

基于神经元 PID 的风力发电机组独立变桨控制

唐春林¹, 郑宇²

(1. 重庆公共运输职业学院, 重庆 400030; 2. 西华大学 电气信息学院, 四川 成都 610039)

摘要:依据风力机空气动力学原理,设计了神经元 PID 控制器,实现了风力发电机组 3 个桨叶的独立变桨控制。通过神经元 PID 控制,计算出桨距角,并与 Park 变换得到的附加桨距角相加,作为独立桨距角的设定值。基于 Fast 软件平台,以 2 MW 变速变桨风力发电机组为验证对象,对提出的控制策略与传统的统一变桨距控制策略进行仿真比较。结果表明,相对于统一变桨距控制,所提出的方法能有效确保在额定转速下机组输出功率稳定,同时也能有效降低风力发电机组各零部件的疲劳载荷。

关键词:变速变桨; 神经网络; 独立变桨控制; 桨叶根部载荷; Fast 软件

中图分类号: TM315 **文献标志码:** A

近年来,高额定功率的大型风力发电机组广泛应用于现代风电。随着风力发电机组容量的提升,也相应地要求风轮的直径和机舱高度进一步增大,导致风机桨叶所承受的不均匀载荷以及机组其他零部件所承受的载荷变大,这样就会严重缩短风机的使用寿命,增加其运行和维护费用^[1]。风轮叶片的不均匀载荷是由风的湍流、风切、塔影效应和风轮不平衡等因素所致^[2]。当即时风速大于额定风速时,统一变桨距控制能保证机组稳定地以额定功率输出。然而,实际上由于风轮直径很大,作用在各个桨叶上的风速并不相同,作用在各叶片上的气动力也会有很大的差异,在这种情况下,如果仍采用统一变桨距控制,则将导致桨叶承受不平衡的载荷,加速风机零部件的疲劳、老化。而独立变桨控制策略则有望缓解桨叶受力不均的问题,目前已成为大型风力发电机组控制技术研究热点之一^[2-3]。

目前国内外学者对风机的独立变桨控制进行了一定研究,主要有:胡岩等人提出的基于风切效应的独立变桨控制策略,该策略能有效降低因风切导致的不均匀载荷^[3]。参考文献[3]中提出的基于桨叶方位角信号的多段权系数分配独立变桨距控制方法,是通过风切和塔影效应模型来分配桨叶的桨距角,以减小风切

和塔影导致的不均匀载荷。在工程实践中,由于湍流而导致的随机变化在风机的不平衡载荷中占主导地位,所以通过该途径很难取得较为理想的效果,尤其是在大型叶片上,不同位置的桨距角所发生的近似变化也会有所不同。

本文提出的基于神经元 PID 的独立变桨控制策略,是当风力发电机组在超过额定风速的条件下运行时,先利用传感器采集 3 片桨叶的根部 M_y 载荷^[4],然后通过神经元 PID 单元计算出附加桨距角,将其与统一变桨控制器的输出相加之和作为桨距角的设定值。通过 Fast 软件对所设计的控制策略进行仿真分析^[5],仿真结果表明:该方法不仅能够使风机的输出功率稳定在额定功率附近,而且还能减小风机关键零部件的疲劳载荷^[6]。

1 风力机组桨叶载荷分析

风力发电机组依靠叶轮将风的动能转化为机械能,桨叶是风力发电机组的主要承载部件^[3]。桨叶主要承受 3 种载荷,即气动、重力和惯性载荷。本文重点分析桨叶所受的确定性气动载荷。图 1 为叶片坐标系 (B), ZB 与叶片变桨轴重合, XB 垂直于 ZB , 对于上风行风机,正向指向塔架方向。 YB 垂直于叶片轴线和主

