

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.019

基于风速预测的双馈风力发电机组变桨距协调控制

刘云久¹,王 冰^{1,2},张一鸣¹

(1. 河海大学能源与电气学院,江苏 南京 210098;2. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心,江苏 南京 211100)

摘要 :在分析风能的特性、风速区域划分以及大型风力发电机组常用控制方法的基础上,指出当前控制中存在的滞后、大惯性等问题,针对这些问题,提出基于风速预测的新型变桨距协调控制方法,在高于额定风速的情况下,加入风速预测环节,从而克服风速测量滞后、桨距角调节惯性大等问题。这种控制方法将小波变换嵌入时间序列法中,用于建立 ARMA 模型进行风速预测,然后将预测的风速送入控制环节,具有较好的动态控制性能。最后,通过实例仿真验证了该设计方法的有效性。

关键词 :风力发电;变桨距协调控制;风速预测;时间序列;小波分析

中图分类号 :TM614 **文献标志码** :A **文章编号** :1000-1980(2012)03-0357-04

Variable-pitch coordinate control of doubly-fed induction generators based on wind speed prediction

LIU Yun-jiu¹, WANG Bing^{1,2}, ZHANG Yi-ming¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract :Based on analysis of the characteristics of wind energy, wind speed regionalization, and commonly used methods for control of large-sized wind turbines, this paper discusses the delay and significant inertia problems in control of wind turbines. To solve these problems, a new method for variable-pitch coordinate control based on wind speed prediction is proposed. In this method, performing wind speed prediction can overcome the obstacles caused by the delay of wind speed measurement and the inertia of the pitch angle above the rated wind speed. The ARMA model was established and the wind speed was predicted using the time series model through wavelet analysis, and then the predicted wind speed was transmitted into the control unit. The method was shown to have good dynamic control performance. The results of simulation show that this method is effective.

Key words :wind power generation; variable-pitch coordinate control; wind speed prediction; time series; wavelet analysis

变速风力发电机组于 20 世纪末加入大型风力发电机组主流机型的行列中^[1]。与恒速风力发电机组相比,变速风力发电机组具有以下优点:在低风速时,机组能够根据风速变化,在运行中保持最佳叶尖速比,以获得最大风能^[2-5];在高风速时,通过变桨距控制,保证输出功率恒定,并且利用风轮转速的变化,提高传动系统的柔性,使功率输出更加平稳^[6]。

控制技术是大型风力发电机组安全高效运行的关键。常见的控制技术是采用双闭环变桨距控制,但存在风速测量滞后以及桨距角调节惯性大等问题。当前,风速预测的方法很多^[7],其中时间序列法建模所需信息少,运算简单^[8-9],但预测的效果一般。本文在双闭环变桨距控制的基础上,引入风速解析与预测环节,根据产

收稿日期:2011-05-17

基金项目:国家自然科学基金(51007019);中央高校基本科研业务费专项(2009B19014)

作者简介:刘云久(1990—),男,江苏盐城人,学士,主要从事双馈风力发电机组控制技术研究。E-mail:liuyj643@gmail.com

生的预测结果进行桨距角协调控制,用以改善机组的动态响应,将小波变换^[10-11]嵌入时间序列法中,提高其预测效果,改善桨距角控制的即时性,进而解决了系统的滞后和大惯性问题;基于预测的风速结果,与双闭环结构相结合,实现桨距角协调控制,达到输出功率稳定平滑的效果,最后通过仿真对该方法的有效性加以验证。

