

基于支持向量机权系数的独立变桨距学习控制

秦斌, 王欣, 郭百顺, 朱万力, 范定成

湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074067, 21106036); 湖南省科技计划重点资助项目(2014FJ2018); 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ3110); 湖南省教育厅科研重点项目(15A050); 湖南省高校科技创新团队资助项目(2014-207)

通信作者: 王欣, wangxin97p@163.com 收稿/录用/修回: 2014-09-10/2015-01-05/2015-04-09

摘要

由于风速的随机性和不均衡性易造成高风速段机组输出功率波动, 同时给整个风电机组带来挥舞震动等不平衡载荷. 为降低疲劳载荷和改进系统性能, 在分析风力发电系统恒功率运行区域内载荷动态模型的基础上, 将支持向量机和权系数控制相结合, 提出一种基于在线支持向量机学习的权系数的独立变桨距学习控制方案. 然后构建永磁直驱风力发电系统独立变桨距控制系统模型并在 RT-LAB 实时仿真系统上进行仿真. 仿真结果表明该方法在保证稳定功率输出的同时, 实现了桨距角的平稳调节, 降低了不平衡载荷和减轻了机组疲劳度和组件间的磨损, 从而验证了该控制策略的正确性和有效性.

关键词

风力发电系统
独立变桨距
权系数
支持向量机
中图分类号: TM614
文献标识码: A

Individual Pitch Learning Control Based on Support Vector Machine Weight Coefficient

QIN Bin, WANG Xin, GUO Baishun, ZHU Wanli, FANG Dingcheng

School of Electrical & Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007 China

Abstract

Because of the random and irregular nature of wind speed, the output power generated by wind turbines can be unsteady in high-speed regions; thus, an entire wind turbine experiences unbalanced loads and wave vibration. To mitigate load fatigue and improve system performance, we propose an individual pitch control strategy for wind turbines based on an analysis of dynamic load models of wind turbine systems when operating at constant power combined with a support vector machine with weight coefficient control. We then developed an individual pitch control system mode for wind turbine systems with a permanent magnet synchronous generator and simulated it on an RT-LAB real-time simulation system. The simulation results show that the proposed control strategy ensures a stable power output, achieves a smooth regulation of the pitch angle, and reduces the unbalanced load as well as the fatigue and wear on components. Thus, the correctness and effectiveness of the proposed control strategy are verified.

Keywords

wind turbine system;
individual pitch;
weight coefficient;
support vector machine
(SVM)

1 引言

随着风力发电大型化的发展, 减小机组本身不平衡载荷^[1]显得尤为重要. 传统的统一变桨距控制方法(collection pitch control, CPC)没有考虑风剪切效应、湍流效应和塔影效应等因素对风轮的影响, 随着风轮半径的不断加大, 风切效应对风机的影响越来越大. 因此, 独立变桨距控制(individual pitch control, IPC)成为目前各国风电控制研究的热点. 独立变桨控制策略能较好地应对不平衡的气动载荷对风机产生的不良影响, 使风机桨叶的受力更稳定

均衡, 从而安全稳定地控制风机运行^[2].

国内针对独立变桨距控制技术的研究工作起步较晚, 而统一变桨距技术已日趋成熟. 统一变桨距技术的研究针对统一变桨距机组的控制特点以及风能的多变性因素, 主要着力于恒功率控制过程中的功率波动问题. 传统的前馈模糊 PI(proportional-integral)复合变桨距控制、LQG(linear quadratic Gaussian)控制、准滑模变结构控制和 RBF(radial basis function)神经网络控制等策略在统一变桨距控制技术中的应用对于独立变桨距控制技术的研发具有一定的参考价值^[3-8].

