doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.032

恒压网络电液变量马达的风力机变桨距控制

殷秀兴 林勇刚 李 伟 王成东 刘宏伟 顾亚京

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室,杭州 310027)

摘要:提出恒压网络电液变量马达的风力机变桨距控制技术,通过调节接入到恒压网络中变量马达的排量来控制 变桨转矩和方向,并适应变桨载荷的变化。在此基础上,构建了系统数学模型,分析了其双闭环的桨距角位置控制 特性和参考桨距角的模糊给定策略,并进行了仿真实验。结果表明,变量马达变桨距的响应速度较快,可将传动链 转矩稳定于额定值的5%以内,将功率稳定于额定值的6%以内。相比于常规变桨距方式,该方式变桨效率较高, 功率和转矩控制的准确性较好。

关键词:恒压网络 风力机 变量马达 变桨距 双位置闭环控制 中图分类号:TM614;TK83 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2014)11-0206-06

引言

当来流风速高于其额定值时,风电系统根据风速的变化,通过变桨距控制,实时地调节桨叶的节距角,限制风轮捕获的机械动能,稳定输出功率,同时降低载荷波动和冲击。并网过程中,变桨距控制还可实现发电机快速无冲击地并网运行,提高系统的发电效率和电能质量。变桨距作为主流风电机组实现变速运行与功率控制的必备的关键技术之一,正起到越来越重要的作用。国外大型尤其是兆瓦级以上的变速恒频风力机组也都毫无例外地采用了变桨距控制技术^[1]。

然而,目前风力机均采用电动或液压缸的变桨 距控制方式^[2-8]。针对电动变桨距的研究较多地涉 及电机变桨距的模型与控制方案,并未指明该系统 的缺点和改进的方向。文献[9-12]较多地关注变 桨距控制器的设计,但并未研究液压变桨距控制的 精度和简洁性等问题。

姜继海等^[13]和马琛俊^[14]设计并研究了风力机 的直驱式容积控制及其节能型电-液复合变桨距系 统。设计了该系统的半物理仿真实验台,进行了仿 真实验研究,证明了该系统的可行性和有效性。然 而,该系统变桨距控制的关键元件仍采用液压缸,且 该系统强调变桨距控制中并不重要的节能性,对控 制的高效性和精度却未涉及,系统效率和精度有待 验证。 电动变桨距的系统结构较为紧凑,同步与准确 性较好,但易产生过量热负荷,较难实现大惯量负载 的变桨距控制^[15]。液压变桨距^[16]容易实现大惯量 负载的变桨距控制,但采用阀控缸与活塞连杆形式 的传动机构,需将液压缸的直线位移转换为桨距角 位移,因线位移与角位移间存在非线性转换,从而导 致系统控制精度较低,动态性能欠佳。

鉴于此,提出恒压网络电液变量马达的变桨距 控制方式,采用电动机与变量液压马达联合作动与 控制的方式,不仅具有电动变桨距的结构简洁等优 点,而且具有液压变桨距易于实现大惯量负载的变 桨距控制的优点。同时,该方式克服了电动变桨距 的易过热和液压变桨距结构复杂、控制精度较低等 缺点。

本文设计变量马达变桨距控制系统,阐述其变 桨距控制的工作原理,构建系统变桨距控制的数学 模型,给出桨距角的双闭环位置控制模型。同时,提 出参考桨距角的模糊给定策略,并搭建仿真实验平 台,进行变桨距控制的对比实验研究。

1 设计与原理

如图 1,变桨距系统主要由恒压网络、变排量液 压马达、变桨齿轮系以及风力机桨叶等构成。其中, 由电动机、变量泵、蓄能器、安全阀等构成了恒压网 络,该网络输给变排量液压马达的油压相对稳定,压 力大小取决于蓄能器的充液状态,流量随变桨载荷

通讯作者:林勇刚,副教授,主要从事风力及海流能发电研究, E-mail: yglin@ zju. edu. cn

收稿日期: 2013-12-16 修回日期: 2014-03-04

^{*}国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51221004)和"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAA01B01) 作者简介:殷秀兴,博士生,主要从事风力及海流能发电与控制研究,E-mail:lixingfile@163.com

