



CSTAM CSTAM2012-B03-0133

大型风力机在强风速区控制策略的研究

曹九发，王同光，李义金

南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

大型风力机在强风速区控制策略的研究

曹九发, 王同光, 李义金

(南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 江苏南京, 210016)

摘要: 风力机平常运行在 3m/s 切入风速和 25m/s 切出风速之间。当风速到达切出风速时, 普通风力机将马上停机, 并且断开电网, 尤其海上风力机经常遇到超过切出风速的强风。这样的控制策略不仅影响电网的质量, 而且对风力机结构部件的疲劳和结构强度存在不利影响。本文在某兆瓦风力机的理论功率曲线的基础上, 考虑风力机气动结构双向耦合情况, 建立大型柔性风力机全机模型, 针对额定风速以上的功率曲线, 通过优化不同控制策略的桨距角和风轮转速, 最后根据发电量输出最大和受载荷最小, 通过多目标优化方法得到新的风力机理论运行的功率曲线和相应桨距角、转速变化规律曲线。在新的理论功率曲线下运行, 满足了风力机载荷要求和保护电网, 并且可以提高捕获的风能。

关键词 大型风力机; 叶素动量理论; 气动弹性; 控制策略

引言

风能作为清洁能源的代表, 因其技术相对成熟, 成本低, 在全球得到迅猛发展。伴随着全球风电装机量的迅速增长, 兆瓦级风力机所占比例也不断扩大。尤其, 海上风力资源丰富, 世界各国正在纷纷发展本国海上风电产业。为了捕获更多风能和减少成本, 风力机设计转向大型风力机、柔性叶片和高塔架方向发展。再加上海上的风力机遭遇的强风速工况较多、气动弹性耦合效应较明显等特点^{[1][2]}。

针对这些特点, 本文进行了大型风力机在强风速区风能利用控制策略的研究。因此, 首先, 必须进行大型柔性风力机的载荷计算, 主要是气动载荷的计算。目前, 解决气动性能的方法有三种: 第一种是动量理论与叶素理论相结合求解风轮处诱导速度, 即所谓的 BEM 理论, 是用于风力机性能分析最为简便快捷和使用最广泛的方法, 并且在提供准确翼型数据的情况下可以得到比较准确的计算结果^[3]; 第二种是用 Biot-savart 定律求解尾流涡系在叶片处的诱导速度, 即所谓的涡尾迹方法, 主要包括刚性涡尾迹模型、约定涡尾迹模型和自由涡尾迹模型, 其中自由涡尾迹^{[4][5]}适合于模拟风力机的复杂流场, 并能准确地计算出叶片载荷的详细分布, 虽然计算量比 CFD 小很多, 但不能满足风力机日常快速计算的要求; 第三类是数值

求解 Euler 或者 Navier-Stokes 方程的 CFD 方法, 该方法理论上是最能精确计算风力机气动特性的方法, 但是计算工作量太大。其次, 要建立大型柔性风力机结构模型, 主要目的是计算不同载荷下风力机部件的位移、速度和加速度响应, 以提供气动弹性计算。在目前的气动弹性分析过程中有三种模型被应用: 第一种是有限元方法建立的模型; 第二种是模态分析与子结构建立的模态刚度和质量的模型; 第三种是多体动力学方法模型。这三种方法都在各类程序中有不同应用^{[6][7][8]}, 主要区别于建模方式、自由度数和计算成本等方面。最后, 要选择强风速区合适的控制策略, 目前采用的风力机控制策略主要有四种: 第一种是定速定桨, 此策略成本低, 但工作效率较低; 第二种是定速变桨, 在额定风速以下风能利用不能得到优化; 第三种是变速定桨, 在低风速区不能很好跟踪理论功率曲线; 第四种是变桨变速, 在低风速采用不变桨, 通过变转速来追踪最优运行状态; 然后, 超过额定功率以后, 转速不变, 改用调节变桨距角来稳定风力机功率, 以便避免风力机受到结构破坏^{[9][10][11]}。

当风速超过切出风速时, 实行断网刹车停机, 这时会导致电网受到较大的冲击, 在强风速区风能被浪费, 而且对刹车系统的要求较高, 刹车停机受到的载荷冲击也很大。因此, 本文研究了切出风速以后风能利用的控制策略, 采用了变桨不变速和变桨变速两