目前,对于风电机组独立变桨距中桨距角控制,多数使用传统的PI控制器及其复合控制^[13]、模糊PID控制、LQG控制器^[9-12]等。风能具有随机性和不稳定性的特点以及实际运行过程中还会遇到风切变、塔影效应、湍流和阵风等情况,加之风力发电机组的特性会随着时间和空间发生变化,往往使得传统的控制系统偏离设计时所依据的标称特性^[13],因而难以达到较好的控制性能和稳定性。

模糊权系数独立变桨距控制^[13]具有实现简单和可靠运行的特点,而支持向量机(support vector machine, SVM)是一种依据统计学习理论和结构风险最小化原理的新型学习机^[14]。与神经网络相比,支持向量机方法,可以有效地解决有限样本条件下的高维数据模型构建问题,并具有泛化能力强、收敛到全局最优和维数不敏感等优点^[15]。本文将支持向量机和权系数控制相结合,提出一种基于在线支持向量机学习的权系数的独立变桨距学习控制方案,在实现功率稳定输出的同时,可以对参数在线适时调整,并进一步减小不平衡载荷干扰机组的恶劣影响,延长机组寿命。

2 风力发电系统建模

2.1 风力机数学模型

风力发电系统风轮将风能转化为风机动能是一个复杂的气动力过程。为了表示风轮在不同风速中的状态,用叶片的叶尖圆周速度与风速之比来衡量,称为叶尖速比 λ :

$$\lambda = 2\pi Rn/v = \omega R/v \quad (1)$$

式中: n 为风轮转速; R 为风力机叶片半径; v 为风速; ω 为风轮旋转角速度。

风力机的捕捉功率可表示为

$$p = \frac{1}{2}C_p(\beta, \lambda)\pi\rho R^2 v^3 \quad (2)$$

式中: ρ 为空气的密度; C_p 为风能利用系数; β 为叶片的桨距角; $C_p(\beta, \lambda)$ 为叶尖速比和桨叶节距角的函数。

叶片上的载荷包括空气动力载荷、重力载荷、惯性载荷、操纵载荷和其他载荷等。

作用在叶片上的空气动力载荷包括摆振方向剪力 Q_{yb} 和弯矩 M_{xb} 、挥舞方向(轴向)剪力 Q_{xb} 和弯矩 M_{yb} 以及变桨距时与变桨距平衡的叶片俯仰力矩 M_{zb} ,如图1所示。

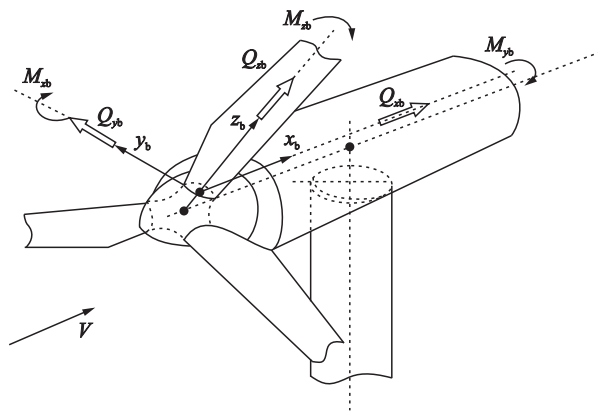


图1 叶片坐标系

Fig.1 Blade coordinate system

由图1及分析叶素受力可知,作用在叶素上的法向力 dF_n 和切向力 dF_t 为

$$dF_n = \frac{1}{2}\rho c V^2 (C_L \cos \Phi + C_D \sin \Phi) dr \quad (3)$$

$$dF_t = \frac{1}{2}\rho c V^2 (C_L \sin \Phi - C_D \cos \Phi) dr \quad (4)$$

利用积分的方法即可计算得到作用在风轮上的旋转驱动力矩 T_a 、轴向力 F_a 、倾斜力矩 M_t 和偏转力 F_g :

$$T_a = \sum_{i=1}^3 M_{x,i} = \sum_{i=1}^3 \int_0^R r dF_z \quad (5)$$

$$F_a = \sum_{i=1}^3 F_{x,i} = \sum_{i=1}^3 \int_0^R dF_{x,i} \quad (6)$$

$$M_t = \sum_{i=1}^3 \sin \psi_i M_{z,i} = \sum_{i=1}^3 \sin \psi_i \int_0^R r dF_{z,i} \quad (7)$$

$$F_g = \sum_{i=1}^3 \sin \psi_i F_{z,i} = \sum_{i=1}^3 \sin \psi_i \int_0^R dF_{z,i} \quad (8)$$