的变化而变化。变量液压马达通过行星式变桨齿轮 系与桨叶连接,该液压马达为 Rexroth A6VM 系列电 液比例连续变排量液压马达,采用轴向柱塞斜盘式 结构,通过电控比例方向阀和变量液压缸对其排量 进行连续地控制,其排量正比于所施加的电流控制 信号,内置的变量缸位移传感器用于实时检测马达 排量。比例放大器将控制器输出的电压信号转成电 流信号以驱动比例方向阀和变量液压缸动作,变量 液压缸调节马达斜盘倾角的位置以及缸体与主轴之 间的夹角来控制马达排量和输出的变桨转矩的大小 方向,进而获得与变桨过程相对应的转角、转速、转 向和功率,并适应变桨负载的变化,从而使得桨叶绕 自身轴线回转,实现桨距角的调节和系统功率控制。



Fig. 1 Design principle

1. 电动机(Y2250M-2型) 2. 单向阀 3. 蓄能器 4. 位移传感器 5. 变量液压缸 6. 电液比例方向阀 7. 变量液压马达 (A6VM500EP2/63W2-VZH017BE型) 8. 角位移传感器 9. 变 桨齿轮 10. 桨叶 11. 比例放大器 12. 控制器 13. 控制器 (PI) 14. 安全阀 15. 油箱 16. 过滤器 17. 变量液压泵 (A4VS040DR/10X-PPB13N00型)

控制系统采用双闭环位置控制结构,内环为比 例阀变量缸构成的变量马达的反馈闭环,外环为输 出桨距角反馈的控制闭环。设置2个PI位置控制 器,采用S7-200PLC内嵌的PID指令计算获得控 制量。其具体实现方式为:通过模拟量输入模块读 取马达排量或桨距角反馈量并转换成数字量后进入 CPU模块。在CPU内,该数字量规范化为标准值并 写入PID回路表的过程变量中,该量与桨距角设定 值相比较,获得偏差量,对该偏差值执行PID指令计 算输出值,该值作为控制量经模拟量输出模块转换 成模拟量输入到比例阀中,进而控制变量缸的位置和 液压马达的排量来实现桨距角的精确跟踪与控制。

系统主要工作流程为:机组启动后,当输入风速 达到切入风速时,风轮开始旋转,风力发电机并网并 进入发电运行状态。当风速低于额定值时,机组处 于欠功率状态,此时桨距角维持在0°附近。当风速 超过额定值时,变桨距控制过程启动,机组进入功率 控制阶段。此时,电动机带动变量液压泵工作,压力 油经滤油器、变量泵和单向阀后输出并作为驱动变 量马达及其变量机构的恒压油源。同时,比例方向 阀得电并控制变量液压缸活塞杆变量的位移,变量 液压缸继而控制变量液压马达进行变桨距控制。当 实际输出功率超过额定值较多时,比例阀处于右位, 变量液压缸左移,变量液压马达带动桨叶顺桨,桨距 角增大;当实际功率减小到很接近额定值且二者之 差的变化率较大时,变量马达带动桨叶逆桨,桨距角 减小。当风速高于切出风速或者系统故障时,变量 液压马达带动桨叶快速顺桨至桨距角达到 90°附 近。此时,风轮转速和发电机功率降低,当功率降低 至0时,发电机脱网,机组制动并停机。

该系统为新型高效节能型液压系统,可通过流 量的反向流动和蓄能器实现能量回收,回收的液压 能可贮存或供下次驱动负载时使用,较为适合于具 有频繁往复动作的变桨过程。由于蓄能器平衡了峰 值功率,在变桨加速时能提供较大流量,因而变桨的 最大速度并不完全取决于泵站容量大小,这样可按 工作周期内平均功率设计安装泵站,降低功率损耗, 提高系统效率,并保护液压元件免受液压冲击损害, 延长使用寿命,减少噪声污染。