1) 基金资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 No. NP2012102; 南京航空航天大学科研基金创新创优基金 XCA12003; 江苏高校优势学科建设工程资助项目;

2) Email: caojiufa98@163.com

种控制策略。应用非定常的 BEM 方法计算气动载荷,并与重力载荷、惯性载荷进行合成;基于有限元方法建立起全机模型,计算全机的模态,再通过模态叠加法建立全机动力学方程,引入气动阻尼效应,实现了气动和结构的双向耦合,运用 Runge-Kutta-Nystrom 方法进行动力学方程的求解;最后,基于 ISIGHT 优化平台的 NASG 算法,分别对两种控制策略的桨距角和风轮转速进行优化,计算出某 1.5MW 风力机变桨变速的控制规律曲线。得到优化结果后,分析两种控制策略的载荷和风能利用情况。得出了变桨变速控制策略是比较合理的。

1 风力机载荷

1.1 气动载荷

叶素动量 (BEM) 理论是进行风力机气动载荷计算最为常用的方法。不仅由于其简便快捷,而且在具备准确翼型数据的条件下能够提供满意的计算结果。本文使用修正的非定常 BEM 理论,引入叶根损失和叶尖损失,在轴向诱导因子较大时使用 C_t 的经验模型,并加入动态入流和动态失速模型^[3]。使用该方法,可以计算风力机在不同风速、转速、桨距角及偏航角情况下的动态载荷。

大型风力机存在很大的柔性,必须考虑气动弹性问题:气动力的改变会引起结构的变形,另一方面结构变形到导致气动力的改变,从而产生双向耦合。因此,在进行非定常 BEM 气动力计算时,应该考虑结构变形的影响。为了确定载荷、位移、速度和加速度等矢量在空间上的分布情况,可以用如下图四个坐标系来描述大型柔性风力机。第一个坐标系是塔底的坐标系,并作为惯性坐标系;第二个坐标系不旋转,放置在机舱上;第三个坐标系固定在旋转主轴上;第四个坐标系与某一叶片保持一致。

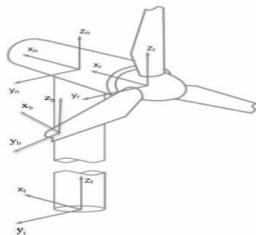


图1 坐标系描述的风力机

叶片的相对速度 v_{rel} 如下式 (1) 所示:

$$\begin{pmatrix} v_{rel,x} \\ v_{rel,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ox} \\ v_{oy} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ v_{rot} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} W_x \\ W_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} v_{bx} \\ v_{by} \end{pmatrix} \quad (1)$$

v_{ox} 、 v_{oy} 是风速, v_{rot} 是叶片旋转导致的线速度, W 是诱导速度, v_{bx} 、 v_{by} 是叶片振动速度。各个速度的关系参见下图:

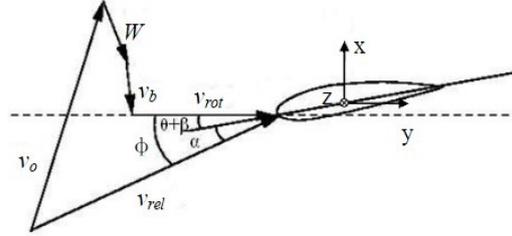


图2 流经某一叶片的局部速度三角形
诱导速度 W 可由下式 (2) 表示:

$$\begin{cases} W_x = \frac{-BL \cos \phi}{4\rho\pi r F |v_0 + f_g n(n \cdot W)|} \\ W_y = \frac{-BL \sin \phi}{4\rho\pi r F |v_0 + f_g n(n \cdot W)|} \end{cases} \quad (2)$$

式中, B 为叶片数, L 是指升力, ϕ 为入流角, ρ 为空气密度, r 为叶片截面的展向位置, n 为推力方向的单位向量, F 为普朗特叶尖损失因子, f_s 为 Glauert 修正。同时,本文还采用了动态入流模型和动态失速模型,修正风轮运转的非定常效应。