式中: $M_{z,i}$, $F_{x,i}$ 分别为第 i 个叶片根部上舞动方向的力矩和力; $M_{x,i}$, $F_{z,i}$ 分别为第 i 个叶片根部上摆振方向的力矩和力。

2.2 直驱永磁传动系统模型

假设发电机 d 轴和 q 轴的电感相等,直驱式永磁同步发电机的电磁转矩表达式为

$$T_e = 1.5n_p i_q \lambda_0 \quad (9)$$

由于采用直驱永磁风电系统的风力机和发电机无需经增速齿轮箱而直接联接。假设在整个变速范围内有恒定的机械传动效率,并对结构特性进行一些简化假设,传动系统的动态模型可以用一个一阶运动方程表示:

$$J\dot{\omega}_g = T_w - T_e - B\omega_g \quad (10)$$

式中: T_w 是气动转矩; T_e 是电磁转矩; B 是发电机摩擦系数; ω_g 是发电机转子转速; J 是风轮发电机整体转动惯量。

2.3 变桨距执行机构模型

变桨的灵敏度与精确度对功率输出影响很大。变桨距执行机构通过液压装置或电机驱动系统实现,可以等效为一个一阶惯性环节:

$$\tau_{\beta}\dot{\beta} = u_{\beta} - \beta \quad (11)$$

式中: τ_{β} 为桨距角响应时间常数; β 为实际桨距角; u_{β} 为桨距角控制给定值。

3 基于在线SVM模糊权系数独立变桨距控制

3.1 基于SVM模糊权系数独立变桨距控制结构

基于SVM模糊权系数独立变桨距控制系统框图如图2所示。控制策略分为2个部分,第一部分是功率控制器,采用模糊控制器对系统进行控制,以得到系统的统一桨距角给定值。第二部分是SVM权系数独立变桨距控制器,包括权系数分配单元、SVM优化补偿和权系数调整运算单元。权系数分配单元得到优化设计的权系数。SVM优化补偿将叶片方位角和桨叶轴向气动力结合后形成SVM模糊权系数控制器的训练样本进行训练,SVM权系数控制器通过支持向量机学习算法对样本数据按照目标函数进行离线学习得到控制器的结构和初步参数。然后进行在线学习校

正. 权系数调整运算单元根据前两部分的输出探索需要合成独立变桨控制输出.

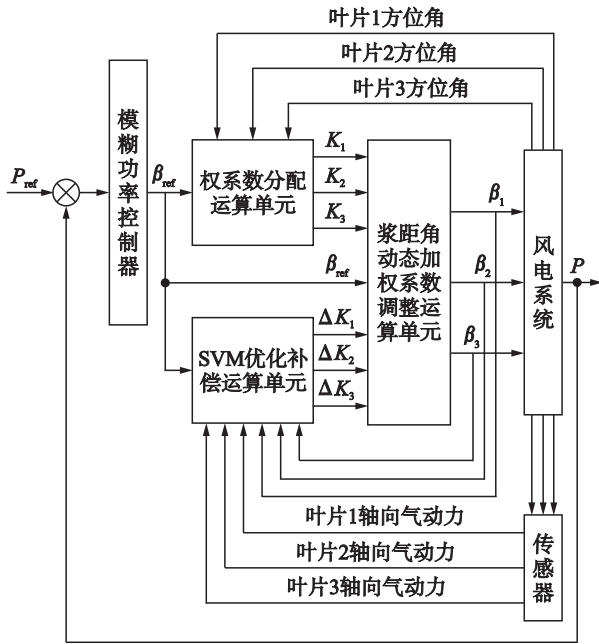


图2 SVM 模糊权系数独立变桨距控制系统
Fig.2 The individual pitch control system based on SVM fuzzy weight coefficient

