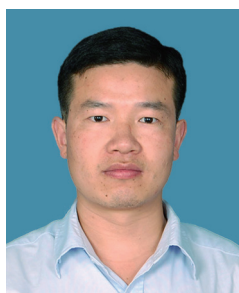


兆瓦级风电机组自动偏航系统优化设计与应用

首先通过对比分析某低风速风电场相同容量风力发电机组的发电量差异,以偏航系统为研究对象,阐述了偏航控制系统的工作原理和控制方法,优化了偏航控制策略,最大化风能利用系数以提升机组发电量;其次在该1.5 MW低风速风电场进行了现场测试,测试结果验证了该控制策略的可靠性和有效性;最后对该控制策略在低风速地区的推广应用提出了建议。

丁 祥 兰志杰 罗华兵 黄成彦/广东明阳风电产业集团有限公司



丁 祥/工程师

近年来,由于三北地区当地的经济不发达,不能消纳足够的风电资源,加上受大容量风电送出电网的限制,我国风能资源的开发已经由风能资源丰富的高风速地区集中开发逐渐向占全国面积68%的风能资源较丰富和可利用的低风速地区转移和拓展,且我国能源消耗主要集中在接近于电网负荷受端的低风速地区。加大对低风速地区风资源的开发对实现风能的就地转化利用、常规化石能源的替代补充和调整能源消耗结构有着重要作用。

在风能资源较好地区的风电开发受限于大容量风电送出而不断“弃风”的情况下,低风速地区风电场开发以及低风速风力发电技术的研发逐渐引起各方关注。因此,进一步提升机组的发电性能,为低风速地区风电场客户创造更多价值就显得尤为迫切。

欧洲风电技术发达国家(如德国、

丹麦等),已认识到低风速风力发电技术的应用价值,目前正在加快低风速地区风电发展的进程。亚洲的日本、韩国也有多家研究机构正在进行低风速风电的核心技术研发。

由于风向仪位于机舱尾部,会受到紊流等各种不利因素的影响,且风向仪自身的测量准确度存在不足,导致对风准确度不够,而且当机舱轴线方向与风向偏差在设置值范围内时,偏航控制系统不起动,进而降低了风电机组的发电效率。为了改善上述问题,本文提出了一种基于风速分段控制风向变化快速追踪的偏航控制优化策略,使风电机组的轴向与风向的夹角最小,并最大化迎风面积,从而在不增加成本的基础上达到提高风电机组发电量的目的。

偏航控制系统原理及控制方法

由于风向总是随机变化的,为了最大化捕获风能,必须每隔一段时间计算一次风电机组机舱轴线方向与实际风向的偏差,若超出设定范围,则起动偏航对风。

偏航控制系统原理如图1所示,兆瓦级风电机组采用主动偏航对风,风向传感器元件将变化的风向信号转换为电信号,传递到主控系统的偏航电动机控制子程序中,控制器经过比较后给偏航控制系统发出顺时针或逆时针的偏航指令。

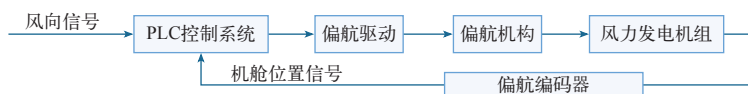


图1 偏航控制系统原理

关键词/Keywords

风力发电机组 ·
偏航系统 ·
提升发电量 ·
现场测试 ·

自动偏航子程序控制策略优化

为了保持在最大迎风面,机舱总是按最短路径进行相应角度的偏转,要求控制系统准确判断并控制偏航电动机的起动和转向。为了确定偏航电动机的转向使风力机转过最小路径,即偏航时间最短,需要计算出偏航角 θ_e 与风向角度 θ_w 和机舱位置角度 θ_T 之间的相对关系。