计算得到诱导速度后,可以根据下式 (3) 计算攻角 α :

$$\alpha = \phi - (\beta + \theta_{twist}) \quad (3)$$

其中:

$$\tan \phi = \frac{v_{rel,x}}{v_{rel,y}} \quad (4)$$

式中: θ 为翼剖面的几何扭角, β 为桨矩角。

根据攻角,通过翼型插值方法,可以得到升力系数 c_l 和阻力系数 c_d ,通过公式 (5) 计算出升力 L 和阻力 D ,从而根据公式 (6) 计算出法向载荷 F_n 和切向载荷 F_t 。

$$\begin{cases} L = 0.5\rho |v_{rel}|^2 C_l c \\ D = 0.5\rho |v_{rel}|^2 C_d c \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} F_n = L \cos \phi + D \sin \phi \\ F_t = L \sin \phi - D \cos \phi \end{cases} \quad (6)$$

1.2 重力载荷

叶片在旋转运动过程中，还受到叶片自身的重力作用。当叶片向下旋转时，叶根后缘边承受拉应力，叶根前缘边受压应力。当叶片向上旋转时，叶根后缘边承受压应力，叶根前缘边受拉应力。这样叶片将受到一个正弦曲线变化的载荷，而频率则对应于风轮的转速。在惯性系下如图(1)，重力载荷可以表示为(0, 0, -mg)，可根据坐标变换得到叶根坐标系下的重力载荷分布如式(7)：

$$f = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 惯性载荷

叶片旋转引起的叶素离心力如公式(8)：

$$dF_c = \omega^2 r m dr \quad (8)$$

其中，m dr是叶素的质量， ω 是风轮的旋转角速度。因此，沿着叶片展向积分后可得到叶根坐标系下的离心力载荷分布。

2 风力机动力学方程的求解

2.1 风力机结构模型

本文采用有限元方法，对一大型变桨型风力机建立结构模型。选择两节点梁单元分别建立叶片和塔架模型，根据结构刚度分布和质量分布给叶片梁单元附属性，在指定位置附上非结构质量，并沿叶片轴向施加离心力以考虑风轮旋转对叶片动力特性的影响，选用壳单元建立轮毂模型，采用共节点方式连接叶片与轮毂组成风轮，采用0D单元模拟机舱质量及其惯量，采用刚性约束连接风轮、机舱与塔架模型，在塔架底部施加固定约束边界条件，分析了某1.5MW风力机17.23 rpm下的风轮模态。挥舞一、二阶和摆振一阶模态，它们振型描述分别为两个反对称和一个对称振型，挥舞频率分别为0.87172Hz、0.90011Hz、0.93645Hz和2.164Hz、2.2968Hz、2.4192Hz，摆振方向频率为1.3766Hz、1.4049Hz、

1.2851Hz。塔架有前后和左右振型，频率分别为0.45354Hz和0.45189Hz。其振型如图(3)所示。

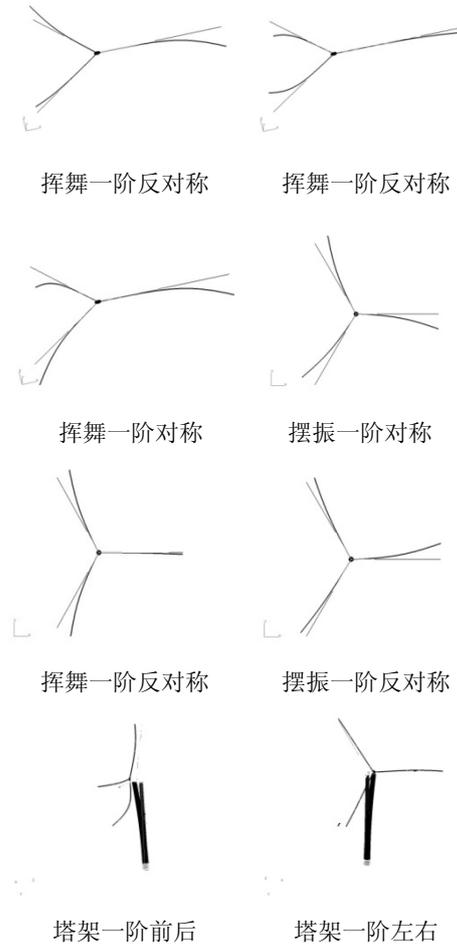


图3 风力机模态振型图

2.2 风力机结构动力学方程

对于离散化的机械系统而言，都可用下式动力学方程来描述公式(9)：

$$[M]\ddot{\{x\}} + [C]\dot{\{x\}} + [K]\{x\} = F_g \quad (9)$$

其中[M]、[C]、[K]、 F_g 分别为广义质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和广义气动力矩阵，这里考虑了气动载荷、重力载荷和惯性载荷。假设变形 x 和速度 \dot{x} 已知，方程可以写成公式(10)：

$$[M]\ddot{\{x\}} = F_g - [C]\dot{\{x\}} - [K]\{x\} = f(x, \dot{x}, t) \quad (10)$$