轴轴线,满足右手定则。风力机组的外界载荷主要作用在叶片上,轮毂和塔架所承受的载荷主要是由叶片的载荷传递而来^[5],因此主要分析叶片所受的气动载荷。

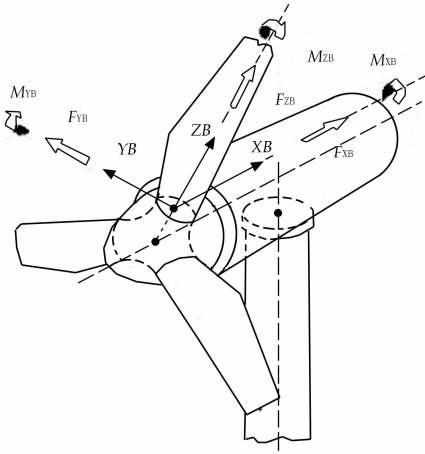


图 1 叶片坐标系

2 气动载荷计算

风力机组的外界载荷主要作用在叶片上,塔架所承受的载荷主要是由叶片所承载荷引起的。对于叶片翼型上的空气动力,主要是依据叶素理论来计算。假设作用在每个叶素上的气流相互之间没有干扰,由于流动而产生在叶片上的反作用力 F 可分解为升力 L 和阻力 D 二维模型;作用在每个叶素单元的合成流速与叶片平面的夹角为攻角 α 。将作用在每个叶素上的力和力矩沿叶片展向积分,就可以求得作用在风轮上的力和力矩^[4],叶素受力如图 2 所示。

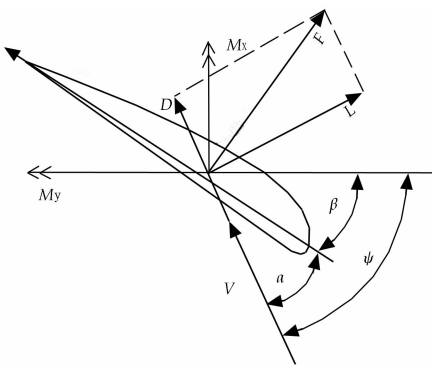


图 2 叶素上的受力分布

从图 2 所可以看出,由叶素理论得到垂直于方向 V 的升力为

$$dL = \frac{1}{2} \rho V^2 C_l dr \quad (1)$$

而平行于 V 的阻力为

$$dD = \frac{1}{2} \rho V^2 C_d dr \quad (2)$$

从而可知风轮半径 r 处叶素上的轴向推力:

$$\begin{aligned} \delta T &= L \cos \psi + D \sin \psi = \\ &= \frac{1}{2} \rho V^2 N C (C_l \cos \psi + C_d \sin \psi) dr \end{aligned} \quad (3)$$

在风轮轴上产生的扭矩

$$\begin{aligned} \delta Q &= L \cos \psi - D \sin \psi = \\ &= \frac{1}{2} \rho V^2 N C r (C_l \cos \psi - C_d \sin \psi) dr \end{aligned} \quad (4)$$

式中, ρ 为空气密度; V 为垂直来流风速; C 为弦长; C_l , C_d 分别为剖面翼型升力和阻力系数; N 为叶片数; ψ 为来流角。

作用在整个叶片上的空气动力和扭矩,只需沿叶片展向将这些升力元、阻力元和扭矩元进行积分。作用在叶片上的空气动力载荷如下。

挥舞方向剪力 Q_x 和摆振方向剪力 Q_y :

$$Q_x = \frac{1}{2} \int_{r_o}^R \rho V_o^2 c C_n dr \quad (5)$$

$$Q_y = \frac{1}{2} \int_{r_o}^R \rho V_o^2 c C_l dr \quad (6)$$

挥舞方向弯矩 M_y 和摆振方向弯矩 M_x :

$$M_x = \frac{1}{2} \int_{r_o}^R \rho V_o^2 c C_n r dr \quad (7)$$

$$M_y = \frac{1}{2} \int_{r_o}^R \rho V_o^2 c C_l r dr \quad (8)$$

式中, R 为风轮半径, r_o 为轮毂半径。综合各式可知,存在函数 $BEM(V, \beta_i, w_r)$ 来表达桨叶挥舞方向弯矩与桨距角参考值之间的关系^[2-4]:

$$\begin{cases} M_{y_i} = BEM(V, \beta_i, w_r) \\ \beta_i = \frac{w_n^2}{s^2 + S w_n s + w_n^2} \beta_{i^{ref}} \quad (i = 1, 2, 3) \end{cases} \quad (9)$$