当风向与风力机叶轮迎风面法线方向角度差小于 180° 时,偏航角为

$$\theta_e = \theta_w - \theta_T \quad (1)$$

通常,风向角度 θ_w 是相对于叶轮迎风面法线的方向角度,故取 $\theta_T = 0$,则偏航角为

$$\theta_e = \theta_w \quad (2)$$

考虑偏航系统的疲劳和载荷,传统偏航控制策略中会设定偏航系统对风角度的起动值,减小其工作强度。其基本方法是:当风电机组偏航角超过设定值时,保持设定时间,起动偏航系统进行对风,减小偏航角。由于允许存在较大的偏航角,因此叶轮扫风面积与来流风速存在较大范围的偏航角,使风电机组未尽可能地实现最大风能捕获。理论上,偏航角起动值越小,偏航系统对风起动作频次越高,风电机组更准确对风。在PLC控制器的每个扫描周期都执行一次偏航程序,可以保证机舱最快对风。

理论上要将风速区间分为无穷小段,每一微元段对应一个偏航角设定值。实际上,偏航系统对风执行过程需要一定的响应时间和足够的动作时间,为了防止系统的频繁动作给偏航系统带来的不良影响,需要设定一个偏航角动作起动阈值。根据风电场风频率密度分布曲线——风速威布尔分布图,一般将风速区间分为四段:在风电机组处于待风模式时,进入偏航停止模式;在风速较低时,起动慢速偏航对风模式;在占全年时间比例最大的风速段,起动快速偏航对风模式;在风速达到机组额定风速后,进入偏航待机模式,优先启用变桨系统进行调节。

设定三个偏航工作区间, v_{n1} 和 v_{n2} 分别为三个风速段的断点。根据 v_{n1} 和 v_{n2} 来划分偏航系统实际

工作区间,即

$$\begin{cases} v \leq v_{n1} & \theta_e = \theta_{e1} \\ v_{n1} < v \leq v_{n2} & \theta_e = \theta_{e2} \\ v > v_{n2} & \theta_e = \theta_{e3} \end{cases} \quad (3)$$

式中, v 为风速; θ_e 为偏航角; θ_{e1} 、 θ_{e2} 和 θ_{e3} 均为角设定偏航系统起动阈值。

基于PLC控制的偏航控制系统是主控系统中的一个子系统,而自动偏航又是偏航控制系统的一个子程序。在风向变化较快的情况下,为了不影响机组出力,针对不同风速段下风机捕获风能的能力进行风速分段控制,机组及时偏航能更快地进行机舱对风。

针对快速和慢速偏航模式的控制策略优化,分别对风速和功率的变化趋势进行对比判断,当两个扫描周期的风速变化 $\Delta v \geq 0$,且功率变化 $\Delta P \leq 0$ 时,表明风向的变化已经对风电机组有功出力产生了明显的影响,此时应马上起动自动偏航对风。偏航控制策略优化控制流程如图2所示。

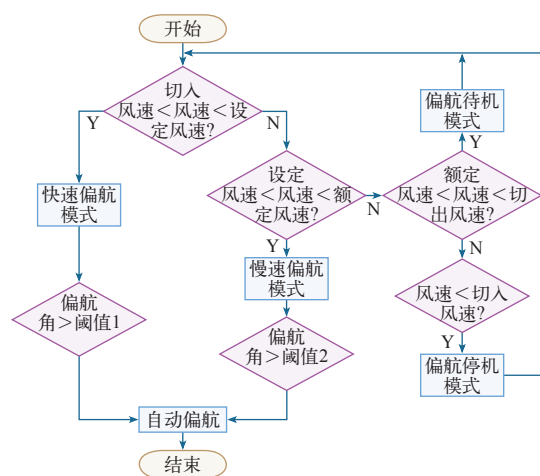


图2 偏航控制策略优化控制流程

仿真分析

为了验证控制策略的可靠性和有效性,以1.5 MW双馈风力发电机组为对象搭建模型进行仿真分析,额定功率1 500 kW,额定电压690 V,额定转速1 750 r/min,切入风速3 m/s,切出风速25 m/s,仿真结果如图3和图4所示。

