

大型风机电气控制系统的多变量协同优化方法

王滕杰¹, 李伟群², 王文静³, 尹会⁴

- (1. 山东前程似锦人力资源有限公司, 山东 泰安 271021;
2. 山东凯锡永成建设工程有限公司, 山东 青岛 266200;
3. 潍坊和生工程建设有限公司, 山东 潍坊 261071;
4. 山东千盛电力设备工程有限公司, 山东 临沂 273300)

摘要 大型风力发电机组在运行过程中面临气动转矩波动、塔架振动以及电网电压扰动等多重变量耦合的影响,传统的单回路控制策略难以满足系统对于动态响应性能的高标准要求。针对风机全工况运行下的非线性与强耦合特征,通过分析电气控制系统的多变量交互机理,构建基于状态空间解耦的协同控制架构成为提升机组运行稳定性的关键。该方法通过引入前馈补偿与交叉解耦网络,消除转速环与功率环之间的动态干涉,同时在变流器侧采用基于磁链定向的矢量控制策略,实现有功功率与无功功率的独立调节。电气控制系统的协同优化能够有效抑制传动链扭振,提升机组对风能的捕获效率及电能质量,为大型机组在复杂工况下的稳定运行提供技术参考。

关键词 大型风力发电机组; 电气控制系统; 多变量解耦; 协同优化控制

中图分类号: TM722

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.024

0 引言

随着风力发电单机容量向兆瓦级以上规模持续演进,机组的叶轮直径与塔架高度不断增加,导致电气控制系统的被控对象呈现出更加显著的高阶非线性与时变特性。在实际运行环境中,随机变化的风速不仅会引起气动转矩的剧烈波动,还会通过传动链引发机械与电气系统之间的振荡耦合。常规的比例积分控制策略在处理此类多输入多输出系统时,往往因参数固定而无法适应大范围的工况变化,导致控制精度下降甚至引发系统失稳,实现电气控制系统的多变量协同优化,核心在于打破各控制回路间的强耦合效应,通过构建多目标的各种变量协调机制,使发电机转矩、桨距角及变流器电流等关键参量在动态调节过程中保持最佳匹配,这不仅关系到机组的瞬态响应能力,更是决定电能输出品质的核心要素。

1 大型风机电气控制多变量耦合特性分析

大型风机电气控制系统是一个典型的多变量强耦合系统,其核心复杂性源于气动能量捕获、机械传动链传递与电气能量转换三个环节的深度交织,在额定风速以上区域,变桨控制系统调节叶片角度以限制吸收功率,而转矩控制系统则需维持发电机转速恒定,两者在控制目标上存在由于风速快速变化引起的动态

冲突。当风速发生阶跃时,气动转矩的突变会直接作用于传动链,导致发电机转子速度波动,此时若转矩环响应过快,会加剧塔架的前后振动;若响应过慢,则无法有效抑制转速超调,全功率变流器的直流母线电压稳定性也受网侧与机侧功率流动的双重影响,有功电流的剧烈变化会通过磁路耦合影响无功电流的控制精度,造成定子电压的不稳定,这种多物理场的变量交互特性,要求控制策略必须具备全局视角,不能仅局限于单一回路的参数整定^[1]。

2 变桨与转矩系统的动态解耦策略

2.1 变桨距角的独立变增益调节

针对叶片气动特性随桨距角非线性变化的特点,构建基于工况点的变增益控制模型是解决非线性问题的有效途径。在低风速阶段,桨距角保持在精细的最佳位置以最大化捕获风能,控制增益需设置为较小值以避免执行机构频繁动作造成的机械磨损;进入高风速区域后,气动灵敏度显著增加,控制系统需依据当前风速与转速的偏差实时调整比例积分系数,通过引入叶片方位角信号作为前馈变量,可以抵消因风切变和塔影效应引起的周期性气动载荷波动,这种变增益策略能够确保变桨系统在不同风速段均能保持一致的阻尼特性,防止因控制刚度不匹配导致的系统发散,实现对风轮转速的平稳约束。

作者简介: 王滕杰(1989-),男,本科,工程师,研究方向: 电力工程。

2.2 发电机电磁转矩的动态响应优化

发电机电磁转矩的控制不仅承担着调节转速的任务还需兼顾传动链的柔性阻尼,在电气控制回路中引入带通滤波器提取传动链的扭振频率分量,将其反相叠加至转矩给定信号中,形成有源阻尼控制回路。该方法利用发电机转矩响应速度远快于机械响应速度的特性,相当于在传动链中增加了一个虚拟的电气阻尼器,有效吸收机械振荡能量,在转矩给定值的计算过程中,需综合考虑发电机定子电流的热限值与变流器的最大过载能力,设置动态限幅环节,通过优化转矩上升率的斜率限制,可以平滑电磁转矩的阶跃冲击,减少齿轮箱齿面受到的瞬时应力,从而在保证功率输出平稳性的同时兼顾机械部件的疲劳寿命^[2]。