1 风力发电机组控制系统

目前,比较成熟的变桨距控制结构框图如图1所示。该系统存在风速测量值的准确度不够、风速测量后控制的滞后、桨距角控制的大惯性等问题,影响了系统的控制效果。

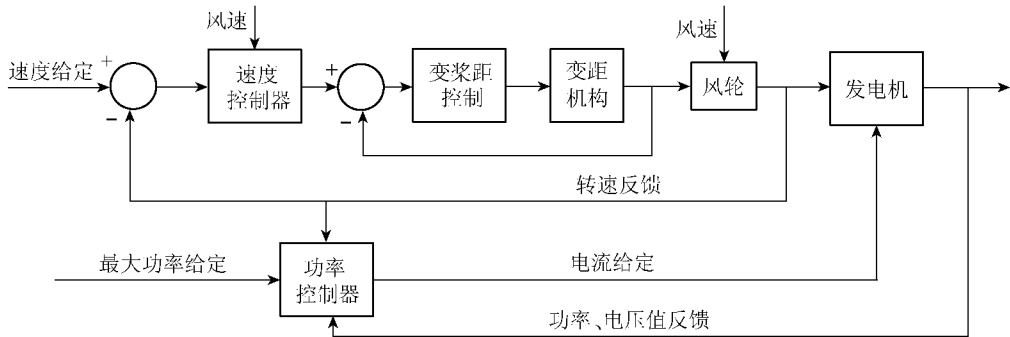


图1 变桨距控制系统
Fig. 1 Variable-pitch control system

2 基于风速预测的控制方法

2.1 小波分解与重构

首先,引入小波分析中的多分辨分析,将风速信号进行分解,从而满足控制输入平缓的要求。离散序列的多分辨分析的小波变换如下:对于 $f(t) \in L^2(R)$,其频谱为 $f(\omega)$ 。将 $f(t)$ 用低频部分 V_m 和低频部分 W_m 中的基共同展开,得

$$f(t) = \sum_n c_{j,n} \xi_{j,n}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_n d_{j,n} \varphi_{j,n}(t)$$

式中: $c_{j,n}$ ——尺度展开系数; $\xi_{j,n}(t)$ 、 $\varphi_{j,n}(t)$ ——2个空间的标准正交基; $d_{j,n}$ ——小波展开系数。而重构算法是分解算法的逆运算,由小的子空间展开系数来计算大的子空间系数。

2.2 时间序列法建模与预测

在小波变换解析的基础上,对风速的低频和高频部分分别加以预测,是本环节的主要工作。目前在时间序列法中对平稳时间序列模型的研究比较成熟。

时间序列 $\{x_t\}$ 的预测是指:如果 x_t 已知,要求对 $t+l(l>0)$ 的未来数值 $\{x_{t+l}\}$ 进行预测,该预测值用 $\overline{x}(l)$ 表示,并称为在起始时刻 t 向前步 l 的预测值。整个建模的过程如下:首先,用平稳性检验、模型识别、参数估计、模型检验来确定能够描述所研究时间序列的数学模型,再由该模型推导出预测模型。风速的数据具有较强随机性,所以需先进行差分处理。

2.3 基于风速预测的变桨距协调控制

根据图2所示的结构将预测的风速输入闭环系统中。在风速高于额定风速的情况,由于风速预测的加入,可以较好地解决风速测量本身带来的滞后以及桨距角调节的惯性问题,从而整体改善变桨距控制的动态性能。系统将基于预测的桨距角控制与传统的双闭环结构相结合,发挥了桨距角控制效果明显和转矩控制反应快速的特点:一方面通过改善后的桨距角对输入风电机组的能量进行控制,保证功率输出的整体平衡;另一方面,运用功率控制器进行即时的转矩调节,对输出功率加以平滑。两者相互协调,优势互补,在保证输出功率稳定平滑的同时,减少了转矩的波动,能够取得良好的控制效果。