3.2 权系数分配运算单元

根据风资源模型, 每个叶片受到的平均风速为

$$v_i = \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{H_0} \sin(\theta + (i-1) \cdot 120^\circ) \right] \cdot v_0 \quad (12)$$

其中: R 为叶片半径; H_0 为轮毂中心高度; 为叶片的方位角, $i=1, 2, 3$ 为第 i 个桨叶; v_0 为风轮中心的风速. 桨叶方位角权系数公式如下:

$$k_i = \frac{3 \times \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{H_0} \sin[\theta + (i-1) \cdot 120^\circ] \right\}^n}{\sum_{i=1}^3 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{H_0} \sin[\theta + (i-1) \cdot 120^\circ] \right\}^n} \quad (13)$$

式中: n 为预设系数, 本文取 2.

3.3 SVM 模糊权系数控制器学习算法

3.3.1 支持向量机优化补偿

根据支持向量机的原理, 支持向量机获取知识只能从样本中学习得到, 因此学习样本的数量和质量是影响支持向量机学习效果和速度的重要因素. 设给定训练样本为 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, $x_i \in R^n$, $y_i \in R^n$, n 为数据的总数. 对于线性回归, 考虑用线性回归函数式(14)估计数据.

$$f(x) = \langle w \cdot x \rangle + b, \quad (w \in R^n, b \in R^n) \quad (14)$$

$\langle \cdot \rangle$ 表示在 R^n 中的点积. 由于 SVM 采用结构风险最小化原理, 即在最小化样本误差的同时, 缩小模型泛化误差的上界, 则 w 和 b 可以通过最小化式(15)来求解:

$$\min \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(y_i - f(x_i)) \right) \quad (15)$$

约束条件: $|y_i - f(x_i)| \leq \varepsilon$.

其中 $\frac{1}{2} \|w\|^2$ 称作正则化风险, 它控制模型的复杂度; $C \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(y_i - f(x_i))$ 称作经验风险, 参数 C 称为正则化参数.

回归函数 $f(x)$ 形式上类似于一个神经网络, 如图 3 所示. 输出是中间节点的线性组合, 它与传统径向基函数 RBF 方法的基本区别是其每一个基函数的中心对应一个支持向量, 这些支持向量以及输出权值都是由结构风险最小化算法自动确定的.

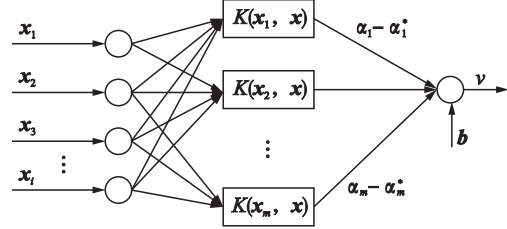


图3 支持向量机补偿
Fig.3 Support vector machine compensation

取径向基函数(RBF)核:

$$K(x_i, x) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

其中: 中心为支持向量, σ 为高斯核函数的宽度.

3.3.2 离线学习

离线学习阶段采用模型数据批量学习得到的变桨距控制器的初步参数和结构, 保证在控制初期就可以满足系统控制品质的要求, 减轻控制器在线学习的负担.

3.3.3 在线学习

由于风力发电系统处在不断变化的环境中, 所以采用在线学习的方法实现对环境的不断自适应. 采用增量式在线学习算法^[6], 并以 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件为基础, 当有新样本加入时, 通过修改拉格朗日乘子和偏置值来更新 SVM 变桨控制器的结构和参数. 在线学习算法实现部分主要包括递增算法和递减算法. 根据 KKT 条件和拉格朗日乘子把训练的样本数据分成 3 个子集: 错误支持向量集: $E = \{i = (|\theta_i| = C, |h(x_i)| \geq \varepsilon)\}$, 边界支持向量集: $B = \{i = (0 < |\theta_i| < C, |h(x_i)| = \varepsilon)\}$, 保留样本集: $R = \{i = (|\theta_i| = 0, |h(x_i)| \leq \varepsilon)\}$. 其中: $h(x_i) = f(x_i) - y_i$ 为误差函数, $\theta_i = a_i - a_i^*$ 为系数偏差.

