

[控制系统]

变速恒频风力机组电动和液压变桨系统比较分析

文/沈阳鼓风机集团风电有限公司 吴 崧 张天鸿

变桨系统是风力发电机组的重要组成部分，直接影响风机的发电效率和性能。变桨系统分为电动变桨系统和液压变桨系统。介绍了风机的变桨系统原理和两种变桨系统结构并对两种变桨系统进行了简要的对比分析。

随着风力发电机组单机容量的不断增大，在风电动机组中采用变桨距控制技术显得尤为重要。但由于我国风电技术研究起步较晚，尤其是变桨距控制技术与发达国家相比仍有较大差距。

变桨距控制系统是依靠驱动技术和动力系统改变桨距角的大小来改变叶片气动特性的伺服系统，与发电效率、电能质量及风力发电系统的稳定性密切相关，是风力发电技术中极为重要的环节。目前，在全球商业运行的兆瓦级主流风力发电机组中，根据变桨执行机构的不同变桨系统分为电动变桨距系统和液压变桨距系统。从实现的功能上讲，两种变桨系统并没有明显的优劣之分。从性能上讲，两种变桨系统由于执行机构的不同各有特点。本文将对这两种不同的变桨系统进行简要的比较分析。

变速恒频风力机组变桨系统概述

由于风的多变性和随机性，为了得到恒定频率的电能，变速恒频风力发电技术应运而生。在变速恒频风力机组中，采用变桨距结构，启动时通过调节桨距控制发电机转速；并网后，在额定风速以下，调节发电机反转矩时转速随着风速变化以保持最佳叶尖速比从而获得最大风能；在额定转速以上，采用变速和桨叶节距的双重调

节限制风力机获取的能量以保证发电机功率稳定的输出。当超过额定功率时，发电机组的机械和电气设备承受极限要求风轮转速和输出功率都在限定值以下。此时，变桨距系统通过改变叶片角度控制风轮所吸收的机械能，从而减小风机所受到的静态和动态的冲击，保证风机的安全稳定运行。

风电动机组的变桨系统有以下4种主要功能。

- 1) 在风速超过额定值时，变桨系统通过调整叶片的角度来控制风机转速和输出功率不变。
- 2) 在安全链触发时，控制叶片进行空气动力刹车，控制叶片使其顺桨而达到安全状态。
- 3) 在风速低于额定值时，变桨系统通过调整叶片的角度获得最优风能。
- 4) 通过减弱风与叶轮间交互作用引起的振荡来最小化风机上的机械载荷。

根据风机的空气动力学特性，风轮所吸收的机械能为

$$P = C_p \rho A v^3 / 2 \quad (1)$$

式中， P 是风轮吸收的机械能； C_p 是风能利用系数； ρ 是空气密度； A 是风轮扫风面积； v 是风速。

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (2)$$

由式(2)可得风机的功率特性曲线如图1所示,由图可见 C_p 与桨距角 β 和叶尖速比 λ 的关系如下。

①若给定 β , C_p 存在唯一的最大值 C_{pmax} 。

②若给定 λ , 当 $\beta=0^\circ$ 时, C_p 相对最大;随着 β 增大, C_p 则会明显减小。

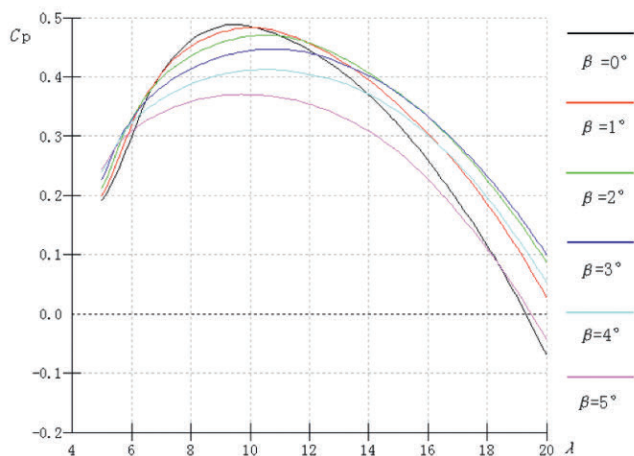


图1 变桨距风机风能利用系数曲线

理论上,根据式(1),风机的输出功率是随着风速的增加而无限增大的,但实际由于风机内的电路电气元件和旋转部件的机械部件的承受都是有限度的,超过限度,风机的一些部件就无法正常工作。所以,当风速超过额定风速时,通过变桨距控制系统使桨距角 β 增大,降低 C_p ,控制风机吸收的风能,使风机输出功率保持在额定功率附近,从而得到恒定功率的电能。