分别对某北方低温型($\rho = 1.195 \text{ kg/m}^3$, 额定风速12 m/s)和某南方高原型风电场($\rho = 1.091 \text{ kg/m}^3$, 额

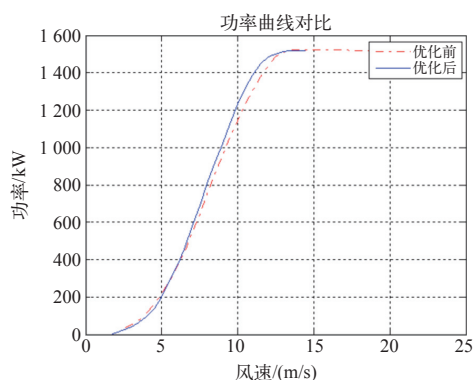


图3 控制策略更新前后功率曲线对比

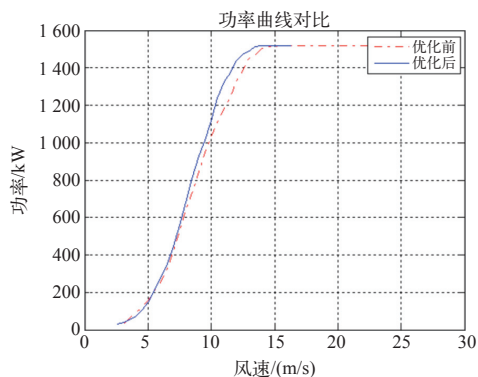


图4 控制策略更新前后功率曲线对比

定风速13.5 m/s) 进行仿真研究, 仿真结果表明, 当机组运行在7 m/s~ v_N 风速段时, 投切新控制策略模块后输出功率曲线有较明显的改善, 根据全场风速威布尔分布图计算可知, 提升比例约为5%以上。

现场测试及结果分析

测试结果说明: ①以风电场集电线路出口电能表上网电量的数据为基础数据; ②以两条相同容量集电线路的上网电量为比较对象, 对比分析在新程序更新前后的发电量增长率; ③当未更新程序的一条集电线路两天的当日发电量接近时, 推定另一条集电线路在这两天的资源状况接近; ④充分考虑到对比当日的机组故障率对发电量的影响。

选用某北方低风速山地风场低温型风电机组进行现场测试, 同时选用某南方低风速山地风场高原型风电机组进行现场测试。测试结果如图5和

图6所示。由全场风速威布尔分布图计算可知, 发电量提升比例在5%以上, 在风速大于7 m/s时, 提升效果尤为明显。由此可以看出, 偏航控制策略现场应用发电量效果较为明显, 机组在风速较高、风向变化较快时能及时追风, 获取更多的风能, 建议在低风速地形复杂的山地风场推广应用。

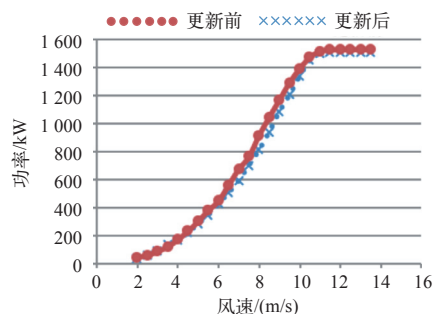


图5 某北方风场测试前后功率曲线对比

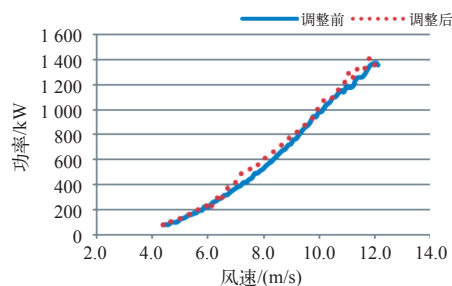


图6 某南方风场测试前后功率曲线对比

风向仪测量对偏航系统响应的影响

在测试风场的两台机组上安装科瑞文的机械式风向仪和超声波风速风向仪, 对输出值进行对比发现, 两种风向仪输出值的偏差大约在15°, 如图7所示, 因而存在偏航系统对风响应滞后的现象。当风向仪的输出偏差过大, 即机舱轴向和风

