

文章编号: 1671-7848(2012)03-0523-04

变速风力发电机组最大风能追踪与桨距控制

何玉林, 黄 帅, 苏东旭, 周宏丽, 金 鑫, 王 磊

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)



摘 要: 针对变速变桨风力发电机组 (Variable Speed Variable Pitch, VSVP) 如何在低风速时最大限度捕获风能以及在额定风速以上稳定输出功率进行研究。低风速时在传统风能追踪控制策略的基础上, 提出通过改变最优增益系数来追踪最佳风能利用系数的自适应转矩控制策略。在额定风速以上, 依据风机空气动力学原理、风轮扫及面内风速风切特性, 提出基于桨叶方位角信号的独立变桨距控制策略。该策略通过权重系数将统一变化的桨距角转化为 3 桨叶独立变化的桨距角。以国产某 2 MW 风力发电机组为验证对象, 基于 Bladed 软件平台对所采用的控制策略进行仿真验证。结果表明, 相对传统控制, 所提出的控制策略在低风速时能够更好的追踪最大功率点。额定风速以上时, 使风力发电机组能够在额定转速下保持稳定的电功率输出。

关 键 词: 变速变桨; 自适应转矩控制; 最大功率点追踪; 独立变桨; Bladed 软件

中图分类号: TP 27

文献标识码: A

Largest Wind Energy Tracking and Pitch Control for Variable Speed Wind Turbine

HE Yu-lin, HUANG Shuai, SU Dong-xu, ZHOU Hong-li, JIN Xin, WANG Lei

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

Abstract: For VSVP (variable speed variable pitch) wind turbine, the control strategies are used to maximize the energy capture, maintain the stable power and reduce rotor speed fluctuation. Based on the tradition method of energy capture, with changing optimal mode gain, an adaptive torque control strategy based on the basic operation unit is proposed in this paper. It could track the optimal power coefficient in low wind speed. According to aerodynamics principle and wind shear characteristic, our proposed strategy can figure out the rated wind speed region according to the azimuth angle signal of individual pitch. The collective pitch angle is transformed into the individual variable pitch angle based on the weight number. With a research object of 2MW wind turbine, this control strategy is simulated on the GH Bladed software. Simulation results show that the proposed control strategy can achieve maximum power point in low wind speed region and the proposed strategy of individual pitch control can maintain power regulation and decrease the fluctuation of rotor speed in the rated wind speed region.

Key words: variable speed variable pitch; adaptive torque control; maximum power point tracking; individual pitch control; Bladed software

1 引 言

变速变桨风力发电机组在产业化设计中, 为了获得优质电。目前在低风速时, 追踪最佳风能利用系数主要有爬山算法、三点比较法、功率信号反馈法等^[1-3]。其中, 爬山算法由于风能的随意性, 会造成最大功率点附近震荡不止。三点比较法由于风速的不确定性会引起误操作。而功率信号反馈法很难获取风电机组的功率-风速曲线, 因此在实际中很难应用。国内外学者对风力机组运行在额定风速以上降低发电机转速波动和改善风电品质进行了相

关研究。Hand MM 等人采用 PI 和 PID 控制方式对风电机组进行统一桨距控制^[4]。Endusa Billy Muthando 等人在风电机组控制中采用变增益 PID 控制方式^[5-6]。

然而, 风电机组的非线性空气动力特征、功率特性和转矩特性制约了以上控制器性能。

本文在低风速时提出自适应转矩控制策略。在额定风速以上, 提出基于桨叶方位角信号的独立变桨控制策略。以国产某企业 2 MW 风电机组为验证模型, 在 Bladed 软件平台上对本文所采用的控制策略进行仿真验证。

收稿日期: 2010-11-24; 收修定稿日期: 2011-01-10

基金项目: 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项目(20090191120005)

作者简介: 何玉林(1945-), 男, 四川遂宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事风力发电技术及装备研究等方面的教学与科研工作。

