

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.05.020

基于风速估计和风剪切的风力发电机组变桨距控制

杜 静,谢双义,金 鑫,钟 翔,罗 敏,何玉林

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:为提高大型风力发电机组捕获风能的能力,改善其主要零部件受荷载情况,提出基于有效风速估计和风剪切的风力发电机组独立变桨距控制策略。以某 5 MW 变速变桨风力发电机组为验证对象,基于 Bladed 软件平台对传统统一变桨控制策略和独立变桨控制策略进行仿真比较。结果表明:相对于统一变桨距控制策略,独立变桨距控制策略不但能满足维持风力发电机组输出功率额定值稳定的要求,而且使发电机组主要零部件的受荷载情况得到明显改善。

关键词:大型风力发电机组;统一变桨距;独立变桨距;风速估计;风剪切

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)05-0586-04

Variable pitch control of wind turbines based on estimated wind speed and wind shear

DU Jing, XIE Shuangyi, JIN Xin, ZHONG Xiang, LUO Min, HE Yulin

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To enhance the capability of large-scale wind turbines to capture wind energy and improve their primary components load, an individual pitch control strategy based on the estimated wind speed and wind shear is proposed. A case study was conducted on 5 MW variable-speed variable-pitch (VSVP) wind turbines. The Bladed software was used to simulate and compare this individual pitch control strategy and the traditional collective pitch control strategy. Simulation results show that, compared with the traditional collective pitch control strategy, the proposed individual pitch control strategy can not only match rotational power, but also improve the load conditions of primary components of wind turbines.

Key words: large-scale wind turbines; collective pitch; individual pitch; estimated wind speed; wind shear

当前,变速变桨风力发电机组朝着越来越大型化的方向发展,其塔架越来越高,叶片长度越来越长,而目前大部分风力发电机组仍是采用统一变桨距控制策略,即以轮毂高度处的风速作为单一的参考风速,风力发电机组的每个叶片在接收变桨距执行器送来的命令后变化相同的桨距角。但是,由于目前主流 MW 级的三叶片上风向水平轴风力发电机其叶轮直径接近百米,同时 3 个叶片空间位置两两夹角为 120° ,在风剪切效应的影响下,整个叶轮扫掠面上的实际风速大小并不相同^[1],甚至相差很大,这样就使风剪切效应对风力发电机组的影响越来越显著^[2-4]。

在风电场中,风速计通常安装在机舱上,但是叶轮在旋转过程中会产生尾流,从而对风速计的测风效果产生影响,因此风速计所测风速并不能正确反映作用于轮毂中心的风速^[5]。笔者提出基于风速估计和风剪切的独立变桨距控制策略,让每个叶片的桨距角根据所估计的风速进行独立变桨,从而降低风剪切效应的影响。借助某 5 MW 风力发电机组,通过 Bladed 软件对其进行仿真分析,仿真结果表明,新的变桨距控制策略不影响风力发电机的功率输出,同时使风力发电机主要零部件的受荷载情况得到很大改善。

收稿日期:2011-11-10

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2009BAA22B02);国家自然科学基金(51005255);教育部高等学校博士学科点科研基金(20090191120005)

作者简介:杜静(1964—),女,四川南充人,教授,主要从事机电装备现代设计理论、方法以及复杂系统建模、分析和仿真技术研究。E-mail: dujing@cqu.edu.cn

1 变速变桨风力发电机组的空气动力学特性分析

典型的变速变桨风力发电机组包括空气动力转换部分、旋转机械部分和电能转换部分。风力发电机叶轮的空气动力转换可用气动转矩 T_a 和气动功率 P_a 的准静态非线性方程来描述：

$$T_a = \frac{1}{2} C_q(\lambda, \theta) \rho_{air} \pi R^3 V_w^2 \tag{1}$$

$$P_a = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \theta) \rho_{air} \pi R^3 V_w^3 \tag{2}$$

其中 $\lambda = \frac{\Omega_r R}{V_w}$ $C_q(\lambda, \theta) = \frac{C_p(\lambda, \theta)}{\lambda}$

式中： λ ——叶尖速比； θ ——叶片桨距角； ρ_{air} ——空气密度； R ——叶轮半径； V_w ——风速水平方向的分量； C_q, C_p ——转矩系数、功率系数； Ω_r ——叶轮转速。