2.3 气动与电气负载的功率平衡调节

功率平衡控制的核心在于协调气动输入功率与电气输出功率之间的动态关系,防止发电机转子出现超速或失速现象,建立基于功率偏差的前馈控制通道,当检测到气动功率发生大幅度突变时,直接修正电气功率给定值,而非等待转速偏差出现后再进行调节。这种前馈机制显著降低了系统的相位滞后,在电网电压跌落等瞬态工况下,电气负载能力瞬间下降,控制系统需迅速启动卸荷电路消耗多余能量,并同步强制变桨系统快速收桨以切断气动能量输入,通过这种气动与电气的快速联动机制,能够将转子转速维持在安全阈值之内,确保机组在极端外部扰动下不发生飞车事故,维持能量流动的动态平衡^[3]。

2.4 过渡区域的平滑切换控制逻辑

在额定风速附近的过渡区域,机组频繁在最大功率跟踪模式与恒功率运行模式之间切换,极易引发控制震荡,设计基于模糊逻辑的平滑切换器,设定转速与功率的滞后环宽,避免控制模式的反复跳变。在切换过程中采用加权平均算法对转矩给定值与桨距角给定值进行插值运算,使两个控制回路在交接时刻实现无扰动过渡,控制系统需实时监测风速变化的趋势(dv/dt),预判工况切换点,提前调整变流器的励磁电流,使发电机电磁状态预先适应即将到来的工况变化,这种平滑切换逻辑有效消除了模式转换瞬间的转矩脉动,保证了并网功率的连续性,减少了对电网的冲击^[4]。

3 变换器网侧与机侧的协同控制技术

3.1 机侧变换器的矢量控制电流环设计

机侧变换器的控制性能直接决定了发电机的电磁转矩品质,采用基于定子磁链定向的矢量控制技术是

实现转矩与磁通解耦的关键,通过坐标变换将三相静止坐标系下的交流电流转换为同步旋转坐标系下的直流量,实现对励磁电流分量与转矩电流分量的独立控制。在电流内环设计中引入定子电压前馈解耦项,消除 d 轴与 q 轴电流之间的交叉耦合电动势影响,显著提升电流环的动态跟踪带宽,针对发电机参数随温度变化引起的失配问题,在控制算法中集成参数在线辨识模块,实时修正控制器参数,高频次的电流采样与更新保证了输出电流波形的正弦度,有效抑制了定子绕组中的低次谐波含量,降低了电机的附加损耗与温升。

3.2 网侧变换器的直流母线电压稳定控制

直流母线电压的稳定性是维持机侧与网侧功率传输平衡的枢纽,网侧变换器需承担维持母线电压恒定的任务,电压外环采用非线性抗扰控制器,将负载功率波动视为外部扰动进行观测与补偿,提高母线电压对功率突变的抗干扰能力^[5]。电流内环采用电网电压矢量定向,实现有功电流与无功电流的解耦控制,针对电网电压背景谐波的影响,在电流反馈通道中串联谐振控制器,针对特定次谐波频率进行高增益调节,确保并网电流的总谐波畸变率满足并网标准,通过精确控制网侧变换器的开关频率与死区补偿,减少开关损耗,提升整个交流系统的能量转换效率,确保能量从发电机侧向电网侧的高效传输^[6]。

3.3 锁相环在电压跌落时的频率跟踪

电网电压在发生跌落或不平衡故障时,准确获取电网相位角是保证变流器不脱网运行的前提,传统过零检测法在电压畸变时极易失效,需采用基于双二阶广义积分器的锁相环技术。该技术能够从畸变的电网电压中分离出正序基波分量,滤除负序及谐波干扰,在电网电压幅值跌落至 20% 甚至更低时仍能锁定相位,锁相环的输出相位直接参与网侧电流的坐标变换,确保并网电流始终与电网电压保持预定的相位关系,在频率发生漂移时,锁相环需具备快速的频率跟踪能力,调整内部振荡器频率与电网同步,防止因相位失步导致的变流器过流保护误动作,维持电气连接的可靠性。

3.4 无功功率支撑与电压穿越控制

当检测到并网点电压发生深度跌落时,系统的首要任务由功率输出转变为电网支撑,控制系统需立即激活低电压穿越(LVRT)逻辑,在此阶段,网侧变换器必须依据并网导则中的 K 系数,根据电压跌落的幅值计算无功电流指令,强制注入感性或容性无功电流以支撑并网点电压,同时对有功电流进行快速限幅。由于

网侧输出功率受限而发电机侧输入功率未能瞬间降低，直流母线电压将面临急剧升高的风险，此时协同控制策略需立即触发直流侧卸荷电路（Chopper），通过制动电阻以脉宽调制方式消耗多余能量，钳制母线电压在安全阈值内，防止过压击穿变流器电容，对于全功率变流机组，机侧变流器还需配合增加发电机转矩的阻尼分量，利用转子巨大的转动惯量吸收部分暂态能量，通过电、机、热三种能量耗散途径的协同配合，确保在故障持续期间机组不脱网、不超速[8]。

