

兆瓦级风电机组变桨系统的设计与应用

李晓斌¹, 李国成²

(1. 武汉数字工程研究所, 湖北 武汉, 430074; 2. 湖北宜昌供电局, 湖北 宜昌 443003)

摘要:详细分析了变桨距系统的设计原理和组成,并在此基础上以非线性 PID 算法为控制核心,用 Profibus 总线和 CAN 总线通讯,以超级电容作为后备电源,设计了兆瓦级风电机组变桨距系统,对变桨系统软件开发所涉及的运行模式划分为 5 类,并将研究结果应用于国内某风场,结果表明该系统满足风电机组对变桨系统位置和精度控制的要求。

关键词:风电机组;变桨控制;超级电容

中图分类号:TM315

文献标识码:B

Design and application of MW-grade wind turbine pitch system

LI Xiao-bin¹, LI Guo-cheng²

(1. Wuhan Digital Engineering Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. Yichang Power Supply Bureau, Yichang 443003, China)

Abstract: The design principle and constitution of pitch system are analyzed in detail. MW-grade pitch system is designed with non liner PID algorithm as the control core, Profibus bus and CAN bus as communication, super capacitor as backup power. The system operation model is divided into 5 modular for system software development. The research achievement is supplied on some wind field in our country. The results show that the position and speed precision of the pitch system can be complied with the requirements of wind turbine.

Key words: wind turbine; pitch control; super capacitor

1 概述

风力发电作为一种成熟的新型清洁能源,已经更多地被实际电网所吸纳。但由于风能具有动态和不确定性,因此要求风力发电机组对所获取的风能进行实时控制,风电变桨距系统用来对风能进行控制,设计快速响应、高效可靠的变桨距系统就成为了整机设计和运行的关键所在。为了保障风力发电机组的运行安全,风电机组必须对获取的风能进行控制,传统定桨距风机是通过设计变桨叶片的失速特性来控制风机对风能的获取。随着风机的大型化,现场总线控制技术、交直流电机数字控制技术的发展,风电机组风能获取控制已逐步转向为变桨距,即由过去的定桨失速控制转为变桨变速控制,变桨距控制技术已经成为大

型风电机组控制的主流技术。

2 风电变桨距系统原理

根据空气动力学,风力发电机组所吸收风能的功率可用如下算式进行计算:

$$P_{out} = \frac{1}{2} \times C_p \times A \times \rho \times V^3 \quad (1)$$

其中: P_{out} 为风机所捕获的风能功率 kW; C_p 为风力发电机的功率系数; A 为风力发电机组叶片所扫过的面积 $A = \pi \times R^2$; ρ 为空气密度 kg/m^3 ; V 为风速 m/s 。

由式(1)可知,在一定风速的情况下,要改变所获取风能的输出功率,只有改变风力发电机的功率系数,也就是改变叶尖速比和叶片角度。

$$C_p = F(\lambda, \theta) \quad (2)$$

其中 λ 为叶尖速度比 $\lambda = \omega \cdot R / V$ ω 为风力发电机低速轴机械角速度 rad/s θ 为叶片桨距角度。

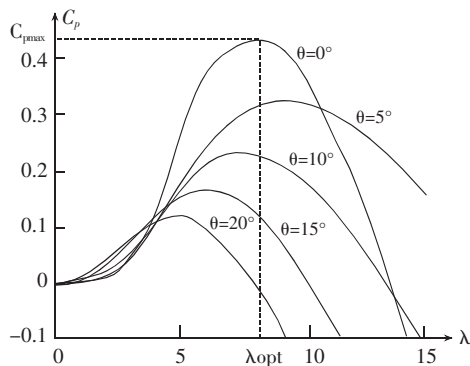


图 1 风力发电机组的 C_p 曲线

由图 1 可知，通过改变发电机转速调节叶尖速度比，可以实现 C_p 值最大，从而保证风机获取最大风能。通过改变气流对桨叶的攻角，实现风电机组功率控制。一方面在同一风速和主轴转速的情况下，可以通过改变叶片角度来改变风力机的功率系数；另一方面也可在不同风速的情况下，通过改变叶片角度，调节主轴转速来改变风力机的功率系数。

此外，为确保 3 个叶片变桨角度的一致性，在实现变桨距系统时，必须确保 3 个叶片的位置环和速度环具有控制精度高、响应快、系统稳定的特点，避免因 3 个叶片的不一致性加剧主轴轴承的不均匀载荷，影响机组的使用寿命。