笔者以某 5 MW 风力发电机组作为仿真研究对象，并采用美国能源部可再生能源实验室提供的 WT-Perf 软件^[6]得到 C_p 曲面和 C_q 曲面，如图 1 和图 2 所示。

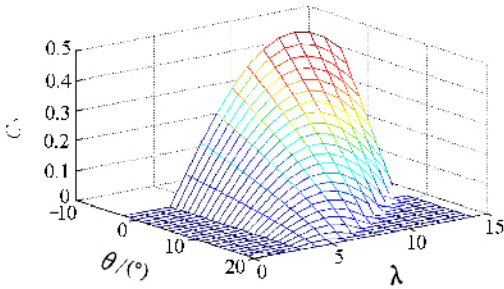


图 1 变速变桨风力发电机组 C_p 曲面

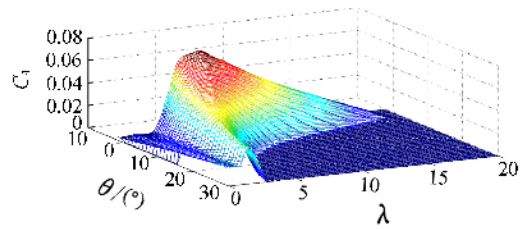


图 2 变速变桨风力发电机组 C_q 曲面

Fig. 1 Power coefficient (C_p) for VSVP wind turbines

Fig. 2 Torque coefficient (C_q) for VSVP wind turbines

从图 1、2 可以看出， C_p, C_q 随着 λ, θ 的变化而变化，且都有一个最大值。通常， C_p 的最大值约为 0.48， C_q 的最大值约为 0.065。

2 变速变桨风力发电机组变桨距控制策略

2.1 传统变桨距控制策略

传统的风力发电机组的变桨距控制器采用经典的 PID 控制器。将测量到的发电机转速经滤波后与发电机转速给定值的偏差作为 PID 控制器的输入^[7-8]，然后经 PID 控制器输出叶片桨距角的参考值。但当风力发电机处于高风速时，其转矩不再随着转速的变化而变化，此时变速风力发电机只有很小的阻尼，而桨距角的很小变化会对转矩产生很大影响。根据运行点调整控制器的增益称为增益调度^[9-10]，此技术可有效解决上述问题。

2.2 独立变桨距控制策略

传统的统一变桨距控制没有考虑风剪切的影响，在额定风速以上时风力发电机组的输出功率虽然比较稳定，但其主要零部件所受荷载偏大。为解决上述问题，笔者提出一种新的独立变桨距控制策略。

2.2.1 风力发电机风速模型

假设地面为零风速平面，则根据风剪切经验公式^[11]，离地高度 H 处的风速为

$$V_H = V_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^n \tag{3}$$

式中： V_0 ——离地高度 H_0 处的风速； n ——剪切指数，与大气稳定性和地面粗糙度有关。风力发电机转轴 r 处长度为 dr 的叶片微元（沿叶片展向所截取的叶片微段）离地高度为 H_r ，其与叶片方位角 θ_{Bi} 之间的关系为

$$H_r = H_0 + r \sin(\theta_{Bi}) \quad (i = 1, 2, 3) \tag{4}$$

本文取轮毂中心处的风速为参考风速。由于风速计受叶轮旋转的影响，风速计所测风速并不准确。Naruhito 等^[12]提出可以在风力发电机的正前方增加风速计并用此处的风速计来测量风速，这在一定程度上

可以消除叶轮旋转的影响,但该方法在无形之中增加了风力发电机的成本。Vander 等^[13]提出将叶轮整体看作一个大的风速计,通过重构气动转矩,并采用牛顿-拉夫逊算法^[9,14]来预估有效风速值,此方法可以很好地解决风速计测量风速不准确的难题。文中将基于此方法得到的风速作为风力发电机独立变桨距的输入信号。

2.2.2 独立变桨距控制策略

由于各叶片风剪切效应随高度变化比较明显,且与各自的方位角有关,因此可以根据叶片的方位角 φ 为每个叶片产生近似的桨距控制信号,并以此进行独立变桨距控制。独立变桨距控制系统如图3所示。