3 实例仿真

结合文献[12]中的中国稷山风速实测数据建立风速序列信号(高于额定风速情况),对风速序列进行分

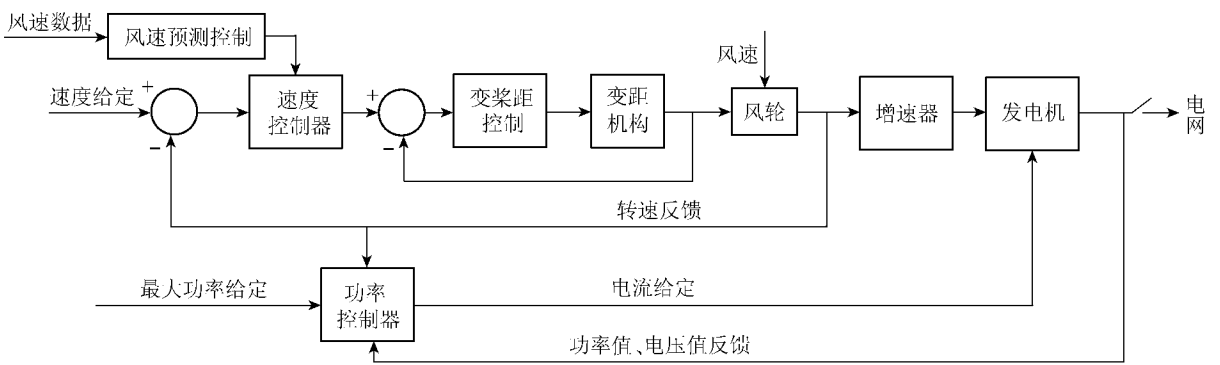


图 2 基于预测的变桨距协调控制系统

Fig. 2 Variable-pitch coordinate control system based on wind speed prediction

解(采用db3小波基, $n = 3$)。将风速信号 s 分解为低频信号 a_3 和 高频分量 d_1, d_2, d_3 , 并对其进行降噪处理。降噪后的风速序列单位根检验结果等于 0, 表明数据不平稳, 需先进行一阶差分处理, 处理后经检验值为 1, 数据平稳。根据其自相关和偏相关函数序列, 采用 ARMA 模型。

采用滚动式时间序列法建模, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 预测结果与实际结果曲线基本吻合, 说明嵌入小波变换的时间序列法具有较高的预测精度, 提高了系统的预测效果。

同理, 对于残差信号进行滚动式时间序列预测。根据实际系统控制的需要, 最后进行加权输出时, 选择残差分量的加权系数为 0, 低频分量的加权系数为 1。预测结果输入发电机组后, 得到桨距角曲线如图 4 所示。

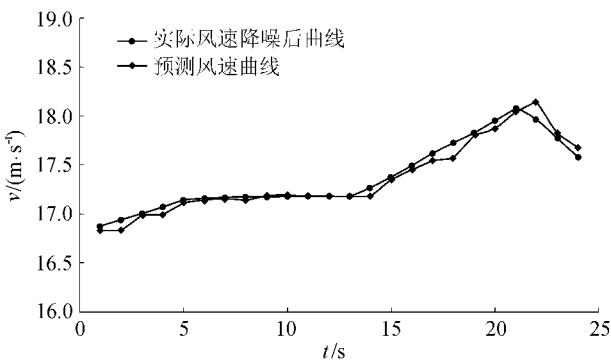


图 3 预测与实际风速比较曲线

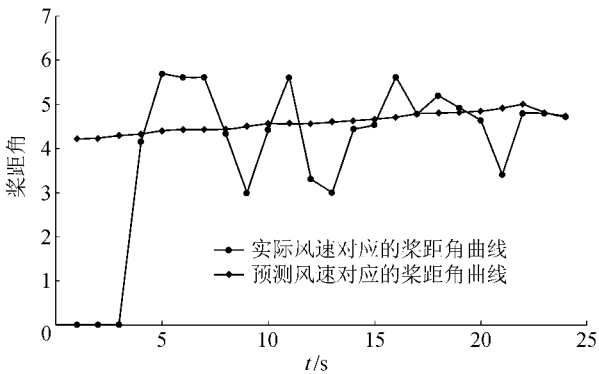


图 4 预测风速和实际风速分别对应的桨距角曲线

Fig. 3 Comparison of predicted and measured wind speed

Fig. 4 Pitch angle curves of predicted and measured wind speed

由图 4 可以看出 (a) 图中预测风速对应的桨距角曲线比实际风速对应的桨距角曲线平缓很多, 也可以认为预测风速对应的桨距角曲线大致围绕实际风速对应的桨距角曲线上下波动, 说明对基于预测的桨距角依据风速变化的总趋势加以控制, 可以大大减少实际风速的随机性产生的大幅度振荡调节, 而利用风轮转速的变化, 储存或释放部分能量, 使风速振荡的能量高低相互抵消, 可以保证整体吸收能量的稳定性, 为后续转矩控制提供基础。(b) 图中预测风速对应的桨距角曲线比实际风速对应的桨距角曲线有 2 步超前, 说明由于风速预测产生的超前信号, 可以提前使得桨距角产生动作, 从而消除风速测量的滞后并克服桨距角调节中存在的大惯性问题, 改善桨距角控制的实时效果。因此, 基于风速预测的变桨距控制在高于额定风速的情况下, 可以很好地改善风力发电机组的控制效果, 实现对风能的充分利用。

为了进一步验证本文基于风速预测的新型变桨距协调控制方法的效果, 将预测风速和实测风速的功率输出进行比较, 如图 5 所示。从图 5 可以看出, 由于预测中提取风速的主要变化趋势作为控制输入, 减小了随机变化对功率的影响, 基于预测的功率曲线显示出平稳的输出, 而实测风速的功率曲线则围绕预测风速的功率曲线上下波动。由于实测风速的功率曲线波动较大, 这些波动将被输入功率环中, 通过调整转差率加以纠正, 这样会造成在高风速下的转矩波动增大, 增加了机组疲劳载荷, 进而影响机组寿命。综上所述, 基于预测风速的风力发电机组控制方法显示出更好的控制性能和输出效果。