2 变速变桨的分段控制策略

变速变桨风电机组的整个运行控制阶段可以通过发电机转速划分为 4 个阶段，发电机转速与转矩关系图，如图 1 所示。

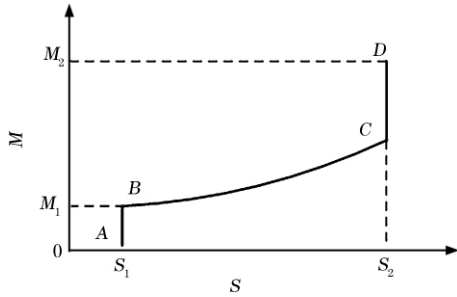


图 1 发电机转速与转矩关系曲线

Fig. 1 Generator speed versus torque operating curve

在发电机转速小于 S_1 之前，此时发电机无功率输出，当风速大于切入风速时发电机并网，AB 段为恒转速阶段，随着风速增大，发电机转矩增大。

BC 段为最优控制阶段，此时发电机转速随着风速变化保持最佳叶尖速比，追踪最大功率点。CD 段为转速恒定区，在这个区域内，不再进行最大风能追踪，而是将机组转速限定在最大允许转速。

在 D 点时，机组已经达到额定转矩，之后，随着风速的继续增大，机组恒转矩运行，为了保护机组不受损坏，调整桨距角限制功率。

风力机从风能捕获的机械能功率为^[7]

$$P_{aero} = \rho \pi R^2 v^3 C_p / 2 \quad (1)$$

$$\lambda = \omega_r R / v \quad (2)$$

式中， ρ 为空气密度； R 为风轮半径； v 为风速； ω_r 为风轮旋转角速度；风能利用系数 C_p 为尖速比 λ 和节距角 β 的函数关系。

风电机组叶尖速比与功率系数的对应关系曲线，如图 2 所示。

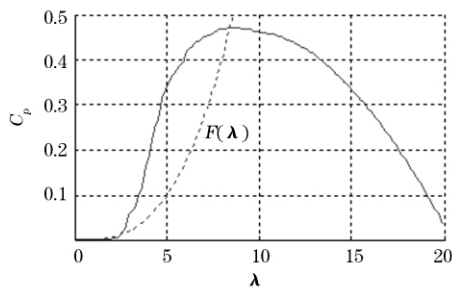


图 2 功率系数特性曲线

Fig. 2 Power coefficient characteristic curve

把式(2)代入式(1)可得：

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_r^3}{\lambda^3} C_p \quad (3)$$

最优叶尖速比 λ_{opt} ，对应于最大的风能利用系

数为 C_{pmax} ，则得到：

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega_r^3}{\lambda_{opt}^3} C_{pmax} \quad (4)$$

使 $P_{max} = T_{opt} \omega_r$ ，可得：

$$T_{opt} = K \omega_r^2 \quad (5)$$

式中，最优增益系数 K 表达式如下^[8]：

$$K = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \quad (6)$$

则发电机转矩表达式如下：

$$T_g = K \omega_r^2 / G \quad (7)$$

风轮角加速度 $\dot{\omega}_r$ 的表达式如下：

$$\dot{\omega}_r = (T_{aero} - GT_g) / J \quad (8)$$

式中， J 为风轮，发电机，轴及齿轮箱以的等效转动惯量； G 为齿轮箱的传动比；气动扭矩 T_{aero} 可表示为

$$T_{aero} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_p}{\lambda} \omega_r^2 \quad (9)$$

将式(7)，式(9)代入式(8)，可得：

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2J} \rho \pi R^5 \omega_r^2 \left(\frac{C_p}{\lambda^3} - \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \right) \quad (10)$$

由式(10)可知，当叶尖速比 $\lambda > \lambda_{opt}$ 时，并且实际上 $C_p(\lambda) < C_{pmax}$ ， $\dot{\omega}_r$ 为负值，风轮减速，使 $\lambda = \lambda_{opt}$ ，当 $\lambda > \lambda_{opt}$ 并且：

$$\begin{cases} C_p > \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \lambda^3 \\ F(\lambda) = \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \lambda^3 \end{cases} \quad (11)$$