变量马达与恒压网络直接耦联,可无损耗的从 中获取液压能,这样恒压网络中可接入相互独立的 多个变量马达,各马达分别独立地调节各自的转角、 转速、转矩和功率,执行独立的控制规律,有助于实 现各桨叶独立变桨控制。

与传统静液压传动相比较,该系统具有较高的 控制性能,可以进行能量的存储和重新利用,无明显 的压力峰值和波动。同时,由于系统设计功率的减 小,可以大大降低设备的制造成本,提高系统效率。 与电传动相比较,系统动态闭环响应较快、功率密度 较高,有助于实现大型风力机的精确变桨距控制,系 统结构紧凑、能够在较小的安装空间内部实现变桨 距操控。

2 系统控制模型

由于恒压网络的动态性能较好,其液压时间常 数对变桨动态特性影响较小,所以可不考虑油源部 分的动态性能对输出桨距角的影响,并可认为恒压 网络的输出油压基本保持不变,这样不仅能简化研 究的复杂性,同时能保证结果的准确性。

本文主要探讨变量液压马达及其输出桨距角位 置闭环的数学建模及其特性分析。

2.1 变量液压马达模型

2.1.1 电液比例阀动态模型

电液比例阀动态可用二阶振荡模型^[17]表达,即

$$W_{v} = \frac{Q_{v}(s)}{I(s)} = \frac{K_{v}}{\frac{1}{\omega_{v}^{2}}s^{2} + \frac{2\xi_{v}}{\omega_{v}}s + 1}$$
(1)

- 式中 Q_v ——电液比例阀输出流量, m^3/s I——电液比例阀输入电流,A K_v ——电液比例阀流量增益, $m^3/(s\cdot A)$ ω_v ——电液比例阀固有频率,rad/s
 - ξ_ν——电液比例阀阻尼比

当系统频率低于 50 Hz 时,其动态可用一阶惯 性环节描述,即

$$W_V = \frac{K_V}{T_V s + 1} \tag{2}$$

式中 T_v——电液比例阀时间常数,s

2.1.2 变量马达动态模型 变量液压缸连续性方程

安重被压缸连续性力程

$$q_{V} = A_{g} \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + C_{\iota c} p_{L} + \frac{V_{\iota}}{\beta_{e}} \frac{\mathrm{d}p_{L}}{\mathrm{d}t}$$
(3)

- 式中 q_v ——变量液压缸流量,m³/s
 - A_{g} ——变量液压缸有效作用面积,m² C_{te} ——变量液压缸泄漏系数,m·N/s p_{L} ——变量液压缸两腔压差,m³
 - V_{ι} ——变量液压缸两腔总容积,m³
 - β_e ——液压油体积弹性模量,N/m²

y——变量液压缸活塞位移,m

变量液压缸动力微分方程

$$A_{g}p_{L} = m \frac{\mathrm{d}^{2} y}{\mathrm{d}t^{2}} + B_{e} \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + K_{1}y + F_{SE} \qquad (4)$$

式中 m——变量液压缸活塞质量,kg

 B_e ——变量液压缸阻尼系数, N/(m·s)

K1----变量液压缸弹簧等效刚度,N/m

F_{se}——活塞与斜盘之间作用力,N

液压马达排量方程

$$V_2 = \frac{V_{2\max}}{y_{\max}}y = \frac{V_{2\max}}{\alpha_{\max}}\alpha$$
(5)

式中
$$V_2$$
——液压马达的排量,m³/rad
 V_{2max} ——液压马达最大排量,m³/rad
 y_{max} ——变量液压缸最大位移,m
 α_{max} ——变量斜盘最大摆动角度,(°)
 α ——变量斜盘摆动角度,(°)
液压马达的力矩平衡方程

$$M_2 = p_0 V_2 = J_2 \frac{\mathrm{d}^2 \varphi}{\mathrm{d}t} + R_H \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} + M_L \tag{6}$$