训练目标是将新样本 (x_c, y_c) 加入上述 3 个集合之一, 同时使所有样本仍满足 KKT 条件. 核函数 $K(x_i, x)$ 为满足 Mercer 定理的任意对称正定函数, 不需要知道非线性变换的具体形式, 就可用核函数来实现算法线性化.

主要控制目标就是通过调整拉格朗日乘子 α 和修改偏置项 b 来确保新增加的样本都满足 KKT 条件. 为提高函数逼近性能, 增量式在线 SVM 模糊权系数独立变桨距控制实现过程如下:

Step 1: 获取新的数据样本 (F_{ic}, β_{ic}) ;

Step 2: 根据设定的评估周期判断数据是否有效, 若有

则加入训练样本集；否则丢弃数据转 Step 1；

Step 3: 根据 KKT 条件和拉格朗日乘子, 得到边界支持向量集 B 、错误支持向量集 E 和保留样本集 R ;

Step 4: 计算 SVM 优化补偿单元输出 $\Delta\beta_i$;

Step 5: 计算以 $\Delta\beta_i$ 输出为均值、按正态分布用于探索的扰动值;

Step 6: 以功率控制器、权系数单元和 SVM 补偿单元输入得到的动态加权系数控制值作为桨距角参考值, 对变桨距对象进行控制;

Step 7: 使用递减算法, 删除训练集中所需要遗忘的样本, 得到新的支持向量集 BD 、错误支持向量集 ED 和保留样本集 RD ;

Step 8: 等待数据在线更新, 转 Step 1.

递减部分: 从训练集 D 删除样本时, 在保持其它训练样本的 KKT 条件不变的前提下, 调整要去除样本的对应参数 α_c . 递增算法与递减算法类似, 只是过程相反.

上述算法有选择性地新数据加入到支持向量机训练集, 通过对每次迭代过程中增加的样本进行学习, 在线调整 SVM 模糊权系数控制器参数, 实现系统的不断优化. 在线学习方法能利用前面运算的结果, 在保证在线支持向量非线性逼近能力的基础上, 降低在线训练过程的计算量. 这样不但能缩短其训练时间, 而且能提高控制器的自适应性.

3.4 在线学习算法训练数据的获取

训练样本的质量决定了学习得到的 SVM 模糊权系数补偿器参数的优劣, 期望训练样本既能反映被控对象在控制过程中的变化规律, 又能使系统具有良好的响应特性. 从稳定功率输出和减轻机械负荷两方面定义判定有效学习数据的阈值条件:

$$E\left\{\sum\left(\frac{F_{ic}-F_{rated}}{F_{rated}}\right)^2+\delta\left(\frac{\beta_i-\beta_{ref}}{\beta_{ref}}\right)^2\right\}<\zeta \quad (17)$$

其中: F_{ic} 和 F_{rated} 分别为桨叶实际受力和额定工况下的受力, $\beta_i - \beta_{ref}$ 为桨距角变化, $E\{\cdot\}$ 为设定评估周期, ζ 为定义的阈值. 第二项表示期望桨距角的变化最小化, 这两项之间的权衡由小于 1 的权重系数 δ 调节, 只有当风电系统的功率输出和桨距变化满足式(17)的阈值条件时, 将新数据加入样本集并在保证恒功率控制的同时, 减小桨叶振动产生的疲劳载荷.

4 仿真结果及分析

为验证上述独立变桨距控制策略的正确性和合理性, 本文在加拿大 Opal-RT 公司 RT-LAB 实时仿真系统上, 对 1 台 2 MW 直驱永磁同步风电机组进行独立变桨距控制系统仿真研究, 并对 SVM 模糊权系数独立变桨距控制策略和模糊权系数独立变桨距控制策略进行比较, 机组主要参数见表 1.

