

自适应对风控制下2MW老旧直驱风力发电机组变频偏航改造设计与应用

贾益军 倪 郡

新化大熊山风力发电有限公司 湖南 娄底 417604

【摘 要】：对于2MW老旧直驱风力发电机组传统偏航系统启动冲击大、对风精度低、工况适应性差、机械损耗高的问题，本文提出自适应对风控制的变频偏航改造方案。根据风场老旧机组的运行特点来改进偏航变频驱动结构和自适应控制算法，消除传统直启偏航模式下的电流冲击、偏航卡滞、对风滞后等问题。经过湖南某风电场现场改造应用的验证，改造后的机组对风精度、运行稳定性、发电效率都有了明显提高，设备故障率也大大降低，可以给同类型老旧直驱风机偏航系统提质增效改造提供工程上的参考。

【关键词】：老旧直驱风机；2MW机组；自适应对风；变频偏航

DOI:10.12417/2811-0528.26.20.006

国内早期投入运行的2MW直驱风力发电机组大多已经进入运维的中期阶段，大部分机组偏航系统都采用工频直接启动的方式，配备固定参数控制逻辑，不能适应复杂的、多变的山地风场湍流风况。传统的偏航系统在运行过程中存在着启动电流冲击大、机械齿轮磨损严重、风向响应慢、对风误差大等问题，长时间运行容易造成偏航电机烧毁、齿轮箱故障、机组频繁启停等安全隐患，直接降低了机组的发电效率，增加了运维成本。自适应对风控制技术可以依据实时风速风向来调节偏航动作参数，变频驱动技术可以实现偏航电机软启动、无级调速，很好地避免了工频启动的各种缺点。本文以湖南某风电场2MW直驱老旧风机为改造对象，设计变频偏航系统改造方案，把自适应对风算法和控制逻辑结合起来，利用现场实测数据分析改造效果，使老旧机组偏航系统实现智能化、低损耗升级。

1 老旧机组偏航系统现存问题分析

1.1 机组设备基础概况

本次改造的XE105-2000型2MW直驱风力发电机组，运行年限超过8年，整个设备处在运维老化期。机组原配偏航系统使用传统的工频直驱控制方式，没有无级调速的功能，控制系统用固定的参数运行逻辑来运行，不能根据山地风场复杂多变的风况特点来动态调节运行状态。根据机组长时间运行监测数据以及现场故障台账统计结果可知，其偏航控制系统存在固有的缺陷，并且在机械结构上也存在着诸多问题，从而严重地影响了机组运行的稳定性以及发电的经济性。

1.2 传统偏航系统核心运行缺陷

（1）启停冲击大，机械电气损耗严重：传统的工频直接启动方式下，偏航电机启动时没有缓冲过程，启动电流可达额

定工作电流的5到7倍，在频繁启停工况下，很容易造成电机绕组绝缘老化、接线端子烧蚀、线路发热等电气故障。瞬时大扭矩输出会造成强烈的机械冲击力，直接加剧偏航齿轮、轴承、回转支承等传动部件的磨损，长时间使用会造成齿轮间隙变大、传动异响，大大缩短核心机械部件的使用寿命。（2）对风精度不足，风能利用率偏低：传统的偏航控制系统用固定角度阈值触发对风动作，控制逻辑单一固化，不能适应山地风场阵风频发、风向湍流波动大的动态工况。机组风向响应存在明显的滞后性，稳定的运行状态风误差一般为 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 左右。较大的对风偏差会使得风轮的扫风效率降低，造成不必要的风能浪费，从而降低机组的有效发电效率，长期来看还会导致发电量大幅度减少。（3）工况适配性弱，系统无效能耗高：原有的系统采用固定的转速和参数运行方式，没有风速风向自适应调节的功能。大风湍流工况下固定偏航转速会造成系统扭矩输出不匹配，引发偏航过载、卡滞、保护停机等情况，低风速微风工况下系统经常执行微小的对风动作，无效偏航次数多，造成机械空耗、电能浪费，系统整体运行能耗控制能力差。（4）故障频次偏高，运维成本居高不下：因为长期受到冲击性、不匹配工况的影响，老旧机组偏航系统的故障率一直很高，每年出现偏航卡滞、电机过热、齿轮异响、控制系统误动作等故障20多次。频繁出现的故障不但会减少机组的可利用小时数和设备完好率，还要消耗大量的精力和物力来开展巡检、抢修和备品备件的更换工作，从而大幅度增加风电场的日常运维成本，影响机组全生命周期经济效益。