现以某 1.5MW 风电机组变桨距要求为例，根据整机机组设计，得到该变桨系统具体实现参数如下：

- ① 额定力矩为 25Nm；
- ② 最大驱动力矩为 105Nm；
- ③ 制动力矩为 90Nm；
- ④ 低速变桨为 5°/s；
- ⑤ 正常顺桨角度为 89°；
- ⑥ 变桨校验角度为 2°、88°；
- ⑦ 变桨极限角度为 91°、96°；
- ⑧ 储能顺桨为正常工况下连续 3 次。

3 变桨系统总体组成

变桨距系统载荷具有一定的不稳定特性。系统要求变桨距角度改变响应快，变桨距静态启动

力矩大，并要求能承受可能在运行过程中呈现的突发载荷。一般变桨距系统由变桨电机、减速箱、变桨控制器、变桨驱动器、备用电源以及辅助接近开关、限位开关等组成。

根据上述要求，本文所设计的变桨系统采用三桨叶独立控制方式，如图 2 所示。变桨电机的末端安装绝对值编码器，变桨系统每个叶片设置 2°和 88°的接近开关，91°和 96°的限位开关。主控安全链和变桨轮毂安全链之间具有硬接口连接，主控安全链通过 1 对 24VDC 信号与变桨轮毂安全链连接，一旦主控安全链失电，就会通过 24VDC 信号缺失告知每个变桨距柜主控安全链故障；而另一方面每个变桨距柜安全链 OK 信号会通过 3 个柜体串联成硬的无源触点接入到主控安全链输入模块，一旦主控没有检测到变桨安全链 OK 输入信号，系统整个安全链就报变桨安全链故障。

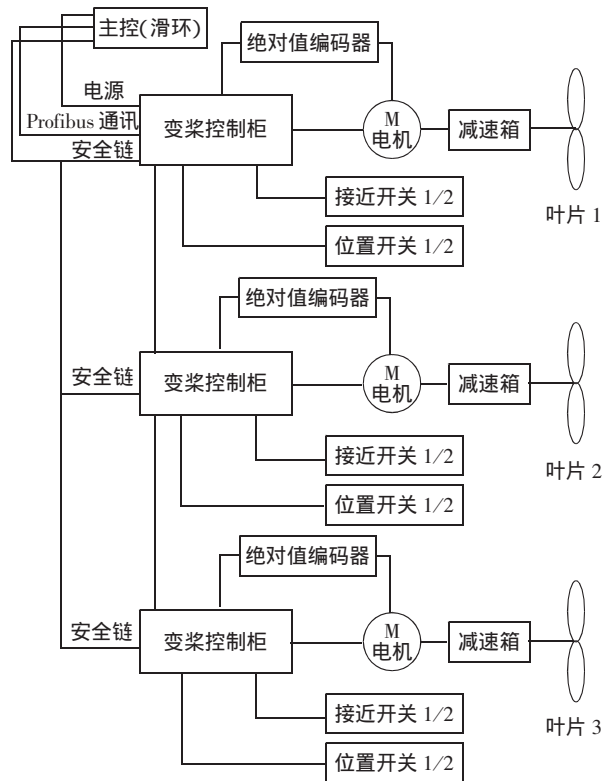


图 2 变桨系统结构图

3.1 系统通讯

变桨系统采用 Profibus 总线与主控 PLC 进行通讯，而在变桨系统内部驱动器、充电器以及变桨 PLC 之间采用 CAN 总线进行通讯。Profibus 总线专