$\dot{\omega}$ 为正值，风轮加速， $F(\lambda)$ 曲线，见图 1。可以看出 λ 在 2.5 到 7.5 之间满足不等式(11)，意味着只要叶尖速比不小于 2.5，等式(7)表示的控制策略即可使 λ 趋近于 λ_{opt} ，当 λ 小于 2.5 时，风轮转速将趋近于零，实际中风速变化较快，又由于风机大惯性延迟特性，在追踪最佳叶尖速比的过程中存在滞后性，风机 $C_p(\lambda)$ 特性曲线随着风机的老化、磨损发生改变，造成了功率损失^[9]。因此在上述控制策略的基础上本文提出了自适应增益的转矩控制策略，表达式如下：

$$T_g = M \omega_r^2 / G \quad (12)$$

式中， M 为自适应增益。

增益自适应规则如下：

$$\begin{cases} M(k) = M(k-1) + \Delta M(k) \\ \Delta M(k) = \gamma_{\Delta M} \text{sgn}[\Delta M(k-1)] \text{sgn}[\Delta P_a(k)] \times |\Delta P_a| \\ \Delta P_a(k) = P_a(k) - P_a(k-1) \end{cases} \quad (13)$$

式中， $\gamma_{\Delta M}$ 为常量增益，其值影响系统稳定性； k 为控制器离散时间步长； $\text{sgn}(x)$ 与 $\Delta P_a(k)$ 为表达式。

其表达式如下：

$$\begin{cases} \operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \\ P_a(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_c(k-n+i) \\ P_z(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_z(k-n+i) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $P_a(k)$ 表示从第 $(k-n+i)$ 到第 k 个采样周期的功率系数的均值。

$$P_z = \rho \pi R^2 v^3 / 2 \quad (15)$$

式中, P_z 为风轮扫掠面内的全部风能。

由式 (8), 可得如下表达式:

$$P_c = GT_g \omega_r + J \omega_r \dot{\omega}_r \quad (16)$$

式中, P_c 为发电机的功率与风机动能之和。

M 初值为式 (6) 中的系数 K , 并通过 ΔM 改变增益 M 的值。在每个采样周期末, 计算最近 10 个周期的风能利用系数并取均值, 即 $P_a(k)$, 如果 $P_a(k) > P_a(k-1)$, 即 $\Delta P_a(k)$ 为正值, 则 ΔM 按式 (13) 更新并与 $\Delta M(k-1)$ 同号, 直到 ΔP_a 为负值, 则 ΔM 更新并取与上一个周期相反符号的值。自适应转矩控制框图, 如图 3 所示。

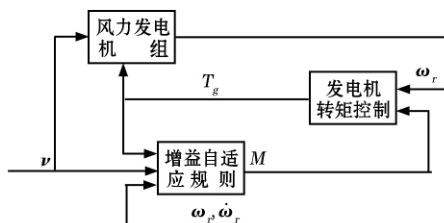


图 3 自适应转矩控制结构框图

Fig. 3 Structural diagram of adaptive torque control strategy

3 变桨距控制系统

目前, 国内外风力发电机组的变桨控制主要有统一变桨距控制和独立变桨距控制两种方法。独立变桨距控制^[10]是在统一变桨距的基础上发展起来的新桨距控制理论和方法。独立变桨距控制^[11-13]是指风力机每支叶片根据自身的控制规律独立地变化桨距角 β 。独立变桨控制框图, 如图 4 所示。