即可得时刻 $t^n = n \Delta t$ 的加速度公式(11)：

$$\ddot{\{x\}} = [M]^{-1} f(x, \dot{x}, t) \quad (11)$$

采用Runge-Kutta-Nystrom方法^[3]求解

t^{n+1} 的速度和变形，然后使用非定常叶素动量方法求解出新的载荷，这样就可以更新方程的加速度，因而进行新时间步计算。

3 变桨变速优化过程实现

3.1 优化目标与约束条件

在优化过程中，采用多目标的优化方式。在满足约束条件的情况下，使得发电功率PE尽可能大；与此同时，让风力机受到的载荷尽可能小，本文采用风力机的推力Ft作为优化的载荷目标。可描述成下式（12）：

$$\begin{cases} F(a_i) = P_e \\ F_{load}(a_i) = F_T \end{cases} \quad (a_i)_{\min} \leq a_i \leq (a_i)_{\max} \quad (12)$$

其中， a 是表示优化变量，即为风力机桨距角和风轮转速。

风力机受到的各种载荷会产生疲劳损害，为了保证风力机的使用寿命，必须对相关变量进行约束控制，本文针对推力载荷、风轮转矩、风轮转速、桨距角、功率分别进行了约束，可用下式（13）描述：

$$\begin{cases} 80\% \max(F_{load})|_{V=3\sim 24m/s} \geq F|_{V=25\sim 40m/s} \\ T_A|_{V=3\sim 24m/s} \geq T_A|_{V=25\sim 40m/s} \\ \omega_{rated} \geq \omega|_{V=25\sim 40m/s} \geq 0 \\ \beta|_{V=24m/s} \leq \beta|_{V=25\sim 40m/s} \leq 90^\circ \\ P_{rated} \geq P_e|_{V=25\sim 40m/s} \end{cases} \quad (13)$$

3.2 优化过程的实现

在进行变桨变速风力机的功率曲线的优化过程中，主要分两大部分：第一部分是进行优化目标值的计算；第二部分是判断目标值是否满足，并且是否满足约束条件，否则进行NSGA-II的再一次优化，直到得出最优解域。最后，在最优解域中，选择适当优化点，从而可获得风力机在高速下的功率曲线。整个优化过程可描述成流程图如图（4）所示：该功率曲线为风力机在高速下的控制策略设计提供了基础。

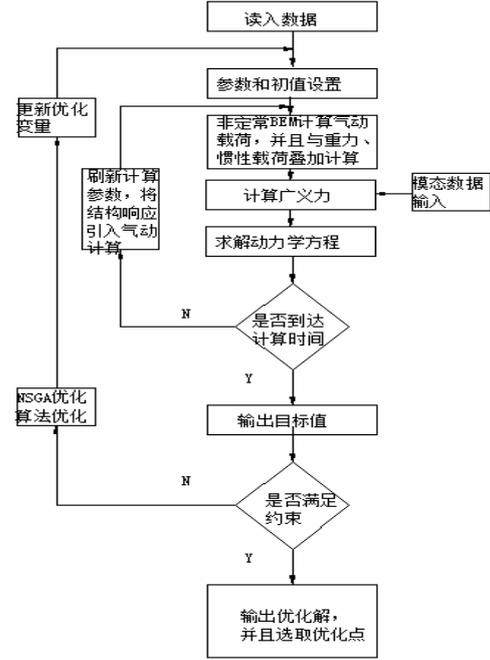


图4 风力机功率曲线优化程序流程图

4 优化结果与分析

本文基于某1.5MW变桨变速风力机为例，该风力机额定转速为17.23r/min，叶片数为3片，风轮直径为83m，切入风速为3m/s，切出风速为25m/s，偏航角为0°。基于ISIGHT软件平台，利用平台内部的NSGA算法进行变桨变速的优化。在25m/s到40m/s强风速区，分别进行了风轮转速不变，桨距角可变化的单变量优化；另外还进行了风轮转速和桨距角同时可控的多变量优化。因此，在强风速区，得出三种不同控制策略：第一种直接断网刹车停机；第二种变桨不变速；第三种变桨变速。并且计算出每种控制策略的理想功率曲线和相关载荷情况。

