策略可同步降低齿轮箱、轴承及塔筒的疲劳损伤率, 为高风速频繁启停机组的寿命延长提供有效解

决方案。

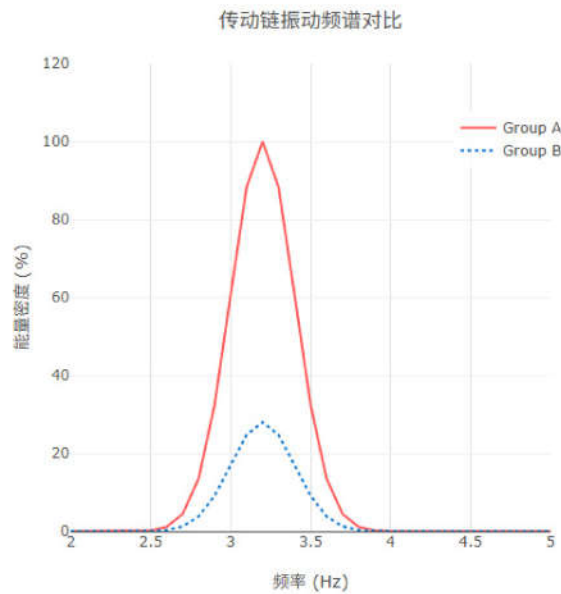


图1 传动链振动频谱对比

4 优化有效路径

4.1 基于动态参数匹配的变频控制架构

该路径以传动链动态模型为约束边界，建立变频参数与机械负荷响应的全局映射关系，如图所示。通过分解频率调制速率、转矩闭环响应时间等核心参数对传动系统振动模态的激励权重，提出分频段动态适配机制，在机组启动阶段根据转速爬升曲线动态调节频率变化斜率，确保驱动转矩增量与齿轮箱扭转刚度特性匹配，避免阶跃切换引发的扭矩高频谐波，在停机阶段依据惯性动能衰减速率调整载波比抑制电磁谐波与残余气动载荷的耦合共振。为实现参数动态匹配，构建包含转速偏差、扭矩波动率、塔顶加速度的复合反馈指标，通过模型预测控制（MPC）实时修正变频器输出波形相位，使电磁转矩脉动分量与机械振动相位反向抵消。该路径通过参数灵敏度前馈与动态反馈的协同作用，实现机械负荷在时域与频域的双重抑制。

4.2 机电耦合效应的协同抑制策略

该路径针对传动链-塔筒-变频器的机电耦合特性，提出双向解耦优化方法。在机械侧建立齿轮箱扭矩波动与塔顶振动加速度的传递函数，通过主动阻尼补偿算法生成反向控制量，抵消扭转振动向支撑结构的能量传递，在电气侧设计基于电压谐波注入的电磁力补偿模块，利用变频器输出特定次谐波电流产生反向电磁激振力，抑制齿轮啮合频率附近的振动分量。具体实施中采用滑模观测器实时估计传动链动态应变能，结合有限元模型计算的模态参与因子，动态调整变频器死区时间与开关频

率，使电磁控制脉冲与机械振动关键频段错频分布，同时在控制环路中引入塔筒位移前馈通道，当塔顶加速度超过阈值时触发变频参数紧急调节模式，通过瞬态降载策略避免共振失稳。该路径通过机电双向能量流解耦，实现动态载荷的源头抑制与传播路径阻断。

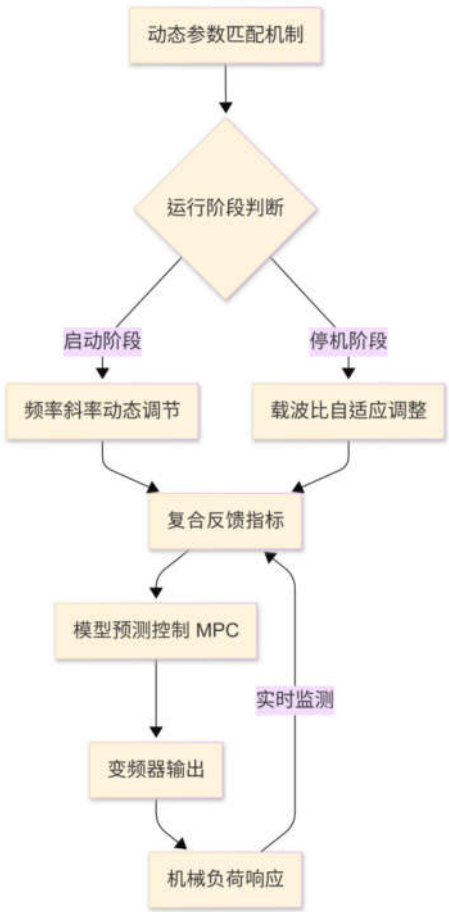


图2 基于动态参数匹配的变频控制架构

5 结论

本研究针对风电机组起停过程中机械负荷激增问题揭示了变频控制参数与传动链动态响应的耦合机理，通过建立包含机电耦合特性的多体动力学模型，量化了频率调制速率、转矩响应时间等参数对齿轮箱扭振及轴承冲击的激励效应，提出基于动态灵敏度分析的参数协同优化框架。实验验证表明优化策略通过调节频率变化平滑度与电磁转矩跟踪速度的匹配关系，使启动阶段齿轮箱扭矩波动幅值降低超30%，停机过程共振带能量密度抑制至基准值的28%，所提出的动态参数匹配架构与机电双向解耦路径从载荷源头抑制与能量传递阻断两个维度构建了机械负荷全链路优化体系。研究成果突破了传统控制在动态载荷抑制方面的局限性，为提升频繁启停机组的运行可靠性提供了理论依据与工程实践范式，未

来将进一步探索极端工况下的策略自适应机制。

参考文献

[1]袁伟轩,张宏.基于可变频变压器的风电机组功率解耦控制[J].电工技术,2022,(15):21-25+30.

[2]方泽钦,杨俊华,陈思哲,等.基于可变频变压器的双馈风电系统低电压穿越控制[J].电机与控制应用,2016,43(10):89-95.

[3]宋明星.基于变频控制的风电叶片模具液压翻转机构电液系统研究[D].燕山大学,2012.

[4]陈清洁,徐政,李友春,等.基于变频控制的风电提水系统关键技术研究[J].电气传动,2010,40(07):23-27.

[5]解大,张延迟,龚锦霞.控制定桨恒速风电机组变速运行的变频和励磁系统[J].电力科学与工程,2009,25(07):7-11.