式中, w_r 为风轮角速度。对上式线性化,可得如下表达式:

$$\begin{cases} \frac{\partial M_{y_i}}{\partial (V, \beta_i, w_r)} = \frac{\partial BEM(V, \beta_i, w_r)}{\partial (V, \beta_i, w_r)} \\ \partial \beta_i = \frac{w_n^2}{s^2 + S w_n s + w_n^2} \partial \beta_i^{ref} \end{cases} \quad (10)$$

由上式可知

$$\Delta M_{y_i} = K_v \Delta V + K_\beta \Delta \beta_i + K_w \Delta w_r, \text{ 令 } \Delta V = 0, \Delta w_r = 0, \text{ 联合式(10) 可得如下表达式:}$$

$$\Delta M_{y_i} = K_\beta \frac{w_n^2}{s^2 + S w_n s + w_n^2} \Delta \beta_i^{ref} \quad (11)$$

由式(11)可得出桨距角与桨叶根部载荷之间的关系表达式。因此通过控制桨距角 β , 可以来控制桨叶片根部的载荷。

3 桨叶根部载荷的 dq 轴转换

在实际风场中,风力发电机组桨叶承受周期性载荷。周期性载荷的频谱受到风力发电机风轮转子频率 1P(0.3 Hz)的影响。对本文模拟的风机桨叶 M_y 方向所受的弯矩进行了频谱分析,从频谱分析结果可知,在风轮转速 1P 频率处,桨叶的功率谱幅值最大。因此,本文主要是对如何降低风力发电机组的风轮转速 1P 频率对桨叶周期性载荷产生的影响进行研究^[7]。变速变桨风力发电机组的桨距控制框图示于图 3。

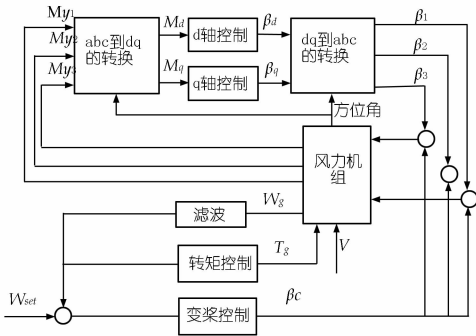


图 3 变速变桨风力机组的控制框

框图中,通过 Park 变换^[5],将 3 个桨叶载荷转换到 d 、 q 轴载荷。Park 的变换表达式如下:

$$\begin{pmatrix} M_d \\ M_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{y1} \\ M_{y2} \\ M_{y3} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中, $M_{y1} \sim M_{y3}$ 为 3 个桨叶片根部的载荷; θ 为桨叶 1 的方位角; M_d 和 M_q 分别为 d 、 q 轴的载荷。将 d 轴和 q 轴生成的桨距角,通过反 Park 变换,生成 3 个桨叶的附加桨距角,变换表达式如下:

$$\begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_d \\ \beta_q \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中, $\beta_1 \sim \beta_3$ 为 3 个桨叶的桨距角; β_d, β_q 分别为 d 轴和 q 轴的桨距角。

4 独立变桨距控制系统

变桨距系统一般分为统一控制和独立控制两种方式。独立变桨距的每个桨叶都由独立的桨距执行机构控制,如果其中的一个桨距执行机构出现故障,其他两个桨叶仍能调节桨叶节距角,实现功率控制,继续带伤

工作。由于自然风在风轮扫及面上的分布不均匀,独立变桨控制则可以根据各个桨叶上的风速进行调节,不仅能维持发电机的输出功率,而且还能减小桨叶的拍打振动,因此独立变桨距控制比统一变桨距控制更具有优势。稳定机组输出功率是独立变桨距控制的首要目标,此外,独立变桨距控制同时还能考虑到在疲劳工况下尽可能地减轻机组载荷,以有效提高机组运行的可靠性和延长疲劳寿命^[8]。因此,本文设计了 dq 轴控制框图(见图 4)。 dq 轴载荷是通过神经元 PID 控制,以生成合适的 dq 轴桨距角,然后通过反 Park 变换,与统一桨距角相加后生成桨距角。