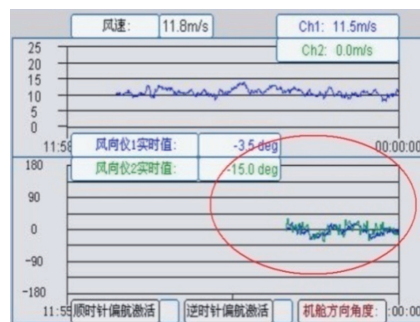


图7 机械式和超声波风向仪信号偏差

向夹角总在一个较大的值时,会造成叶轮迎风面与风向形成一个较大的偏差角。

根据现场观察,超声波风向仪输出信号毛刺多,高频干扰较严重,因此需要对此型号超声波风向仪输出值的滤波参数进行适当调整测试。如图8所示,经过调整后,机械式和超声波式风向仪的输出值基本吻合,符合测量准确度要求。

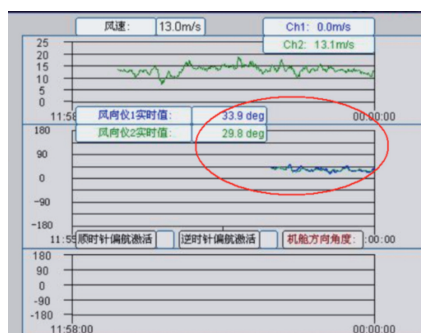


图8 参数调整后机械式和超声波风向仪输出信号

同时,建议在进行风电机组上电调试和更换风速风向仪后,对风速和风向信号分别进行横向校正和纵向校正;不建议在同一台机组上各使用一个机械式和超声波风向仪。

控制策略调整对偏航系统的影响分析

通过分析现场运行数据,在发电量提升的同时,偏航次数明显增多,且增加比例在20%以上,考虑偏航次数的增多对机组偏航系统带来的影响就显得尤为重要。

从偏航动作频度来看,调整前机组偏航次数少,但每次偏航持续时间长,跟踪对风响应慢,在风速较高情况下,偏航角一直处于一个较大的值,风能捕获效率较低;调整后机组偏航次数增

多,但每次偏航持续时间非常短,跟踪对风响应快,实现最大风能实时捕获。从偏航控制系统来看,已完全具备快速响应动作的能力。从总的运行时间来看,调整前后偏航总的持续时间基本相等,也就是说偏航系统总的工作时间基本相等。

同时,为了验证此控制策略对偏航系统的疲劳和载荷影响,需要用Bladed软件进行计算分析,此项工作有待后续展开研究。

结束语

本文针对地形复杂的低风速地区风电场提升发电量的紧迫需求,进一步优化现有自动偏航控制策略。对现场测试运行数据进行分析研究,测试结果验证了控制策略的可靠性和有效性,有效降低了运行载荷和机组振动,提高了风能利用率,并为地形复杂的低风速山地风场发电量提升技术的研究提供了参考。

参考文献

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] Wu K C, Joseph R K, Thupili N K. Evaluation of classical and fuzzy logic controllers for wind turbine yaw control aerospace control system [J]. Aerospace Control Systems, 1993: 254-258.
- [3] 马小英. MW级双馈风电机组偏航控制系统的优化及仿真 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [4] 邹强, 刘波峰, 彭镭. 爬山算法在风力发电机组偏航控制系统中的应用 [J]. 电网技术, 2010, 34 (5): 72-76.

(收稿日期: 2015-03-25) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告