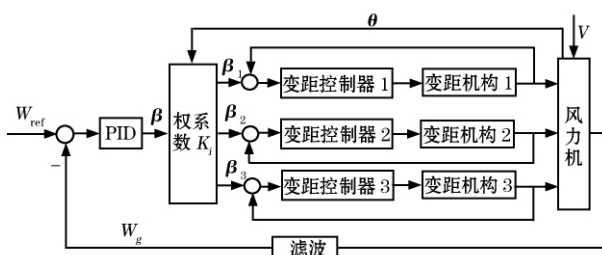


图 4 风力机独立变桨距控制框图

Fig. 4 Individual variable-pitch control of wind turbine

独立变桨距系统的控制策略主要有两种:

一种基于桨叶加速度信号的独立变桨控制; 另一种是基于桨叶方位角信号的独立变桨距控制^[8]。

在工程上, 测量桨叶加速度不容易实现, 最简单易用的测量方法是测量叶轮位置角。由于各叶片风切效应随高度变化比较明显且与各自的方位角有关, 因此, 可以根据桨叶的方位角来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。

风剪切是稳定状态的平均风速随着高度的变化, 即风速会随高度的增加而增加。假设地面为零风速平面, 则有风切经验公式^[14]为

$$V_H/V_0 = (H/H_0)^n \quad (17)$$

式中, V_H 为离地参考高度 H 处风速; V_0 为离地参考高度 H_0 处风速; n 为剪切指数, 它取决于大气稳定性和地面粗糙度。

风力机转轴 r 处长度为 d_r 的叶片叶素离地高度为 H_r , 其与桨叶方位角 θ_{B_i} 之间的关系为

$$H_r = H_0 + r \sin(\theta_{B_i}) \quad (18)$$

将桨叶平均风速点等效在桨叶长度的 $3/4$ 处^[14], 则式 (18) 可表示为

$$H = H_0 + 3R/4 \sin(\theta_{B_i}) \quad (19)$$

根据式 (17) 和式 (19) 推得每个桨叶所受平均风速, 如下:

$$V_i = [1 + \frac{3R}{4H_0} \sin(\theta_{B_i} + (i-1) \times \frac{2\pi}{3})]^n \times V_0 \quad (20)$$

式中, R 为桨叶长度; θ_{B_i} 为桨叶 1 的方位角。

权系数是依据每个桨叶受风情况来进行分配, 风越大, 权系数越大, 桨叶节距角变化值也越大。权系数 K_i 表达式为

$$K_i = \frac{3 \times [1 + \frac{3R}{4H_0} \sin(\theta_{B_i} + (i-1) \times \frac{2\pi}{3})]^{2n}}{\sum_{i=1}^3 [1 + \frac{3R}{4H_0} \sin(\theta_{B_i} + (i-1) \times \frac{2\pi}{3})]^{2n}} \quad (21)$$

经权系数 K_i 分配后每个叶片的节距角 β_i 为

$$\beta_i = K_i \beta \quad (22)$$

式中, β 为统一变化桨距角给定值。

4 仿真结果

本文基于 Blade 软件平台^[15]对所采用控制策略的可行性在国产某企业 2 MW 风力发电机组上进行了验证。风力发电机组主要参数如下:

风轮直径 80 m, 切入风速为 4 m/s, 切出风速为 25 m/s, 额定风速为 12 m/s, 额定功率 2 MW, 发电机额定转速 1500 r/min。瞬态风模型, 如图 5 所示。