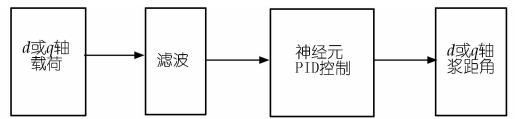


图 4 风机 dq 轴控制框

4.1 神经网络 PID 控制器的设计

PID 控制是一种基本且简单的有效控制方法,但是当被控制对象具有复杂的非线性和难于建立精确的数学模型时,常规的 PI 控制就很难达到满意的控制效果。根据对风力机组载荷的分析可知,载荷与桨距角的系统具有非线性和复杂性。人工神经网络作为一种现代智能控制方法,由于其较强的自适应性、并行处理能力以及在非线性和复杂系统中的适应性,而被广泛地应用于控制领域^[9-10]。神经元是组成计算和控制的基础,以此作为独立变桨输入和控制输出之间的连接,既能保证控制算法的快速性,同时也有利于处理这一复杂的非线性关系,因此本文提出了基于神经元 PID 的控制器的设计方案。

模型的输入量为给定的 d 和 q 轴载荷,以及经过 Park 变换所生成的 d 和 q 轴的实际载荷;输出信号为附加桨距角,用神经元来映射输入和输出之间的解析关系,将神经元与常规 PI 控制思想相结合,设计出神经元 PID 控制器。神经元控制器是通过调整加权系数的调整来实现自适应和自组织功能。控制器框图示于图 5。

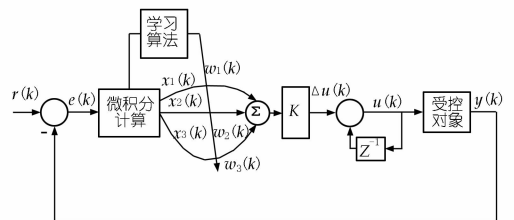


图 5 基于神经元自适应的 PID 控制框

其主要控制过程为：将载荷参考值 M_y^{ref} 与 dq 轴的载荷 M_y 之差输入到微积分模块单神经元自适应 PID 控制算法。

$$\begin{cases} w_1(k) = w_1(k-1) + \eta_i e(k) u(k-1) x_1(k) \\ w_2(k) = w_2(k-1) + \eta_p e(k) u(k-1) x_2(k) \\ w_3(k) = w_3(k-1) + \eta_d e(k) u(k-1) x_3(k) \end{cases} \quad (14)$$

其中，
$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases}$$

式中， η_i, η_p, η_d 分别为积分、比例、微分的学习速率。 $e(k)$ 为偏差， $u(k)$ 为控制对象输出。

η_i, η_p 和 η_d 分别为积分、比例、微分的学习速率。 η_p 较小时，系统较稳定，快速性较好； η_p 过大时，系统的快速性虽然变好，但调节时间变长； η_i 取适当的值，可以使系统获得较好的快速性。

在控制过程中，本文采用有监督的 Hebb 学习算法，加权系数 $w_i(k)$ 与神经元的输入、输出和偏差有关，其权值的修正公式为^[9]

$$w_i(k+1) = (1-c)w_i(k) + \eta_e(k)u(k)x_i(k) \quad (15)$$

式中， c 为常数。

通过对偏差信号的检测，单神经元自适应控制器可以不断地对实际控制信息进行学习，使控制器的输出增大或减小。

4.2 仿真分析

基于 Fast 软件平台，本文对风电机组在额定风速以上区域运行所采用的独立变桨控制策略的可行性进行了验证。模拟的风电机组主要参数为：风轮直径为 92.9 m，切入风速为 3 m/s，切出风速为 25 m/s，额定风速为 11.2 m/s，额定功率为 2 MW，风轮额定转速为 15 rpm。本文取 DLC1.1 下平均风速为 20 m/s 时的仿真结果作比较。