如图（5）可以看出三种控制策略在不同风速下的功率变化趋势，第一种控制策略直接使风力机在强风速下处于不发电状态；而第二、三种控制策略使风力机利用到更多的风能，并且变桨变速控制策略比第二种得到更多的发电量。因此，为了尽可能利用到风能，可采用第二和第三种控制策略。在强风速区，风力机采用第二、三种控制策略时，桨距角和风轮转速的变化情如图（6）和（7）。可看出两种控制策略的桨距角随着风速在不断提高，但是第三种从29m/s风速后桨距

角变化斜率比第二种快，并且在40m/s风速时，两者相差 34.6° ；从风轮转速图，可看出第二种的转速为额定转速 17.23r/m ，第三种控制策略使得转速呈现逐渐下降的趋势。总之，在强风速区，第三种控制策略更能充分利用风能，且发电量逐渐下降，风轮转速减小，桨距角更接近停机角度 90° 。当处于停机风速时，这些特点使得风力机可以更快更平缓的停机，减弱了对电网的冲击。

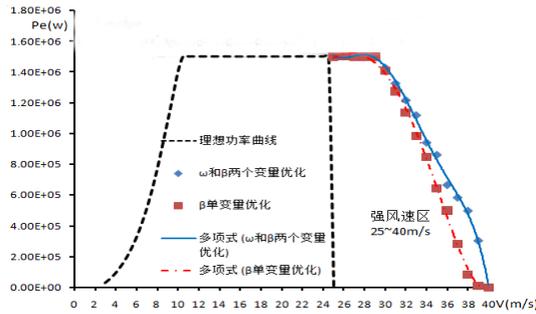


图5 三种不同控制策略的功率曲线图

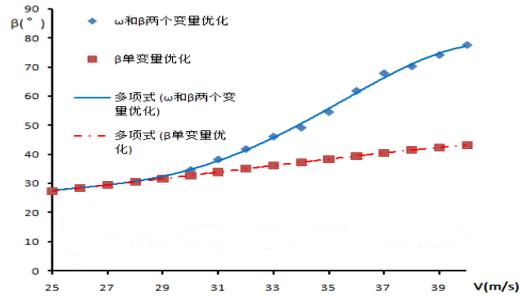


图6 桨距角变化趋势图

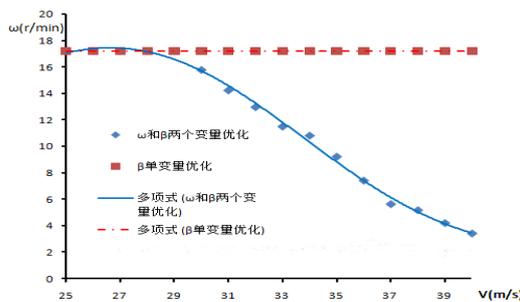


图7 风轮转速变化趋势图

如图(8)和(9)分别为风力机的推力和转矩变化趋势图。推力随着风速的增加，两种控制策略都呈现明显的下降趋势；风轮转矩整体趋势也是减小，而第三种控制策略在 29m/s 到 38m/s 风速期间较大。在充分利用风能的同时，两者的推力和转矩都处于约束范围之内(推力、转矩约束分别设置为 160KN 和 10200Nm)。