变桨系统控制策略为:额定风速以下,通过控制发电机转速使其跟踪风速,这样可以跟踪最优 C_p ;额定风速以上,通过扭矩控制器和变桨控制器的共同作用,是功率、扭矩相对平稳,功率曲线较好。

电动变桨系统

电动变桨是由伺服电动机作为动力来源,通过减速机、输出轴齿轮与桨叶根部回转支承的内侧齿轮的共同啮合旋转,带动桨叶旋转,从而实现变桨控制调节。

1. 电动变桨系统组成结构

电动变桨系统一般由变桨控制器、备用电源、伺服驱动器和电动机等4部分组成,较为常用

的电动变桨系统结构如图2所示。

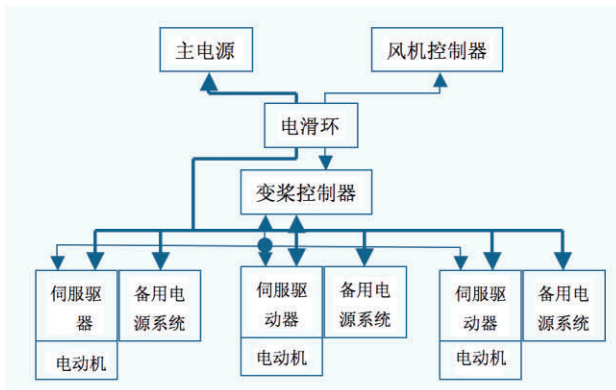


图2 电动变桨系统结构示意图

电动变桨系统以沈鼓风电公司的变桨系统为例进行介绍,如图3所示。变桨系统由3套独立的变桨装置组成,3个叶片中每个叶片都能通过内齿圈与变桨齿轮箱齿轮小齿轮的啮合进行转动,其中变桨齿轮箱齿轮由1个变桨电动机驱动。通过变频器来控制变桨驱动电动机转速,可以使每个叶片的位置由顺桨到工作状态得到连续的、自主的调整。叶片的参考位置点是由PLC中的功率调整算法计算出来的。在安全链触发时,叶片转到顺桨位置降低风电动机组的叶轮转速(空气动力刹车)。即使在电网供电出现故障时,也能实现变桨功能,因为备用电池可以为变频器供电。变桨系统的每个变频柜都有自己的备用电源接口,以确保变频器在断电下能够独立的供电。该备用电源系统是用超级电容提供的。变桨驱动电动机、变桨变频器以及电池等都安装在旋转的轮毂里,轮毂和机舱之间的信号传输、电源输送等是利用滑环实现的。

2. 电动变桨系统控制过程

变桨系统提供以下操作模式。

(1) 自动定位操作模式

自动定位操作模式是风力发电电动机发电状态下的一种操作模式,PLC控制系统根据风速传感器检测到的风速信息经过计算后通过通信总线(如RS232或者RS485)发出一个变桨位置和变桨速度的要求值到变频器,这些要求值通过变桨系统将叶片进行调整,变桨驱动电动机的状态也会及时传回PLC。每个叶片在根部齿圈的极限位置都安装极限位置传感器,确保桨叶角度在安全运行范围内。

(2) 安全运转操作模式

当风机出现故障或者风速过大可能对风机安

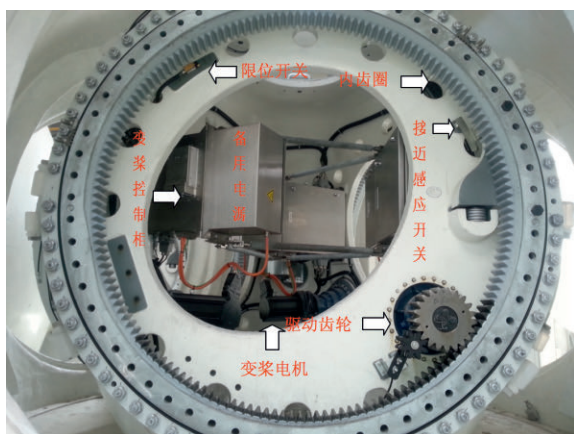


图3 电动变桨风机轮毂内部结构图

全造成威胁时，变桨系统会以最大的速度朝着顺桨方向运动，制动锁定同时也只允许叶片向顺桨方向运动。当接近顺桨位置时，叶片顺桨速度减小，驱动电动机按设定的限定转速和扭矩转动直到叶片停止、控制开关关闭。在顺桨位置，叶片由制动系统进行固定。安全运转会独立于PLC控制系统，由各变桨驱动电动机的运行状态控制实现。