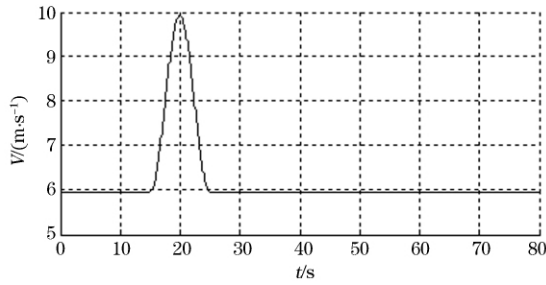


图 5 瞬态风

Fig. 5 Transient wind

通过在 Bladed 中进行发电状况的模拟得到发电机电功率对比曲线, 如图 6 所示。

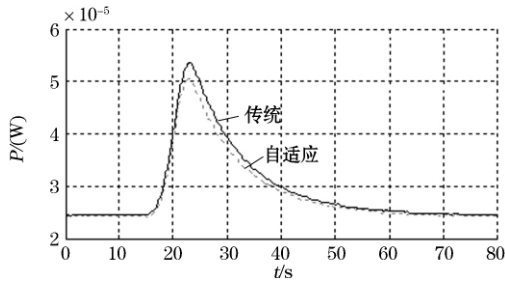


图 6 电功率

Fig. 6 Electrical power

从图中可以看出, 采用自适应转矩控制的最大功率点比传统转矩控制高出 5.9 %。

在高速时, 本文取 DLC1.2 下 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, 该湍流风在长度方向、宽度方向、高度方向湍流密度分别为 16.5 % , 12.89 % 和 9.12 % , 湍流风速曲线, 如图 7 所示。

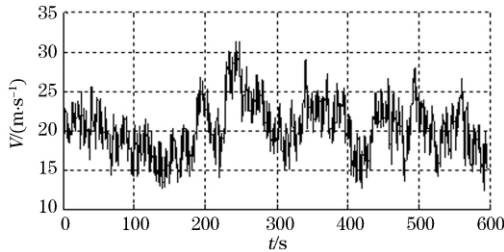


图 7 湍流风速曲线

Fig. 7 Turbulent wind curve

独立变桨距控制过程中 3 个桨叶桨距角的变化情况, 如图 8 所示。

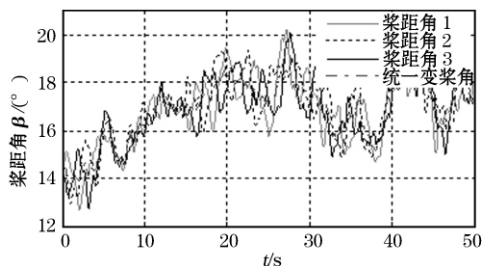


图 8 独立变桨距各桨叶节距角

Fig. 8 Pitch angle under variable-pitch control

由图 8 可以看出, 独立变桨距控制 3 个桨叶桨距角的变化与风轮转动有关, 相对于统一变桨距的控制, 不仅每个桨叶的桨距角变化不同, 而且变化幅度大, 这对于变桨距执行机构的要求相应也比较高。

与统一变桨距控制相比, 独立变桨控制降低了风力发电机组输出功率的波动使发电机输出功率更加稳定, 如图 9 所示。

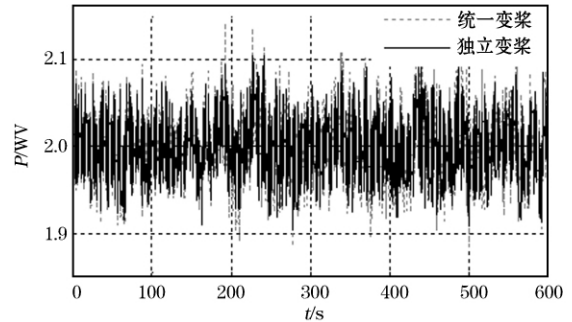


图 9 电功率曲线

Fig. 9 Electric power curve

发电机转速曲线, 如图 10 所示。

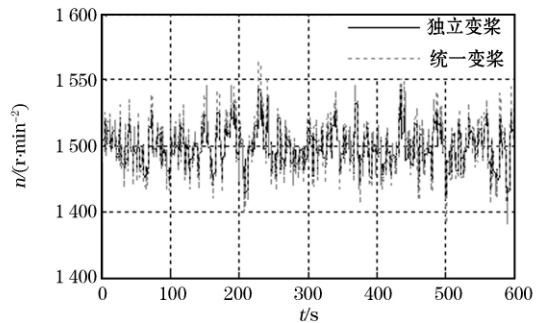


图 10 发电机转速曲线

Fig. 10 Generator speed curve

在统一变桨控制下, 风轮转速波动最大误差达到了额定转速的 3.3 %。在独立变桨控制下, 发电机转速变化幅度小于额定转速的 2.03 %。

5 结 语

在分析变速变桨风电机组最优功率运行特性和统一变桨的基础上, 提出了自适应转矩结合独立变桨的控制策略。

基于 Bladed 软件的仿真结果表明, 在低风速时自适应转矩控制能够更好地追踪最佳风能利用系数, 在额定风速以上时独立变桨控制使风力发电机组运行在额定功率点和额定转速点附近。