表 1 永磁同步风力发电机组参数表
Tab.1 Parameters list of PMSG wind turbine

风轮半径/ m	桨叶数	风轮转动惯量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	电机转动惯量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	额定功率/ MW	定子电阻/ Ω	d, q 轴电感/ H	定子额定电压/ V
40	3	411 183	18 904.7	2	$R_a = 6.7e - 3$	$L_d = L_q = 2.7$	660
电机极对数	额定轴转矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	发电机额定转速/ (r/m)	发电机最大转速/ (r/m)	额定风速/ (m/s)	切入切出风速/ (m/s)	空气密度/ (kg/m^3)	
30	940	9 ~ 22.5	29	14	3, 25	1.29	

风速是风电系统主要的外部信号, 并决定风电系统的运行状态. 仿真中采用阶跃风和丹麦 Risø 国家实验室建立的基于凯马(Kaimal)频谱的随机风速模型, 如图 4 所示, 随机风基本风速为 14 m/s, 湍流强度为 12%.

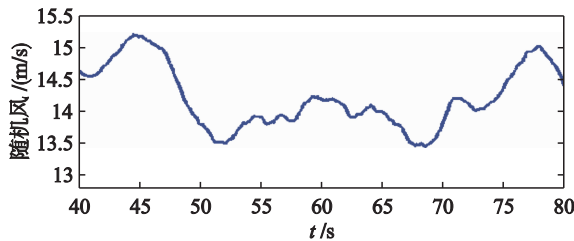


图 4 基本速度为 14 m/s 的随机风曲线
Fig.4 Radom wind curve with mean speed 14 m/s

由图 5 和图 6 可知, 基于支持向量机权系数的独立变桨距控制在阵风之后具有更快的响应速度, 功率波动程度也明显减小. 同时, 桨距角的变化幅值也相比权系数独立变桨距控制没有那么大, 说明 SVM 权系数控制器不断地对新样本实时进行学习, 在线校正控制器参数, 随着时间

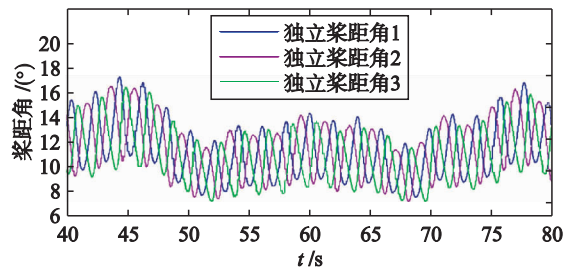


图 5 权系数桨距角变化曲线
Fig.5 Curves of pitch angle based on weight coefficient

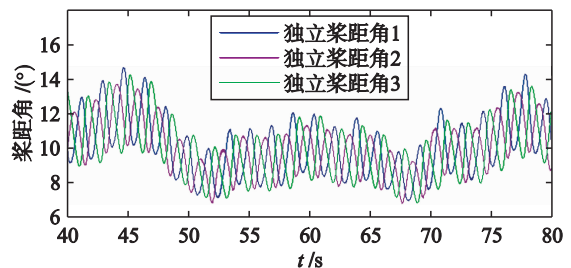


图 6 SVM 权系数桨距角变化曲线
Fig.6 Curves of pitch angle based on SVM weight coefficient

的推移, 控制器拟合效果越来越好, 最后实现优化输出功率的目的.