2 变频偏航改造总体设计方案

本次改造保留原有的偏航机械传动结构、检测传感器和主控通讯结构，主要改造内容是更换工频驱动方式，安装专用偏

航变频器,采用自适应风控制算法,形成变频调速、动态自适应对风的新型偏航控制系统,兼顾改造成本、施工难度和运行可靠性。

2.1 硬件系统改造设计

硬件改造用变频驱动单元取代原来的工频接触器启动回路,选用适合 2MW 直驱风机工况的专用偏航变频器,匹配原有的偏航电机参数,具有过载保护、软启动、无级调速、故障自诊断等功能。改造之后用一拖一独立驱动的方式,一台变频器对应一台偏航电机,解决了传统上多电机并联驱动的负载不均的问题。优化系统电气接线,增加电气互锁保护回路,保证原有工频回路和新增变频回路的安全切换,保留原有紧急停机、过载保护、防雷保护等安全功能,增加变频过流、过压、过热、缺相保护,提高系统运行安全性。所有的新增电气元件都采用工业级材料,适合于风场高湿、温差大、盐雾污秽的运行环境,柜体防护等级达到 IP54 标准。

2.2 自适应风控制算法设计

抛弃传统的固定阈值控制逻辑,设计风速风向联动的自适应风控制算法。系统对于风速、风向、机组转速、出力等运行参数实行实时收集,依照获取到的数据来对偏航触发阈值、偏航转速以及制动参数实施调整,以此来达成精细化的对风控制。低风速时降低偏航动作转速,减小风触发角度阈值,减少无效偏航动作,降低系统能耗;高风速湍流工况时提高偏航响应速度,改善动态对风精度,迅速跟随风向改变,削减风能消耗。并且加入延时滤波逻辑来消除瞬时风向变化对机组启停次数的影响,减小机械的疲劳损耗。算法自带的故障自适应调节功能,可以对偏航机电流、转速、温度等参数进行实时监测,当出现轻微过载、卡滞趋势的时候,会自动降低运行转速、平稳调节输出扭矩,不需要停机就可以消除轻微故障隐患,提高系统的运行稳定性。

2.3 系统改造施工流程

本次变频偏航系统改造严格按照风力发电机组检修、电气设备安装调试相关行业规范进行,根据老旧机组设备特点制定标准化施工工序,防止改造施工对原有设备造成损伤,保证改造质量及施工安全,整个施工过程分为四个主要阶段。

(1) 停机核验与旧设备拆除:改造前期先执行机组停机闭锁操作,将偏航系统动力电源和控制电源全部切断,悬挂安全警示标志,对电气、机械安全进行核验,保证机组无带电、无机械惯性风险后,启动旧设备拆除工作。依次拆除原来的工频启动接触器、老旧控制回路线缆、固定参数控制模块等老旧设备,清理控制柜内的积尘、老化线路,规整设备安装基础,为新设备的安装创造良好的施工条件,拆除过程中对机组原有

的机械传动结构和通讯接口进行保护。

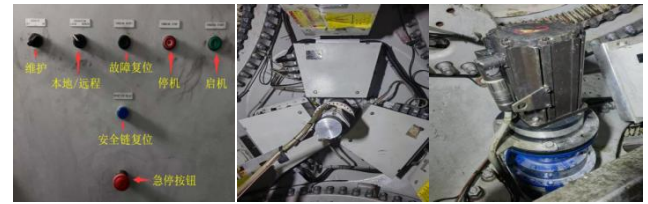


图1 停机及拆除操作

(2) 新设备安装与线路布设:按照施工图纸进行专用偏航变频器、自适应控制模块、电气互锁保护回路等新增设备的固定安装,保证设备安装牢固、布局整齐,符合风电设备防尘、防震、防潮安装要求。严格区分高低压线路,规范布设动力线缆和信号线缆,防止线路交叉干扰,同时做好设备接地施工,保证接地电阻符合安全运行标准。对所有的线缆接口以及柜体开孔处做密封处理,适应风场户外恶劣运行环境。

(3) 程序调试与系统联调:设备安装完毕后进行系统参数设置和程序上传工作,将自适应风控制程序植入到 2MW 直驱风机机组中,根据山地风场工况特点选择合适的参数,包括偏航转速、触发阈值、保护参数等主要参数。完成变频器和机组主控系统、风向风速传感器数据通讯联调,校验信号传输稳定、数据采集准确,测试工频回路和变频回路互锁切换功能,保证控制系统逻辑正确、设备联动正常。



图2 程序调试

(4) 分级试运行与验收:系统调试完成后用分级试运行方式检验设备性能。先做空载试运行,对偏航系统启停、无级调速、故障保护等基本功能进行测试,查找电气故障和控制逻辑问题。空载运行合格之后再带载试运行,模拟不同的风速、风向工况来检验自适应对风响应、扭矩调节、能耗控制等主要性能。各项运行指标达到标准、没有出现异常故障之后,完成施工验收,机组正式进入常态化运行。