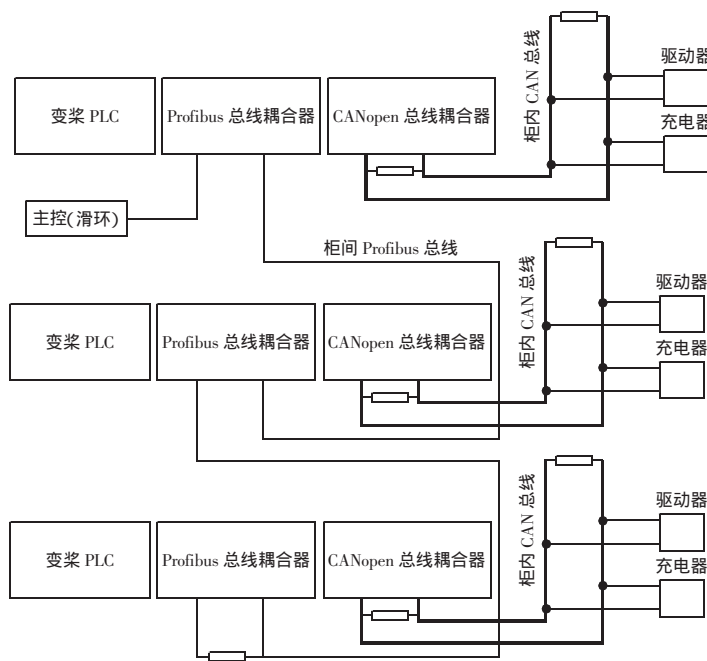


图 3 变桨系统通讯图

门为自动控制系统和设备级分散 IO 之间通信设计,能满足分布式控制系统实时性、稳定性和可靠性的要求,CAN 总线的数据通讯具有突出的可靠性、实时性和灵活性,它采用多主工作方式,网络上的节点在任意时刻都可以向其余节点发送信息,并具有很好的检错效果,本系统将二者的优点结合起来应用,具有通讯速率快,故障率低,节省系统成本的特点,通过总线耦合器,将两种不同协议的总线进行集成。其通讯结构如图 3 所示。

根据系统对变桨距的扭矩要求,选择交流异步电机三相 400VAC 5.5kW,其制动力矩为 100N.m,最大启动转矩为 120N.m。变桨驱动器采用交流伺服驱动器三相 400VAC 6kW,系统速度环和电流环控制在驱动器内部实现。位置环通过主控 PLC 和变桨 PLC 闭环控制实现。

3.2 变桨系统非线性 PID 算法

变桨系统在接收到主控给出的位置信号后,

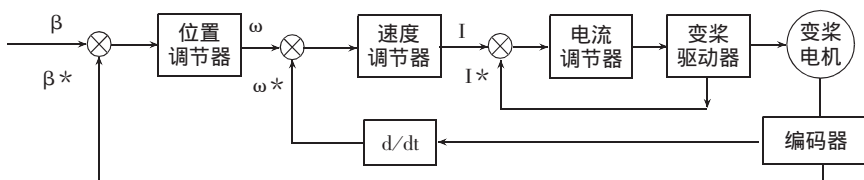


图 4 PID 闭环控制

将其与绝对值编码器的位置值进行比较,根据比较结果,变桨驱动器自身会自动选择参数 K_p 、 K_i 、 K_d 通过驱动器内部的速度、电流闭环进行调节。在进行位置闭环选择计算的同时,会根据绝对值编码器计算实际变桨电机转速,将实际计算的变桨电机转速与所给定的电机转速比较,送入驱动器内部速度控制环进行调节。驱动器自身检测变桨电机绕组的电枢电流,并根据速度调节器计算出的电流,利用电机绕组电压方程、解耦控制以及坐标变换,得到变桨电机绕组的电枢端电压指令,从而根据三相交流端电压指令调节 PWM 信号,驱动变桨电机进行调节。变桨距的位置环、速度和电流调节环如图 4 所示。

3.3 后备电源计算

后备电源是变桨系统的重要组成部分,根据风电场电网接入规定,风电场具有一定的低电压穿越能力,并网点电压跌落时,必须确保风电机组在 3s 内不脱网正常运行。

变桨系统采用超级电容作为后备电源。超级电容具有功率密度高、循环寿命长、工作温限宽、免维护以及绿色环保等特点。其系统结果如图 5 所示。

顺桨一次所需要的能量为,假设以每秒 9° 的速度从 0° 转到 89° ,直流母线额定电压为 85VDC,最低工作电压为 25VDC。系统在电网电压跌落时,3 次顺桨所需要的时间为 30s。

$$W = P \times t = 5500 \times 30 = 165 \text{ kJ} \quad (3)$$

$$W = \frac{1}{2} \times C \times \Delta U^2 \quad (4)$$

根据超级电容所允许的电压降值可取 $\Delta U = 60$ 。

根据式(3)、式(4),可以计算得到 $C = 91.6 \text{ F}$;可选取超级电容为 100F (采用模组进行串联和并联组和实现)。正常情况下,变桨驱动器依靠充电器