本文提出的控制策略应用于兆瓦级变速变桨风力发电机组, 将有效提高风力发电机组在低风速时的风能捕获和额定风速时的发电质量, 通过独立变桨能有效降低机组关键零部件的载荷, 延长机组使用寿命。
(下转第 538 页)

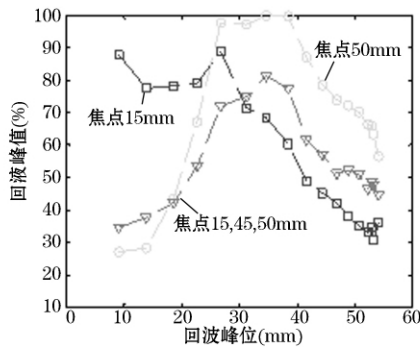


图7 单焦点和多焦点聚焦方法实验对比

Fig.7 Comparative experiments of single focus point and multi-focus points

图7中,横坐标为缺陷回波峰位值,即缺陷深度值;纵坐标回波峰值是回波信号峰值占信号满屏值的百分数。由图7中可知,采用15 mm单焦点发射声场时,其最大回波峰值对应的缺陷孔和最小回波峰值对应的缺陷孔之间的峰值信号相差9.6 dB;采用45 mm单焦点发射声场时,最大回波峰值对应的缺陷孔和最小回波峰值对应的缺陷孔之间的峰值信号相差10.7 dB;采用15 mm,45 mm,50 mm多焦点发射声场时,其最大回波峰值对应的缺陷孔和最小回波峰值对应的缺陷孔之间的峰值信号仅相差6.1 dB,其在深度方向上小孔的回波峰值分布更为均匀。因此,表明该方法可以改善DDF检测在深度方向上灵敏度的均匀性。

6 结 语

本文利用相控阵探头多晶片分组延时聚焦的方法,在深度方向形成多焦点聚焦的发射声场,改善了DDF检测在深度方向上灵敏度的均匀性。声场

(上接第526页)

参考文献(References):

- [1] 梁中华,张武,杜继光.基于MRAC风电系统的MPPT控制策略[J].沈阳工业大学学报,2008,30(3):280-283. (Liang Zhonghua,Zhang Wu,Du Jiguang. MPPT control strategy of wind generation system based on MRAC[J]. Journal of Shenyang University of Technology 2008,30(3):280-283.)
- [2] 黄守道,余峰,黄科元.三点比较法在风力发电系统中的应用[J].控制工程,2009,16(6):764-767. (Huang Shoudao,Shu Feng,Huang Keyuan. Application of three points comparing algorithm in wind power system[J]. Control Engineering of China, 2009,16(6):764-767.)
- [3] 吴政球,干磊,曾议.风力发电最大风能追踪综述[J].电力系统及其自动化学报,2009,21(4):88-93. (Wu Zhengqiu,Gan Lei,Zeng Yi. Summary of tracking the largest wind energy for wind power generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA,2009,21(4):88-93.)
- [4] Hand MM. Variable-speed wind turbine systematic design methodology: a comparison of nonlinear model-based designs NREL report TP-50-25540, National Renewable Golden CO, July 1999.
- [5] Muhand E B, Tomonobu s, Naomitsu U, et al. Gain scheduling control of variable speed WTG under widely varying turbulence loading[J]. Renewable Energy 2007,32:2407-2423.
- [6] Ma X. Adaptive extremum control and wind turbine control[D]. Denmark: May 1997.