(3) 手动操作

手动操作方式在维修和装配时使用，在变桨柜外面有一个连接插口用以连接维护工具箱，可以控制电动机以恒定速度进行左右转动。

液压变桨系统

液压变桨系统是由液压泵为工作动力来源，液压油作为传递介质，电磁阀作为控制单元，通过活塞杆的径向运动实现桨叶角度变化。液压变桨系统有两种结构方案，一种是通过安装在轮毂内的3套液压执行机构独立控制3个叶片；另一种是采用液压缸为原动机放置在机舱内，通过一套曲柄连杆装置同步驱动3个桨叶旋转，但由曲柄连杆同步驱动3个叶片的方案由于变桨力有限，且无法进行单独叶片的控制，已无法满足兆瓦级风力发电机组的需求，所以现在采用液压变桨系统的风力发电机组多采用独立变桨机构。

1. 液压变桨系统结构

液压变桨系统一般由变桨控制器（PLC）、D/A转换器、电液比例阀和变桨执行机构组成。常用的液压变桨系统结构框图如图4所示。

图5所示的是一种较为常见的独立液压变桨系统执行机构示意图，该变桨系统主要由推动杆、支撑杆、导套、同步盘、桨叶法兰、短转轴、

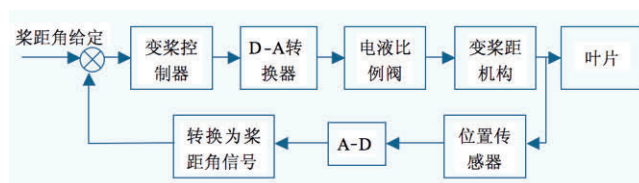


图4 液压变桨结构框图

连杆、长转轴及偏心盘等部件组成。其中，同步盘、短转轴、连杆、长转轴和偏心盘组成了曲柄滑块机构，其主要作用就是将液压推动杆的直线运行转化为偏心盘的圆周运动，达到桨叶转动的目的。

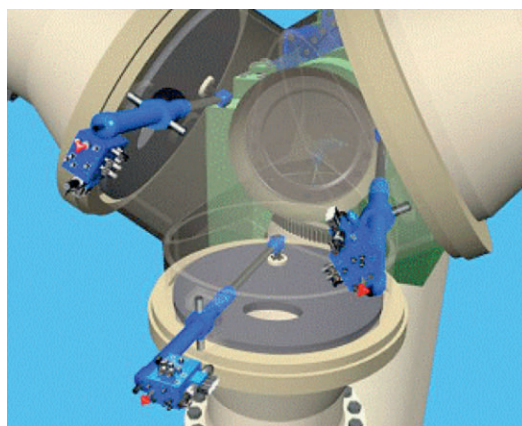


图5 液压变桨系统模拟示意图

2. 液压变桨系统工作过程

在液压变桨系统中，电液比例阀是最为关键的部分，其主要利用比例控制技术将输入电信号来调制液压参数，使之连续成比例变化。在闭环系统中，以实现对变桨的快速、稳定和精确的控制。

液压变桨系统主要工作过程为风机将检测到的风速信号传输到主控中后，PLC通过算法得出桨叶变化所需的桨距角参考信号，变桨控制器将需要变化的桨距角转化为幅值为 $-10 \sim +10$ V的电液比例阀控制电压。电液比例阀根据控制电压改变比例阀输出的大小和方向，决定液体流量的大小，继而达到控制执行机构调节桨距角的作用。在变桨油缸内安装有位置传感器以检测油缸行程的准确位置，此信号将通过A-D转换为桨距角信号发回主控进行实时对比分析，进行桨叶的精确控制，确保桨叶角度控制在最佳状态范围内。在

(下转第95页)