在故障清除后的电压恢复阶段，控制策略的重点转向有功功率的平滑恢复与机械载荷的抑制，若电压恢复瞬间有功功率以阶跃方式回升，将对电网造成二次冲击并引发传动链的剧烈扭振。因此协同优化系统需设定有功功率恢复的线性斜率（Ramp Rate），使输出功率跟随电网电压的恢复进程缓慢爬升，在此过程中机侧变流器需动态调整转矩给定值，避免因电磁转矩突变导致齿轮箱齿面发生反向敲击。

4 多模态下的全工况自适应调节

4.1 额定风速以下的转速追踪策略

在低于额定风速的运行区域，控制目标是追踪叶尖速比的最佳值以获得最大风能利用系数，采用基于转速反馈的最优转矩控制法，将发电机电磁转矩设定为转速的二次方函数。为克服大惯量转子导致的转速跟踪滞后，在转矩给定中叠加转速变化率的微分项，提高系统对风速波动的动态响应速度，同时，考虑到低风速下机械损耗占比增大的特点，控制系统需对转矩给定曲线进行修正，扣除传动链的空载损耗转矩，通过实时计算气动转矩观测值，对最优转矩曲线系数进行自适应调整，确保在叶片表面污染或结冰导致气动特性改变时，系统仍能搜寻到当前状态下的最大功率点，实现能量捕获效率的最优化。

4.2 恒功率区的多变量协调动作

进入恒功率运行区后，变桨机构与变流器需协同动作以维持输出功率的恒定，控制系统采用多变量解耦算法，将转速偏差信号送入变桨控制器，将功率偏差信号送入转矩控制器。为防止两个回路间的相互干扰，在控制器内部设置交叉解耦项，当变桨动作引起转速变化时，通过前馈通道调整转矩给定值进行补偿，在应对阵风扰动时，变桨速率需受到严格限制以防止桨叶载荷过大，此时允许功率短时小幅波动，利用发电机转子的动能来缓冲能量冲击，这种协调机制在保证发电机电气参数不超标的前提下，最大程度地平滑了机械载荷，体现了电气控制与机械保护之间的深度融合^[7]。

4.3 暂态扰动下的电气参数阻尼注入

电网短路或重合闸操作会引发机组电气参数的剧烈暂态振荡，单纯的PID调节难以抑制这种高频扰动，在控制环路中引入状态观测器，实时重构发电机内部的磁链与电流状态变量，利用状态反馈极点配置方法增加系统的电气阻尼。针对变流器直流母线电压的二次纹波振荡，在电压环中注入反相的纹波补偿信号，抑制纹波电压对电流环的调制作用，通过监测定子电压与电流的瞬时相位差，动态调整功率因数角，增强系统在弱电网环境下的暂态稳定性，这种基于状态反馈的阻尼注入技术，无需增加额外的硬件成本，仅通过算法层面的优化即可显著提升电气系统对外部强扰动的抵抗能力。

5 结束语

大型风机电气控制系统的多变量协同优化是解决机组在复杂工况下稳定运行难题的核心手段，通过深入分析气动、机械与电气子系统间的耦合机理，采用变桨与转矩的动态解耦、变流器的矢量控制以及全工况的自适应调节策略，有效克服了传统控制方法的局限性。协同优化方法不仅实现了有功与无功功率的独立精准调节，还通过有源阻尼技术抑制了机械振动，提升了机组对电网故障的穿越能力与耐受度，这种基于模型解耦与状态反馈的控制架构，在保证能量转换效率的同时，显著降低了系统的机械载荷与电气应力，为风力发电设备的长周期可靠运行提供了坚实的理论与技术基础，符合风电技术向精细化、高效化发展的客观规律。

参考文献：

- [1] 冯景文. 风力发电技术及新型风机电控系统应用研究[J]. 电力设备管理, 2025(08):140-142.
- [2] 王晓兰, 李朝辉. 双馈风机宽频受迫扭振抑制的模型参考自适应控制方法[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(09):37-49.
- [3] 顾明月. 风力发电技术及新型风机电控系统研究[J]. 光源与照明, 2024(02):186-188.
- [4] 才天昊, 刘刚, 赵欣欢, 等. 移动风机加装雨滴传感器在粮食储藏通风作业中的应用[J]. 粮油仓储科技通讯, 2023, 39(06):53-55, 65.
- [5] 郝天敏. 风机发电场中的电气智能化监控与管理技术研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(S1):81-83, 86.
- [6] 何飞, 卢伟. 除尘设备风机星三角启动故障分析研究[J]. 设备管理与维修, 2023(15):15-16.
- [7] 王小军. 电气控制设备如何优化风机配置[J]. 电气传动自动化, 2020, 42(02):62-64.