式中
$$M_2$$
——液压马达转矩, N·m
 p_0 ——恒压网络压力, N/m²
 J_2 ——液压马达转动惯量, kg·m²
 φ ——液压马达转角, rad
 R_{II} ——液压马达阻尼系数, N·m·s/rad
 M_L ——变桨负载转矩, N·m
2.2 系统模型

电液变量液压马达动态模型的 Laplace 变换为

$$Q_{V} = A_{g}sY + C_{ie}p_{L} + \frac{V_{i}}{\beta_{e}}sp_{L}$$

$$(7)$$

$$A_g p_L = ms^2 Y + B_e sY + K_1 Y + F_{SE}$$
(8)

$$V_2 = V_{2\max} \frac{Y}{Y_{\max}} = V_{2\max} \frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$$
(9)

$$M_2 = p_0 V_2 = J_2 s^2 \varphi + R_H s \varphi - M_L \tag{10}$$

式中 Y----y 的 Laplace 变换

根据式(1)~(10),可得系统桨距角控制模型, 如图 2 所示,其中,采用双 PI 控制器和双位置传感 器构成双位置反馈控制闭环,这样,不仅能实现桨距 角的高精度跟踪控制,且可实现电液马达排量的高 效控制。系统控制模型中的具体参数可根据该模型 通过仿真调定,其中,K_A和 K_B分别为反馈增益,i_g为 变桨齿轮系的减速比。



图 2 系统控制原理框图

Fig. 2 Control principle

3 仿真实验

为验证马达变桨距控制的可行性与高效性,搭 建实验平台并进行变桨距对比仿真实验。

3.1 原理

如图 3 所示,该实验平台主要由 Labview 程序

软件、数字风电机组、数据采集卡、PLC 控制器、变桨 距系统以及风力机实验台等构成。数字风电机组采 用 Bladed 软件^[18]开发,用于模拟产生随机风速并 计算得到桨距角参考信号。Labview 程序软件主要 由数据采集、显示、交换以及运行控制模块等构成, 数据采集模块经由数据采集卡获得系统运行过程数



图 3 实验原理图

Fig. 3 Experimental principle

据,送入数据显示模块并在界面显示,同时数据交换 模块通过外部控制器 External Controller 与数字风电 机组交换数据,将过程数据如桨距角信号等送入机 组计算,而将发电机功率等计算的结果数据发送到 显示模块和界面进行显示,运行控制模块用于系统 启动、停机、变桨距控制等运行状态的控制和切换。 风力机实验台采用主轴力矩电机拖动的风轮来模拟 实际风力机运行。经由 PLC 产生的控制信号作用 于变量马达变桨距装置和风力机桨叶,产生实际的 变桨距动作,而系统运行的过程数据如压力、流量、 油温以及桨距角等经数据采集卡馈送回到界面显示 或进行内部的数据交换。

系统启动后,Bladed 软件产生随机风速信号并 仿真机组运行,当风速达到或超过额定值后,变桨距 过程开启。此时,由 Bladed 计算得到的桨距角参考 信号作为给定值输入到 PLC 中,PLC 采用 PI 算法计 算得到控制量,送入变桨距系统中,控制变量马达排 量,调节风轮桨距角并最终稳定发电机功率到额定 值附近。

桨距角参考信号由模糊算法计算获得,其计算 原理为:当风速高于额定值时,为保证输出功率稳 定,控制器根据实际输出功率 P 与额定功率 P_g 的偏 差 $e = P_g - P$ 及偏差变化率 de/dt 的大小和正负,按 照风能利用系数 C_p 与桨距角的反相关的关系,调节 桨距角,改变输出功率。这样,对应于某组 e 和 de/dt,即有相应的桨距角最佳值,该值即为桨距角 参考值。例如,若 e 和 de/dt 均为正值且较大,即表 明,实际输出功率低于额定功率且两者偏差有逐渐 增大的趋势,这时,须减小桨距角,以增大 C_p ,从而 捕获功率和输出功率相应地增大,e 和 de/dt 相应地 减小,输出功率得以稳定于额定值附近。