经计算分析,叶片平均风速点等效在叶片长度的0.78 χ 比例系数(以叶轮旋转中心处为起点),则式(4)可表示为

$$H = H_0 + 0.33R\cos(\theta_{Bi}) \tag{5}$$

根据式(3)和式(5)得每个叶片所受平均风速:

$$V_i = \left\{ 1 + 0.33 \frac{R}{H_0} \cos \left[\theta_{Bi} + \frac{2\pi}{3}(i - 1) \right] \right\}^n V_0 \quad (i = 1, 2, 3) \tag{6}$$

利用 MATLAB 软件对风速与桨距角之间的关系进行拟合,可得

$$y = -0.0024162z^{10} + 0.0028819z^9 + 0.014125z^8 - 0.014817z^7 - 0.029717z^6 + 0.027237z^5 + 0.023136z^4 - 0.014056z^3 - 0.024495z^2 + 0.16466z + 0.43936 \tag{7}$$

其中
$$z = \frac{x - 25.83}{8.1854}$$

式中: y ——桨距角 $^{\circ}$; z ——中间变量; x ——风速 m/s 。

3 仿真分析

选取某5MW三叶片上风向水平轴风力发电机组为研究对象,应用 Bladed 软件平台^[15-16]对其进行变桨距控制和荷载分析。风力发电机组的主要参数:叶轮直径为126m,轮毂高度为90m,切入风速为4m/s,切出风速为25m/s,额定风速为11.5m/s,风剪切系数为0.2,额定功率为5MW,叶轮额定转速为12.1r/min,齿轮箱传动比为97。为充分说明统一变桨距和独立变桨距情况下风力发电机组的主要零部件所受荷载变化情况,以叶片1的方位角为参量,且轮毂处风速 V 取13m/s的情况进行计算和分析。

从图4可以看出,采用独立变桨距后对风力发电机的功率输出虽有改善,但改善不大。图5为采用独立变桨距控制策略后3个叶片桨距角的变化情况。

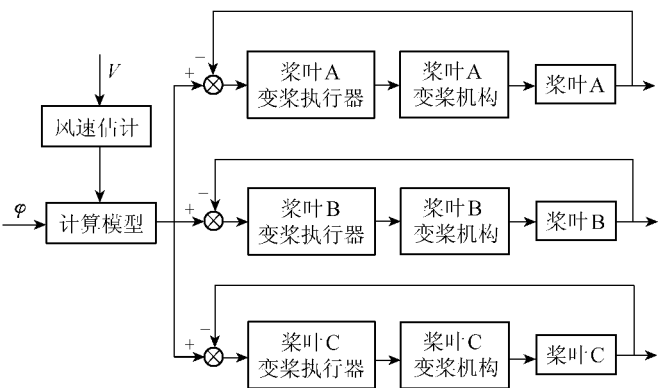


图3 独立变桨距控制系统

Fig. 3 Individual variable-pitch control system of wind turbines

图4 风力发电机功率

Fig. 4 Generator power

由图6和图7可以看出,采用独立变桨距控制策略后,叶片1在叶根处绕 y 轴的力矩和在塔基处绕 x 轴的力矩都有明显降低。

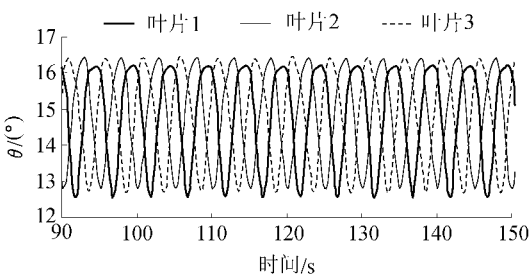
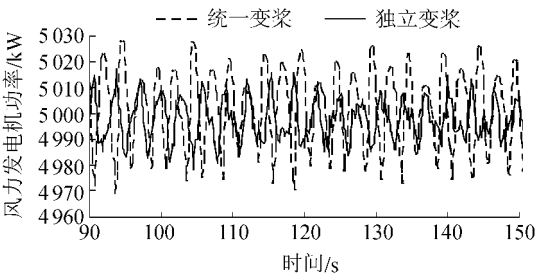