仿真说明该方法使得发射声场轴线声压分布更为均匀,DDF扫描检测实验的结果验证了该方法对改善优化DDF检测的有效性。该方法对于厚截面工件快速DDF扫描检测的优化有着重要意义。

参考文献(References):

- [1] 舒丹,刘丽川,肖贤军,等.超声相控阵检测的灵敏度实验[J].无损检测,2008,30(1):704-706. (Shu Dan,Liu Lichuan,Xiao Xianjun, et al. Sensitive experiments of ultrasonic phased-array inspection [J]. Nondestructive Testing,2008,30(1):704-706.)
- [2] 李衍.超声相控阵技术基本概念[J].无损探伤,2007,31(4):102-104. (Li Yan. Base conception of ultrasonic phased-array technology [J]. Nondestructive Detection,2007,31(4):102-104.)
- [3] Roberts R A,Lavrentyev A I,Degtyar A D. Optimization of transmission field for DDF-Based phased-array inspection[J]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation 2006,25(3):813-820.
- [4] Roberts R. A,Lavrentyev A I,Degtyar A I. Dynamic control of aperture width using DDF phased array instrumentation[J]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation,vol. 25 ed. 613-621 2007
- [5] Huang R,Schmerr L,Sedov J A. A new multi-gaussian beam model for phased array transducers[J]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation 2007,26(5):751.
- [6] Howard P,Klaassen R,Kurkcu N. Phased array ultrasonic inspection of titanium forgings[J]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation 2007,26(5):341-348.
- [7] 鲍晓宇.相控阵超声检测系统及其关键技术的研究[D].北京:清华大学,2003. (Bao Xiaoyu. Research on phased array ultrasonic testing system and its key technology [D]. Beijing: Tsinghua University,2003.)
- [8] 燕会明.超声相控阵技术及其应用研究[D].太原:中北大学,2008. (Yan Huiming. Research on phased array ultrasonic technology and application [D]. Taiyuan: North University of China,2008.)
- [9] 周海鹏.相控阵超声检测系统相关技术的研究[D].大连:大连理工大学,2008. (Zhou Haipeng. Research on phased array ultrasonic testing system and its correlative technology [D]. Dalian: Dalian University of technology,2008.)
- [10] 范兵,郝坚,艾春安.超声相控阵探头声场特性仿真分析[J].机械科学与技术,2003,22(1):121-123. (Fan Bing,Zheng Jian,Ai Chun'An. Simulation analysis on acoustic field characteristic of ultrasonic phased array[J]. Mechanical Science and Technology,2003,22(1):121-123.)
- [7] Boukhezzar B,Siguerdidjane H. Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization [J]. Energy Conversion and Management 2009,50:885-892.
- [8] Burton T,Sharpe D,Jenkins N,et al. Wind Energy Handbook [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd. 2001:472-480.
- [9] 马神伟,俞俊杰,吴国祥.双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略[J].电工技术学报,2009,24(4):202-208. (Ma Shenwei,Yu Junjie,Wu Guoxiang. MPPT control strategy for doubly-fed wind power generation[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society 2009,24(4):202-208.
- [10] Engelen van T G. Design model and load reduction assessment for multi-rotational model individual pitch control(Higher Harmonics Control). In: European Wind Energy conference 2006,Athens.
- [11] 王江.带增益调度的风力发电变桨距控制研究[J].电源技术应用,2009,12(3):8-11. (Wang Jing. Study on the pitch control for wind turbine with gain scheduling[J]. Power Supply Technologies and Applications 2009,12(3):8-11.)
- [12] Burton T,Sharpe D,Jenkins N,et al. Wind Energy Handbook [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd. 2001:472-480.
- [13] 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.
- [14] Rocha R. A sensorless control for a variable speed wind turbine operating at partial load [J]. Renewable Energy 2010,35(1):1-10.
- [15] Bossayi EA. Bladed for windows user manual[M]. England: Gar-rad Hassan and Partners Ltd 2005:114-122.