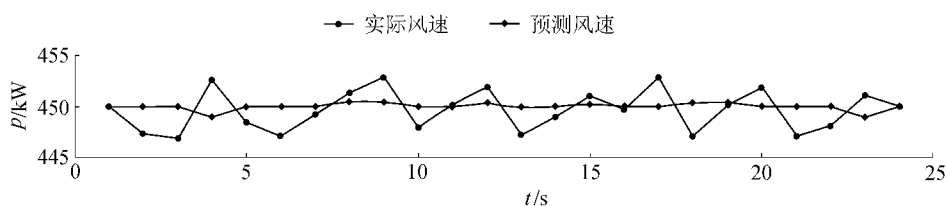


图5 预测风速和实际风速分别对应的功率曲线

Fig. 5 Power curves of predicted and measured wind speed

4 结 语

本文通过对双馈风力发电机组现有控制策略的分析,提出当前系统控制中存在的测量不准确、控制滞后和大惯性等问题。考虑风速的特性以及发电机组的特点,提出基于风速预测的变桨距协调控制方法。该方法将小波变换嵌入时间序列法的建模中,应用于风速的预测,而后基于预测结果进行变桨距控制和双闭环控制,可以提高风力发电机组在高于额定风速情况下的控制性能。其中小波变换得到的低频分量能够较好地反映风速的整体趋势,结合 ARMA 模型进行预测,得到了较为满意的预测结果。仿真结果验证了相对于常规的变桨距控制,本文的控制方法能够获得更好的控制性能。

参考文献:

- [1] 施鹏飞. 从世界发展趋势展望我国风力发电前景[J]. 中国电力, 2003, 36(9): 54-62. (SHI Peng-fei. Looking forward to the prospect of wind power generation in China from the world's development trend[J]. Electric Power, 2003, 36(9): 54-62. (in Chinese))
- [2] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15. (YAO Jun, LIAO Yong, QU Xing-hong, et al. Optimal wind-energy tracking control of direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 11-15. (in Chinese))
- [3] 徐大平, 张新房, 柳亦兵. 风力发电控制问题综述[J]. 中国电力, 2005, 38(4): 70-74. (XU Da-ping, ZHANG Xin-fang, LIU Yi-bing. Overview of relevant control problems of wind turbines[J]. Electric Power, 2005, 38(4): 70-74. (in Chinese))
- [4] 刘光德, 邢作霞, 李科, 等. 风力发电机组电动变桨距系统的研究[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(10): 31-34. (LIU Guang-de, XING Zuo-xia, LI Ke, et al. Research on wind turbine electric pitch system[J]. Electric Machine and Control Application, 2006, 33(10): 31-34. (in Chinese))
- [5] 吴国祥, 黄建明, 陈国呈, 等. 变速恒频双馈风力发电运行综合控制策略[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(4): 435-441. (WU Guo-xiang, HUANG Jian-ming, CHEN Guo-cheng, et al. A synthetic control strategy for DFIG wind power generation[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(4): 435-441. (in Chinese))
- [6] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5. (YANG Xiu-yuan, XIAO Yang, CHEN Shu-yong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5. (in Chinese))
- [8] 周世琼, 康龙云, 张彦宁, 等. 基于 MATLAB 系统辨识工具箱的风信号预测[J]. 太阳能学报, 2008, 29(4): 417-421. (ZHOU Shi-qiong, KANG Long-yun, ZHANG Yan-ning, et al. Wind signal forecasting based on system identification toolbox of Matlab[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(4): 417-421. (in Chinese))
- [9] 邵, 孙育河, 梁岚珍. 基于时间序列法的风电场风速预测研究[J]. 华东电力, 2008, 36(7): 26-28. (SHAO Fan, SUN Yu-he, LIANG Lan-zhen. Wind speed forecast for wind farms based on time series[J]. East China Electric Power, 2008, 36(7): 26-28. (in Chinese))
- [10] 关履泰. 小波分析与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [11] DAUBECHIES I. 小波十讲[M]. 李建平, 杨万年, 译. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [12] 屈晓栋. 风电场风速预测模型研究和实现[D]. 无锡: 江南大学, 2009.