图5 叶片桨距角

Fig. 5 Blade pitch angle

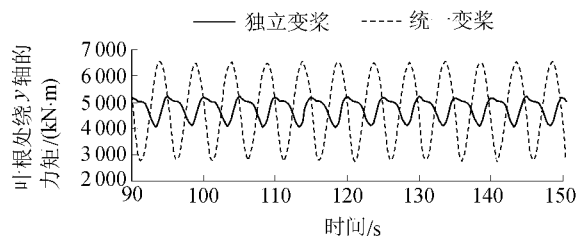


图 6 叶片 1 在叶根处绕 y 轴力矩

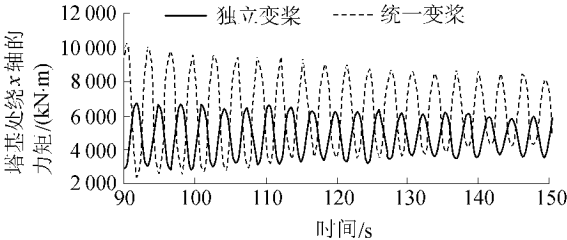


图 7 叶片 1 塔基处绕 x 轴力矩

Fig. 6 Blade moment (for blade 1) about y-axis at blade root Fig. 7 Tower bending moment about x-axis at tower base

4 结 语

针对大型 MW 级变速变桨风力发电机组风剪切效应明显的问题 ,笔者提出基于风速估计和风剪切的独立变桨距控制策略。某 5 MW 电力发电机组的仿真结果表明 ,本文提出的变桨距控制策略不影响风力发电机组的输出功率 ,同时使风力发电机组主要零部件的受荷载情况得到很大改善。

参考文献 :

[1] DDOLAN D S L ,LEHN P W. Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion 2006 21(3) :717-724.

[2] HUGHES F M ,OLIMPO A L ,RAMTHARAN G ,et al. Influence of tower shadow and wind turbulence on the performance of power system stabilizers for DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion 2008 23(2) :519-528.

[3] DATTA R ,RANGANATHAN V T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine : a comparison with alternative scheme[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion 2002 17(2) :414-421.

[4] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京 :国防工业出版社 ,2006.

[5] 王秋瑾 ,张新房. 基于 WLS-SVM 的变速风力机有效风速估计[J]. 系统仿真学报 ,2005 ,17(7) :1590-1593.(WANG Qiujin ,ZHANG Xinfang. Effective wind speed estimation for variable speed wind turbines based on WLS-SVM[J]. Journal of System Simulation ,2005 ,17(7) :1590-1593.(in Chinese))

[6] BUHL M L. WT_ PERF users guide[R]. Golden , CO : National Renewable Energy Laboratory ,2004.

[7] 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.

[8] BOUKHEZZAR B , LUPU L ,SIGUERDIDJANE H ,et al. Multivariable control strategy for variable speed variable pitch wind turbines [J]. Renewable Energy 2007 32 :1273-1287.

[9] LESCHER F , ZHAO Jingyun , BORNE P. Robust gain scheduling controller for pitch regulated variable speed wind turbin[J]. Studies in Informatics and Control 2005 ,14(4) :299-315.

[10] BOSSAYI E A. Bladed for windows user manua[M]. Bristol : Garrad Hassan and Partners Ltd 2005.

[11] SPERA D A. Wind turbine technology[M]. New York : ASME Press ,1994.

[12] KODAMA N ,MATSUZAKA T , TUCHIYA K , et al. Power variation control of wind generator by using feed forward control[J]. Renewable Energy ,1999 ,16 :847-850.

[13] VANDER HOOFT E L , SCHAAK P T G , VAN E. Wind turbine control algorithm[R]. Amsterdam :Ministry of Economic Affairs 2003.

[14] BURTON T , SHARPE D , JENKINS N , et al. Wind Energy Handbook[M]. New York : John Wiley & Sons ,Ltd 2001.

[15] RONILSON R. A sensorless control for a variable speed wind turbine operating at partial load[J]. Renewable Energy 2010 ,1(1) :1-10

[16] STANLEY B L , BARBARA E M , JOSEE L. C + + Prime[M]. 4 版. 李师贤 ,蒋爱军 ,译. 北京 :人民邮电出版社 ,2006.