采用 600 s 的湍流风来模拟外部风速环境，湍流风速曲线如图 6 所示。

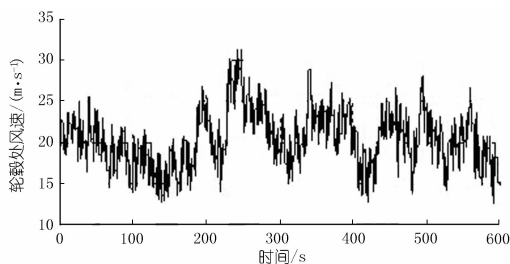


图 6 湍流风速曲线

图 7 为独立变桨距控制过程中 3 个桨叶桨距角的变化情况。由图 7 可知，独立变桨距控制的 3 个桨叶桨距角的变化与风轮的转动有关，相对于统一变桨距控制来说，不仅每个桨叶的桨距角变化不同，而且其变化幅度也较大，这些对于变桨距执行机构的要求也就相对较高。

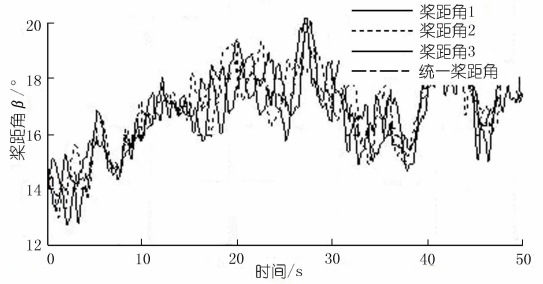


图 7 独立变桨距各桨叶节距角

图 8 ~ 10 分别为电功率曲线、偏航轴承 y 方向弯矩和桨叶 1 根部 y 方向弯矩曲线。如图 8 所示，与统一变桨距控制相比，独立变桨距控制降低了输出功率的波动，使发电机的输出功率更加稳定。在自然风速下，风力发电机组各个桨叶的风速分布不同，从而导致各个桨叶根部的载荷也不尽相同。独立变桨距控制的方法是，根据各个桨叶根部的载荷情况进行独立调节。从图 9 和图 10 可以看出，相对于统一变桨而言，独立变桨距控制减小了偏航轴承和桨叶根部 y 方向的弯矩载荷。

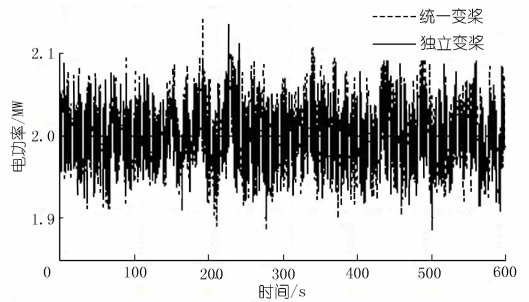


图 8 电功率曲线

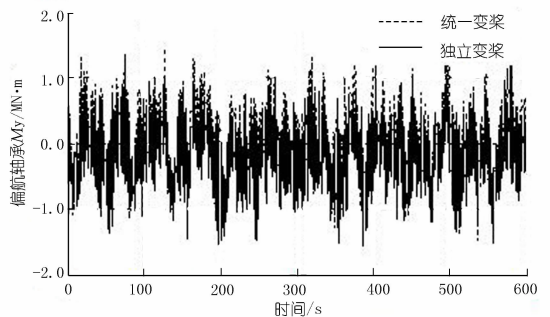


图 9 偏航轴承 y 方向的弯矩载荷

图 11 为采用常规的 PID 独立变桨控制与神经元

PID 独立变桨距控制的电功率曲线。对数据进行了统计分析,并与常规的 PID 独立变桨距控制进行了比较,结果表明:采用神经元 PID 独立变桨距控制算法,使功率波动下降了 7.4%。