工控机内的数字风力机采用德国 NORDEX 的 某成熟风力机型,其额定功率为 1.5 MW。实验中

做对比用的液压缸变桨距机构由液压缸、转杆、中间 连杆、推盘等构成。其中,推盘与液压缸活塞杆固 连,转杆通过加强筋与桨叶根部相连接并可围绕桨 叶变桨轴线转动。液压缸活塞杆与推盘运动一致, 活塞杆的水平运动推动推盘移动,导致转杆支点沿 着桨叶轴线转动,即改变桨距角,该角度改变值与液 压缸活塞杆位移近似成正比。

3.2 结果与分析

图 4 为系统的随机风速曲线,风速最高值为 25 m/s,最低值为 10 m/s,额定风速为 18 m/s,由工 控机中"Bladed For Windows"软件随机产生。



图 5 为桨距角信号曲线,据图 5 可知,桨距角变 化范围为 10°~20°,变化的大体趋势与风速直接相 关,同时,相比于液压缸变桨距的桨距角信号,变量 马达变桨距的桨距角信号的变化较为迅速,说明其 对于功率控制的实时性较好。



图 6 和图 7 为两种变桨距方式的传动链转矩响 应的对比,据图可知,采用液压缸变桨距的传动链转 矩波动范围为 0.7~1.1 MN·m,而在变量马达方式 下为 0.86~0.96 MN·m,可见,变量马达变桨距有助



Fig. 7 Drivetrain torque of motor based pitch control

于平滑传动链转矩波动,降低载荷干扰。

图 8 和图 9 为两种变桨距方式的机组输出功率 的对比,由图可知,液压缸变桨距的功率范围大约稳 定于 1.3 ~ 1.7 MW,相比于额定功率波动幅度为 26%,而变量马达变桨距的功率大约稳定于 1.5 MW 的额定值附近,波动幅度大约为 6%,这样,变量马 达变桨距能更好地稳定输出功率,具有较好的功率







控制效果和控制精度。

4 结论

(1)恒压网络变量马达变桨距系统为新型高效 节能型液压系统,具有效率密度高、控制精度高和结构紧凑等优点,较为适合于具有频繁往复动作的变 桨过程。

(2)变量马达与恒压网络直接耦联,可无损耗的从中获取液压能,这样网络中可接入独立的多个 变量马达,各马达执行独立的控制规律,有助于实现 各桨叶独立的变桨控制。

(3)相比于传统的液压缸变桨距方式,变量马 达变桨距系统能够实现变桨距控制,其变桨距控制 的响应速度和精度相对较高。

(4)马达变桨距系统能将传动链转矩稳定于额 定值的5%以内,将输出功率稳定于额定值的6%以 内,能较好地抑制功率和传动链转矩载荷的波动。 对马达变桨系统的研究具有一定的理论意义和较好 的工程应用价值。

参考文献

- 殷秀兴,林勇刚,李伟,等. 基于电液行星锥齿马达的变桨距控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014,48(2):206-213.
 Yin Xiuxing, Lin Yonggang, Li Wei, et al. Study on variable pitch-controlled technology based on electro-hydraulic planetary bevel gear motor [J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2014,48(2):206-213. (in Chinese)
- 2 孙靖宇.基于永磁同步电机的电动变桨研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2010.
- Sun Jingyu. Electric pitch study based on PMSM[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
 3 程海英.大型风力机电动变桨距控制技术研究[D]. 沈阳:辽宁工程技术大学,2011.
- Cheng Haiying. Large electric variable pitch wind turbine technology research control [D]. Shenyang: Liaoning University of Engineering and Technology, 2011. (in Chinese)
- 4 李永伟.风力发电机组电动变桨距控制系统的设计[D].保定:河北农业大学,2010. Li Yongwei. Electric pitch wind turbine pitch control system design [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 5 王翔.基于直接转矩控制的电动变桨距系统研究[D].兰州:兰州交通大学,2011.
 Wang Xiang. Electric pitch system based on direct torque control [D]. Lanzhou; Lanzhou Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
 6 叶成城.兆瓦级风电机组电动变桨距控制系统的研究与实现[D].上海;上海交通大学,2013.
- Ye Chengcheng. Megawatt wind turbine electric pitch systems research and implementation [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013. (in Chinese)