输出电源进行供电;一旦电网出现故障,充电器不能正常输出电源的情况下,由超级电容提供电源给变桨驱动器。变桨系统克服 LVRT 功能的能力取

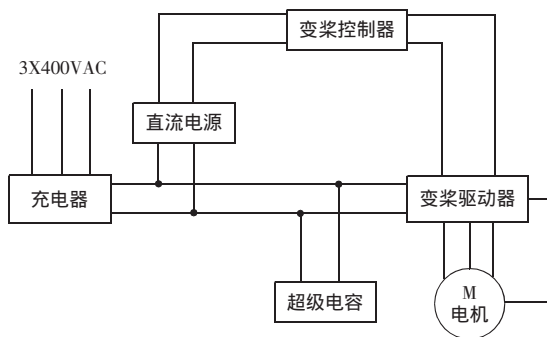


图 5 系统功能图

决于超级电容的容量大小。本系统中充电器既充当电源功能又具有充电器的功能，在超级电容失电后，电网恢复正常的情况下，给超级电容充电，满足系统对后备电源的要求。

4 变桨系统运行模式

根据对变桨系统运行工艺分析，为确保系统正常可靠运行，设定了 5 种工作模式，即正常运行模式、安全运行模式、LVRT 运行模式、强制手动模式以及现地手动模式。各个模块之间的状态转换如图 6 所示。

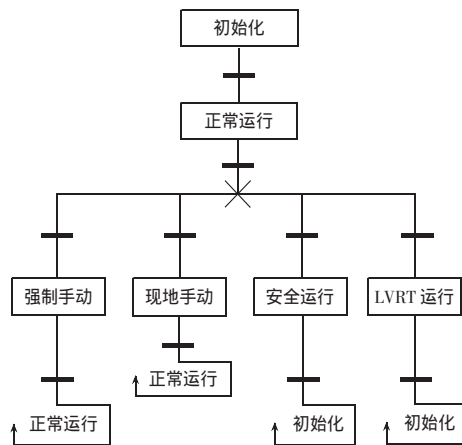


图 6 变桨系统运行模块划分

在正常运行模式下，变桨系统由电网 400VAC 供电，变桨系统根据主控指令设定桨叶角，改变叶片角。在整机安全链断开或者主控要求的情况下，变桨系统进入安全运行模式，变桨系统由电网 400VAC 供电，根据设定的特定变桨速度进行顺桨操作，使变桨系统运行至安全位置，处于安全状态；当电网出现故障时，系统进入 LVRT 运行模式，LVRT 运行模式和正常工作模式类似，不同的是变桨驱动器供电依

靠超级电容来提供，LVRT 运行模式下，变桨系统还是按照主控设定的变桨位置和速度进行变桨，确保风电机组能够正常运行而不脱网；强制手动模式和现地手动模式主要用于变桨系统现场调试时使用。正常现地手动模式屏蔽远程控制变桨系统功能，在叶片处于 2° 至 88° 之间，变桨安全链正常的情况下，可以通过手动选择顺桨或逆桨按钮改变叶片角度，强制手动模式是在叶片处于非正常行程 (2° 至 88°) 之外，变桨安全链不正常的情况下，依靠强制手动将改变叶片位置，使叶片处于正常行程 (2° 至 88°) 之中。强制手动和现地手动一般用于现场调试和叶片维护时使用。

5 变桨系统应用分析

本文对自行研发的变桨系统从工作原理、系统设计以及算法方面进行了介绍，并将该变桨距系统应用于国内某风场进行测试，结果显示该变桨系统满足实际速度和位置调节要求，并具备了低电压穿越功能，实现了变桨系统低风速下的转矩控制和高风速下的功率控制，可实际应用于国内 1.5MW 和 2MW 变速变频风力发电机组。风场应用结果如图 7 所示。风场应用证明了该系统控制精度高，且 3 个桨叶角度变化一致，同步性好。

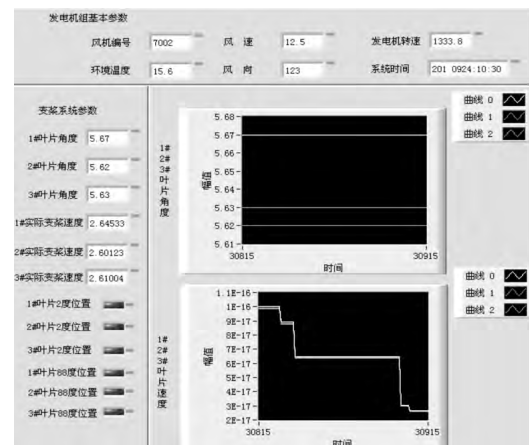


图 7 现场应用效果截图

参考文献：

- [1] 王 鹏, 王 晗等. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计与应用[J]. 中国电机工程学报, 2014 (10): 1528-1537.