3 工程应用与实测数据分析

3.1 工程改造概况

本次改造以湖南某山地风电场为依托,选取场内运行工况

差、偏航故障多发的 XE105-2000 型 2MW 直驱风机 5 台作为改造对象,统一进行变频偏航系统升级和自适应对风算法优化改造。项目严格按照风电设备安装、调试、验收的相关行业规范进行施工,全过程标准化施工,改造工期、施工质量、设备安全性能均达到设计和风场运行的要求。为了客观、准确地检验改造方案实际应用的效果,从 5 台机组改造前、后连续三个月的同期运行数据入手,进行采集、统计和比较分析。

3.2 核心运行指标对比分析

整理机组后台监测数据、故障台账、能耗统计和发电量数据,得到改造前后主要运行指标对比结果,具体参数如下表所示。

表 1 具体参数对比

运行指标	改造前 均值	改造后 均值	优化效果
偏航启动峰值电流/A	89.6	32.4	下降 63.8%
平均对风误差/°	6.2	1.8	降低 71.0%
月均偏航故障次数/次	3.8	0.4	下降 89.5%
机组发电效率	基准值	提升 6.5%	发电损耗大 幅降低
偏航系统月均能耗/kWh	426	283	下降 33.6%

3.3 改造效果综合分析

(1) 电气与机械性能优化:改造后的变频软启动方式完全解决了偏航电机启动时出现的电流冲击问题,启动峰值电流下降超过 60%,很好地保护了电机绕组、电缆和控制柜电气元件不被损坏,防止了电气过热、烧毁等故障的发生。平缓的扭矩输出大大减小了偏航传动机构的机械冲击,降低了齿轮、轴承等部件的疲劳磨损,从源头上改善了机组机械运行状况。

(2) 发电与节能效益提升:自适应对风控制算法的使用使机组可以快速地应对风向的变化,平均对风误差明显减小,风能捕获率提高,机组总的发电效率提高了 6.5%。智能工况调节减少无效偏航动作,自身能耗降低 33.6%,同时具有提质、降耗效果。从长远运维效益来看,设备故障率大幅下降,年均运维成本降低 40%以上,可以将老旧机组存量价值最大限度

地发掘出来,给后期设备的改造更新提供资金支持。

4 改造关键技术优势与应用价值

4.1 技术优势

本次改造方案与传统的简易变频改造不同,使用自适应智能控制技术对硬件进行升级,并且对算法进行改进。一是软启动无级调速,完全消除工频启动电流和机械冲击,保护传动系统核心部件;二是动态自适应对风,摆脱固定参数限制,适应山地复杂风况,兼顾对风精度和系统能耗;三是兼容性强,充分利用原有设备结构和通讯系统,改造工程量小、成本低、工期短;四是安全可靠,多重电气保护和故障自适应调节功能,有效规避各种运行风险。

4.2 工程应用价值

国内大部分 2MW 直驱老旧风机存在偏航系统运行低效、故障多的问题,常规运维检修只能解决故障,不能从根本上消除系统固有的缺陷。本次改造方案技术成熟、性价比高、落地性强,不会对机组原有的结构造成太大改变,可以快速完成老旧偏航系统智能化升级。改造后的机组发电效率逐渐提高,运维成本不断降低,设备的可靠性大大提高,具有较好的经济效益和安全效益,可以广泛地推广应用到同类型老旧风电机组提质改造项目中。

5 结论

综上所述,本文针对 2MW 老旧直驱风机传统偏航系统运行缺陷,提出自适应对风控制的变频偏航改造方案,采用硬件变频驱动升级和智能算法优化的方式,有效地解决了机组偏航启动冲击大、对风精度低、故障频发、能耗高这些难题。现场工程应用结果表明,对机组偏航系统进行改造后,机组偏航系统的运行较为稳定,风精度以及发电效率得到明显提高,运维成本也有所降低。该种改造方案适用于老旧风机的改造,改造成本低、施工方便、效果好,可以充分发挥老旧风电场存量发电能力,延长机组使用寿命,给老旧风电设备智能化升级、提质增效提供可靠的技术途径和工程范例。后续可以利用机组大数据监测来不断改进自适应控制参数,从而提高机组的风况匹配能力和发电经济性。

参考文献:

- [1] 李品,东学军,李杰.基于多目标遗传优化算法的偏航轴承变频调速控制方法研究[J].科技资讯,2025,23(19)112-114.
- [2] 李杰,谭明磊,东学军.湍流风况下风电机组变频偏航角度 PI 控制器整定算法[J].自动化应用,2025,66(17)99-101.
- [3] 李彬,李东赫.大型风力发电机组仿真实验平台的应用[J].企业管理,2024,(S2)272-273.
- [4] 周哲,王耀锋,谢卫才,等.风电机组偏航交流变频电机的研制[J].湖南工程学院学报(自然科学版),2022,32(2)24-29.
- [5] 王谦,郭育华.变频偏航控制器的研究[J].电工技术,2021,(2)35-37.