7 梁永兴. 电动变桨系统的无模型自适应控制研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2012. Liang Yongxing. Model-free adaptive electric pitch control system [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

8 施琴.小型独立风力发电系统的研究[D].镇江:江苏大学,2010.
Shi Qin. Small independent wind power generation system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
9 高桃桃.大型风力机液压变桨驱动技术研究及控制[D].保定:华北电力大学,2012.

Gao Taotao. Large wind turbine hydraulic pitch control technology research [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012. (in Chinese)

- 10 陈卿. 大型风力机组独立液压变桨距系统研究[D]. 长沙:中南大学,2010. Chen Qing. Large wind turbines hydraulic pitch system independent study [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- 11 付冬梅,李彤.风力发电机液压变桨距控制系统的研究[J].电力学报,2012,27(3):216-220.
 Fu Dongmei, Li Tong. Study of wind turbine pitch system hydraulic pitch control [J]. Journal of Electric Power, 2012,27(3): 216-220. (in Chinese)
- 12 衣传宝.双馈型风力发电机组变桨距控制系统研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2009.
 Yi Chuanbao. Double-feed wind turbine pitch control systems research [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009. (in Chinese)
- 13 姜继海,苏文海,李阳,等. 兆瓦级风力机节能型电-液复合变桨距系统实验研究[J]. 液压与气动, 2013(2):57-61. Jiang Jihai, Su Wenhai, Li Yang, et al. Megawatt wind turbine energy-saving power - liquid composite varying systems and experimental study [J]. Hydraulic and Pneumatic, 2013(2):57-61. (in Chinese)
- 14 马琛俊.大型风力发电机组直驱式容积控制变浆距系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
 Ma Chenjun. Large direct-drive wind turbine pitch system volume control study [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- 15 王亚飞,赵斌,许洪华.风电机组电动变桨距系统的研究[J].可再生能源, 2011,29(5):6-9.
 Wang Yafei, Zhao Bin, Xu Honghua. Wind turbine electric pitch system [J]. Renewable Energy, 2011,29(5):6-9. (in Chinese)
- 16 殷秀兴,林勇刚,李伟,等. 电液数字马达变桨距控制与辨识[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014,48(5):777 783.
 Yin Xiuxing, Lin Yonggang, Li Wei, et al. Control and model identification of an electro-hydraulic digital pitch system [J].
 Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014,48(5):777 783. (in Chinese)
- 17 吴根茂,邱敏秀,王庆丰,等.新编实用电液比例技术[M].杭州:浙江大学出版社,2006.
- 18 Bossanyi E A. Bladed theory manual [R]. Bristol, UK: Garrad Hassan and Partners, 2005.

Pitch Angle Control for Wind Turbine Based on Constant Pressure Network and Hydraulic Motor with Variable Displacement

Yin Xiuxing Lin Yonggang Li Wei Wang Chengdong Liu Hongwei Gu Yajing

(The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A novel pitch control system is proposed for wind turbine to stabilize the drive-train power and torque fluctuations. This system is based on a constant pressure network and a hydraulic motor with variable displacement. The desired pitch control motions and directions can be achieved by regulating the displacement of the hydraulic motor to adapt to the varying loads acting on the blade. Mathematical model and a detailed analysis for the control characteristics of the system are provided. Further, a double control loop for position feedback is proposed to accurately track the desired pitch angle which is obtained based on fuzzy reasoning. Experimental results have demonstrated that this system can effectively control the power and driver torque, and consequently maintain the output power and torque on the rated values. In addition, this novel system has the advantages of high power versus volume, energy-saving and is particularly suitable for large scaled individual pitch controlled wind turbine.

Key words: Constant pressure network Wind turbine Hydraulic motor Variable displacement Double feedback position control