(下转第 20 页)

中, P3533 参数可以设置禁止回馈运行。这样, 通过该参数就能实现变频器单象限或四象限功能的切换^[5]。

(2) 制动单元和制动电阻投切控制 制动单元端子 X21.3 设置高电平, 可以禁止制动模块。这样, 制动单元和制动电阻的投切通过控制 X21.3 端子上的信号即可实现。

3.5 程序控制设计

本程序中首先将电网切换开关信号输入 PLC 中, 判断电网状态, 并对变频器和制动单元都作出正确的切换配置, 然后其他的程序编制及变频器参数设置和普通的提升机完全一样, 这里不再赘述, 其程序流程图如图 4 所示。

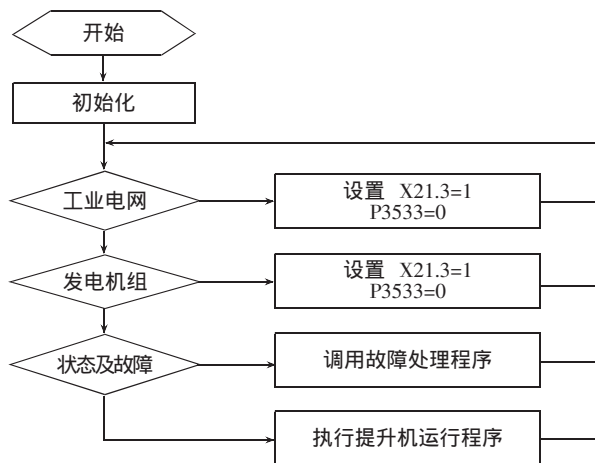


图 4 程序流程图

4 实施效果

本设计已于 2013 年在陕西某煤矿交通罐设计中得到了实际应用, 整个系统运行稳定可靠, 完全

满足矿山工业电网与发电机组切换下的应用要求, 得到了用户的一致好评。

5 结束语

项目实施效果充分证明本设计的可行性及可靠性。它不仅满足矿山提升机在工业电网下充分节能降耗的要求, 而且保证了系统在发电机组应急电源下的安全可靠能力, 是一种值得推广的、可用于工业电网和发电机组电网下的经济可靠的提升机变频控制系统。

参考文献:

- [1] 王清灵, 龚幼民. 现代矿井提升机电控系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 1-6.
- [2] 高性能多机传动变频调速器产品目录 D21.3.CN[Z]. 北京: 西门子(中国)有限公司, 2010.
- [3] SINAMICS S120 书本型功率部件设备手册[Z]. 北京: 西门子(中国)有限公司, 2012. 27-600.
- [4] SINAMICS S120 控制单元设备手册[Z]. 北京: 西门子(中国)有限公司, 2012. 23-247.
- [5] SINAMICS S120/S150 参数手册[Z]. 北京: 西门子(中国)有限公司, 2012.

作者简介:

周雨松(1977-), 男, 湖北黄冈人, 学士, 工程师, 长期从事矿井提升机交直流电控系统的设计与研究, 2008 年曾获甘肃省科学技术进步二等奖。

收稿日期 2014-02-17

(上接第 16 页)

- [2] 马忠鑫, 潘庭龙. 风电系统独立变桨距控制综述[J]. 微特电机 2011 (12): 60-63.
- [3] 侯世英, 房勇, 曾建兴. 应用超级电容提高风电系统低电压穿越能力[J]. 电机与控制学报 2010, 14(5): 26-34.
- [4] 宋建秀, 吉天平, 许力伟. 兆瓦级风力发电机组变桨距系统[J]. 大功率变流技术 2011 (1): 31-35.
- [5] YILMAZ A S, ÖZER Z. Pitch Angle Control in Wind Turbines above the Rated Wind Speed by Multi-layer Percep-

tron and Radial Basis Function Neural Networks[J]. Expert Systems with Applications 2009, 36(6): 9767-9775.

作者简介:

李晓斌(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事风力发电控制系统研究与开发。

收稿日期 2014-06-24