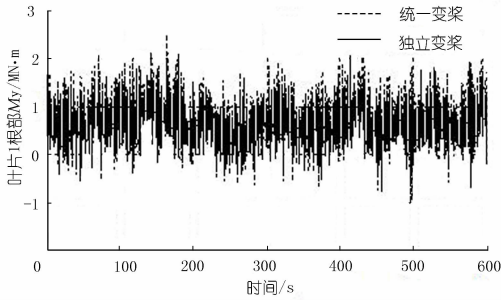


图 10 桨叶 1 根部 y 方向的弯矩载荷

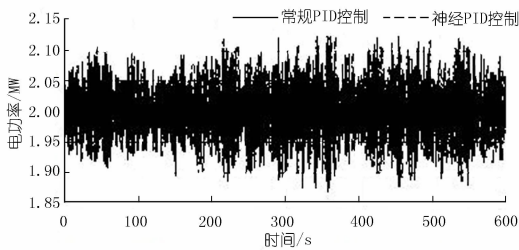


图 11 常规的 PID 与神经元 PID 的电功率曲线

5 结论

在对传统的变桨距控制进行分析的基础上,提出了基于神经元 PID 的独立变桨距控制的策略。借助于 Fast 软件进行了仿真分析,结果表明:风力发电机组在额定风速以上运行时,根据各桨叶根部 M_y 方向的载

荷情况,可以对附加桨距角实施独立变桨控制。这样,不仅能够使风力发电机组的输出功率稳定在额定功率附近,而且还可以降低叶片根部和偏航轴承的疲劳载荷,同时也可以提高风力机组的机械寿命,减小机械部件的损伤风险。这对于风轮直径达到百米的兆瓦级的风力发电机组而言,具有十分重要的意义。然而,由于只对系统在仿真软件上进行了模拟,因此现场应用时,仍需要结合实际运行条件对控制器进行调整和修正。

参考文献:

- [1] Selvam K. Individual pitch control for large scale wind turbines[R]. Netherlands:ECN,The,2007.
- [2] 李德源,叶枝金,陈严,等. 风力机叶片载荷谱及疲劳寿命分析[J]. 工程力学,2004,21(6):118-123.
- [3] 胡岩,刘玥,姚兴佳,等. 兆瓦级风力发电机组多段权系数独立变桨控制[J]. 沈阳工业大学学报,2009,31(6):633-638.
- [4] Tony B,David S,Nick J,eta. Wind energy handbook[M]. New York: John Wiley and Sons,Ltd,2001:415-416.
- [5] Jason M J,Marshall L BJR. Fast user's guide[R]. Colorado:National Renewable Energy Laboratory,2005.
- [6] Bossanyi E A. Wind turbine control for load reduction[J]. Wind Energy,2003,(6):229-244.
- [7] Bossanyi E,Garrad H,Partners L. Further load reductions with individual pitch control[J]. Wind Energy,2005,(8):481-485.
- [8] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计 - MATLAB 语言与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [9] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [10] 毛恒. 基于不完全微分 PID 算法的神经网络控制[J]. 自动化仪表,2005,(1):9-11.

(编辑:赵秋云)

Independent variable propeller control of wind turbine based on neurons PID

TANG Chunlin¹,ZHENG Yu²

(1. Chongqing Vocational College of Public Transportation, Chongqing 400030, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: According to the principle of aerodynamic of wind turbines, the neurons PID controller is designed and the independent variable propeller control of 3 blades is realized. Through neurons PID, the pitch angle is calculated, which is added to the additional pitch angle obtained by reverse Park transformation, to achieve the set value of independent pitch angle. Based on the software platform of Fast, the 2 MW - variable speed and pitch wind turbines are adopted for verification, and the proposed independent variable propeller controlling strategy and traditional unified variable propeller pitch controlling strategy are simulated and compared. The result shows that the proposed method can ensure the stable output power of the turbine under rated rotational speed, meanwhile, reduce the fatigue load of the parts of the wind turbines, comparing with the unified variable propeller pitch controlling strategy.

Key words: variable speed and pitch; neural network; independent variable propeller control; load on blade root; Fast software