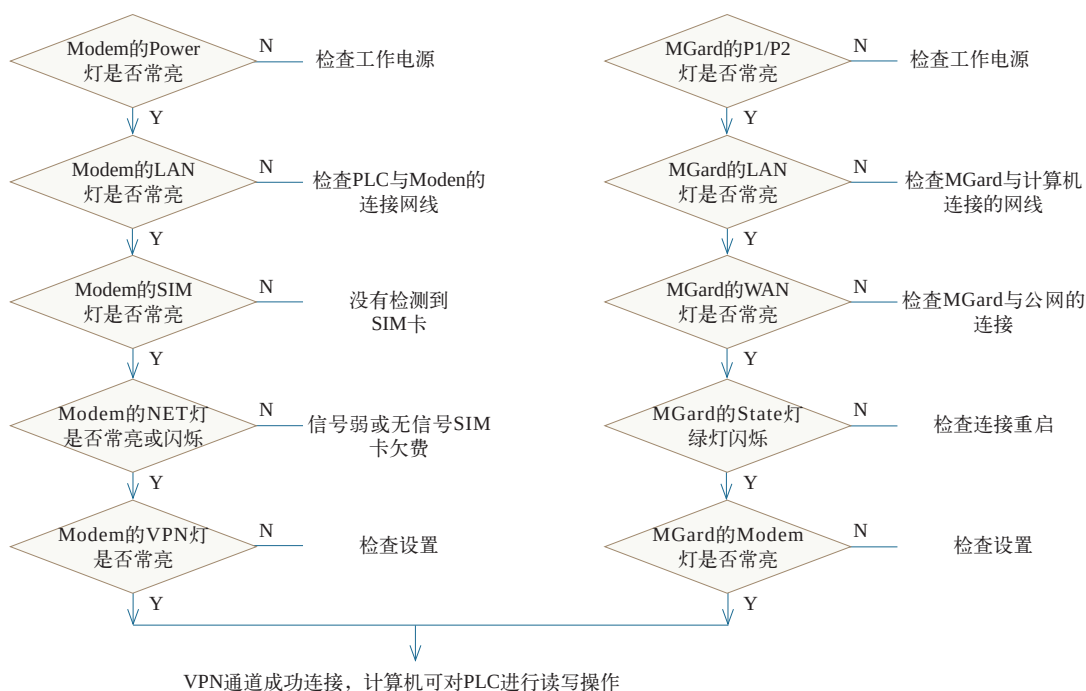


图2 流程图

案，作为历史数据存档。

结束语

本文设计的切丝机远程无线诊断控制系统通过3G网络和以太网得到切丝机的各项信息并发送诊断信息，其的优点在于：充分发挥了切丝机故

障网络诊断系统的作用，一方面提高了切丝机的售后服务质量，另一方面是切丝机用户可以及时得到故障信息反馈及处理意见，从而达到省时、省力、省费用的目的，一举多得。EA

(收稿日期：2014.12.26)

[编辑：杨得润]

(上接第92页)

风机发生紧急状况时，PLC将发出指令，依靠液压系统的蓄能装置提供动力将叶片驱动至顺桨状态。

两种变桨系统对比分析

电动系统和液压系统各自的技术优势很明显，人们对于电动变桨和液压变桨这两种系统的性能有着不同的看法。

采用电动变桨系统，不存在液压油泄漏的风险，因此系统不会有液压系统固有的环境污染问题，同时其能源损耗较少。同时电动变桨系统也比液压变桨系统更加节能，因为液压变桨系统需要液压油泵时刻运转，以使系统保持高油温和足够压力随时准备变桨。此外，电动变桨系统相对于液压变桨系统来说传动结构简单，变桨同步性、准确性更高，耐严寒能力较强，易于维护。

液压变桨系统则具有响应速度快、扭矩大、

便于集中布置和集成化、占用空间较小等优点。液压变桨系统中无需变速机构而且元器件寿命也较电动变桨系统的长，在失电时系统由于采用蓄压器为备用动力来源而无需设计备用电源。

结束语

近些年随着风电行业的发展，电动变桨系统逐渐成为主流变桨系统，越来越多地应用在风力发电机组中，其代表厂商有GE、Nordex、Suzlon、Repower、金风和华锐等。仅有Vestas和Gamesa等少数厂家使用液压变桨系统。目前电动变桨均采用同步变桨，即3个叶片按照统一角度进行变桨，但考虑到某个叶片翼型发生变化、风轮扫风面受力不均等因素，每个叶片按照不同桨距角进行变桨的异步变桨技术将成为未来变桨技术发展的重点。EA

(收稿日期：2014.12.20)

[编辑：杨得润]