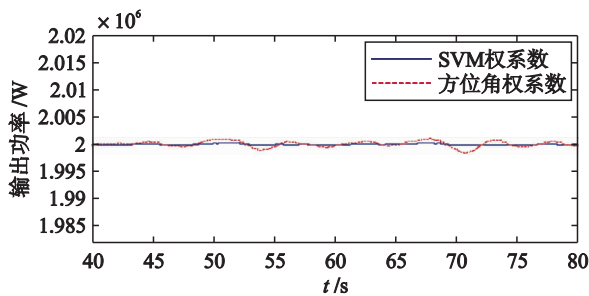


图7 输出功率曲线

Fig.7 Curves of the out power

由图7可知, 基于支持向量机模糊权系数独立变桨距控制下的功率输出相对权系数独立变桨距能更快地平滑到额定功率附近, 输出没有出现较高的频率振荡, 具有较好的抑制功率波动的效果. 由于SVM模糊权系数控制器前期是采集样本学习并对学习样本进行有效性判断, 使得功率输出的波动幅值变化不大. 利用在线学习机制, 随着时间的增加, 控制器精度会不断增强, 稳态后功率波动较小, 表现出更好的稳定性.

由图8可知, 在SVM权系数独立变桨距控制下, 风力机的轮毂载荷明显减小, 并且载荷波动限制在 $\pm 3.2\%$ 之内, 小于权系数独立变桨距控制下的 $\pm 7.7\%$, 故能更好地抑制不平衡载荷的波动情况, 表明SVM在解决非线性问题上表现出更好的控制特性. 因此, 基于SVM权系数独立变桨距控制在减轻单个叶片疲劳载荷的同时, 大大改善了

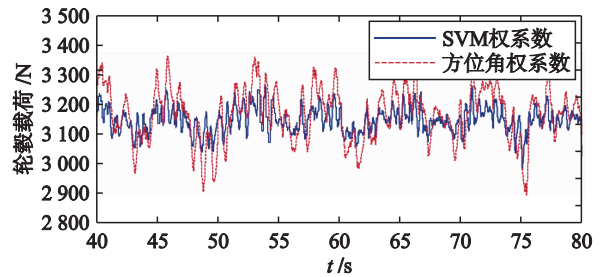


图8 轮毂载荷曲线

Fig.8 Curves of wheel load

整个机组载荷波动, 使风电机组能够正常安全稳定地运行, 保证对电能质量的要求.

5 结论

本文针对永磁直驱风力发电系统的独立变桨距控制问题, 设计了基于支持向量机模糊权系数独立变桨距控制器. 通过对控制器的输入输出映射得到控制器初步参数和结构, 在此基础上利用在线支持向量机算法实现控制器自学习功能. 然后构建永磁直驱风力发电系统独立变桨距控制系统模型并在RT-LAB实时仿真系统上进行仿真. 仿真结果表明, 在随机风速条件下, 该控制策略不仅能满足输出功率稳定和减少不平衡载荷的要求, 而且具有较好的控制快速性和强鲁棒性, 同时又能实时校正模型参数而未产生频繁的动作, 从而满足控制器更高的精度要求, 延长桨叶寿命, 达到较好的控制效果. 因此这对风力发电系统中难以精确建模和运行过程中外部扰动强烈的控制问题具有重要意义.

参考文献

- [1] 戴巨川, 胡燕平, 刘德顺, 等. 大型风电机组变桨距载荷计算与特性分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(7): 778-785.
Dai J C, Hu Y P, Liu D S, et al. Calculation and characteristics analysis of blade pitch loads for large scale wind turbines[J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 40(7): 778-785.
- [2] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
Ye H Z. Control strategies of wind turbine generators[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [3] Jelavic M, Petrovic V, Peric N. Individual pitch control of wind turbine based on loads estimation[C]//34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 228-234.
- [4] 高峰, 徐大平, 吕跃刚. 大型风力发电机组的前馈模糊PI变桨距控制[J]. 动力工程, 2008, 28(4): 537-542, 588.
Gao F, Xu D P, Lu Y G. Feed forward fuzzy-PI pitch-control for large-scale wind turbines[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2008, 28(4): 537-542, 588.
- [5] Prats M A M, Carraseo J M, Galvan E, et al. Improving transition between power optimization and power limitation of variable speed, variable pitch wind turbines using fuzzy control[C]//26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 1497-1502.
- [6] 姚兴佳, 张雅楠, 郭庆鼎. 大型风电机组三维模糊控制器设计与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(26): 122-127.
Yao X J, Zhang Y N, Guo Q D. Design and simulation of the three-dimensional fuzzy controller for large wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(26): 122-127.
- [7] 张雷, 李海东, 李建林, 等. 基于LQR方法的风电机组变桨距控制的动态建模与仿真分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(7): 781-785.
Zhang L, Li H D, Li J L, et al. Dynamic modeling and simulation of pitch control strategy for wind turbines based on LQR method[J]. Acta Energetica Sinica, 2008, 29(7): 781-785.

- Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [18] 秦宇翔, 李一平, 徐红丽. 基于人工势场和模糊规则的多水下机器人队形控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(8): 2105-2107.
Qin Y X, Li Y P, Xu H L. Based on artificial potential field and fuzzy rules of underwater robot formation control method[J]. Computer Measurement and Control, 2012, 20(8): 2105-2107.
- [19] Fang M C, Lin Y H, Kao Y C. Applying the optimized PD controller to the towing system in waves[J]. Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2014, 33(3): 135-144.
- [20] Fitriadhy A, Yasukawa H, Koh K K. Turning ability of a ship towing system[J]. Ship Technology Research, 2011, 58(2): 112-124.

作者简介

李 芸(1988-), 女, 博士生. 研究领域为载运工具运用工程.

刘春姣(1987-), 女, 硕士, 助理研究员. 研究领域为航海保障.

肖英杰(1959-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域为港航论证, 载运工具与应用工程.

(上接第 689 页)

- [8] 秦斌, 周浩, 杜康, 等. 基于 RBF 网络的风电机组变桨距滑模控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 37-41.
Qin B, Zhou H, Du K, et al. Sliding mode control of pitch angle based on RBF neural-network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 37-41.
- [9] 林勇刚, 李伟, 陈晓波, 等. 大型风力发电机组独立桨叶控制系统[J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 780-786.
Lin Y G, Li W, Chen X B, et al. The research on large scale wind turbine individual blade pitch control system[J]. Acta Energetica Sinica, 2005, 26(6): 780-786.
- [10] 鲁效平, 顾海港, 林勇刚, 等. 基于独立变桨距技术的风力发电机组载荷控制研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(11): 1591-1598.
Lu X P, Gu H G, Ling Y G, et al. Research on the load control of wind turbines based on Individual pitch technology[J]. Acta Energetica Sinica, 2011, 32(11): 1591-1598.
- [11] Selvam K, Kanev S, Wingerden J W V, et al. Feedback-feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2009, 19(1): 72-91.
- [12] 邢作霞, 陈雷, 孙宏利, 等. 独立变桨距控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 131-138.
Xing Z X, Chen L, Sun H L, et al. Strategies study of individual variable pitch control[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(26): 131-138.
- [13] 姚兴佳, 刘玥, 郭庆鼎. 基于前馈补偿方位角权重系数的分程独立变桨距控制研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(4): 532-539.
Yao X J, Liu Y, Guo Q D. A control method for split range individual pitch based on feed-forward azimuth angle weight number assignment[J]. Acta Energetica Sinica, 2011, 33(4): 532-539.
- [14] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1995.
- [15] 郑小霞, 钱锋. 基于支持向量机的在线建模方法及应用[J]. 信息与控制, 2005, 34(5): 636-640.
Zheng X X, Qian F. An SVM-based on-line modeling method and its application[J]. Information and Control, 2005, 34(5): 636-640.
- [16] Parrella F. Online support vector regression[D]. Genoa, Italy: University of Genoa, 2007.

作者简介

秦 斌(1963-), 男, 博士, 教授. 研究领域为复杂电气系统信息融合与协调控制.

王 欣(1971-), 女, 博士, 教授. 研究领域为复杂工业过程建模, 控制与优化.

郭百顺(1988-), 男, 硕士生. 研究领域为新能源发电.