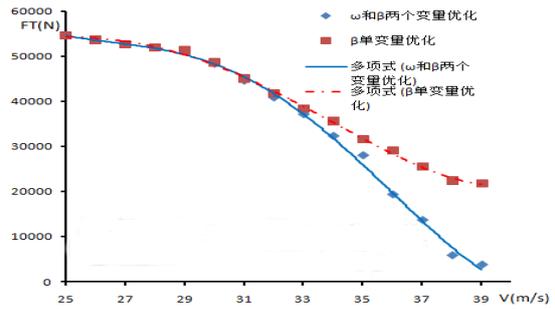


图8 风力机推力变化趋势图

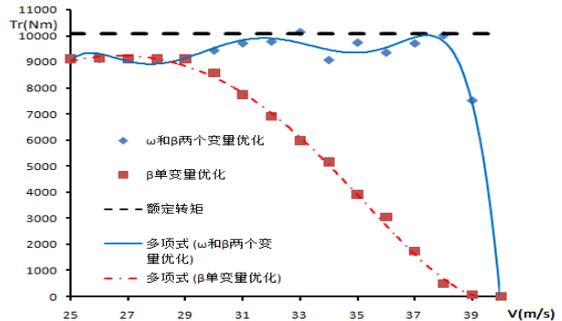


图9 风轮转矩变化趋势图

本文进行了风力机在低风速($V=7\text{m/s}$, $\omega=15.33\text{r/m}$)、额定风速($V=10\text{m/s}$, $\omega=17.23\text{r/m}$)和强风速下($V=30\text{m/s}$, $\omega=15.81\text{r/m}$)的三叶片叶根剪力仿真计算，随时间变化曲线如图(10)、(11)和(12)，分别为 Q_x 挥舞方向、 Q_y 摆振方向、 Q_z 叶片轴向。 Q_x 主要包含气动载荷； Q_y 主要是气动载荷和重力载荷； Q_z 主要是受到惯性载荷和重力载荷的影响。叶根剪力数值大小反应了叶片整体受载荷情况，由于入流角和攻角在运转过程中是周期变化，可见载荷随时间也呈现周期变化，频率与对应工况下的风轮转速相一致。在强风速工况，叶片挥舞方向剪力比其他工况平均载荷减小，但出现了负剪力现象，增加了载荷变化范围；在叶片摆振方向剪力略有增加，但叶片叶根主要载荷是体现在叶片轴向的惯性载荷和重力载荷，很明显叶片轴向方向剪力减小，这是由于转速降低，惯性载荷从而变小，导致整体载荷变小。总之，在强风速区，采用第三种控制策略叶根载荷得到了改善，减弱风力机疲劳损坏，可以提高风力机的使用寿命。

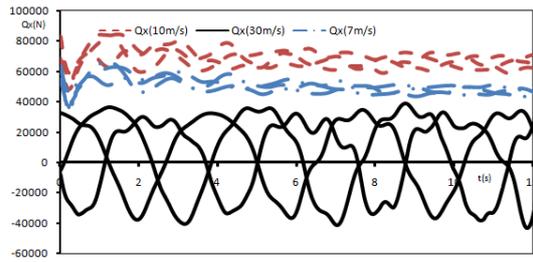


图 10 三个叶片叶根挥舞方向剪力

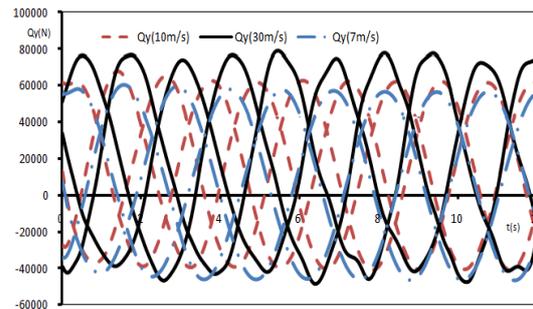


图 11 三个叶片叶根摆振方向剪力

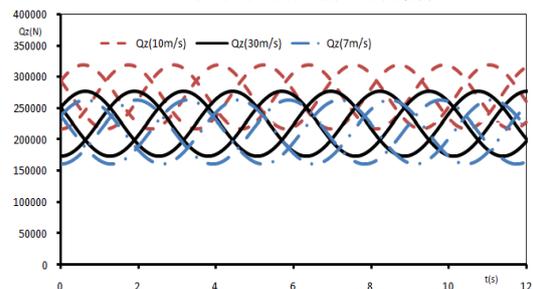


图 12 三个叶片轴向方向剪力

5 总结

本文基于某 1.5MW 风力机为例，考虑风力机的气动和结构双向耦合，首先，运用非定常 BEM 理论计算气动载荷，叠加重力载荷和惯性载荷；然后，建立全机动力学模型，通过数值方法求解动力学方程；最后，基于 ISIGHT 优化平台的 NASG 算法，分别对两种控制策略的桨距角和风轮转速进行优化。得到优化结果后，总结了两种控制策略的桨距角和风轮转速的变化规律，并分析两种控制策略的载荷情况。根据风力机风能利用和受载荷情况，得出了变桨变速控制策略是比较合理的，优化出某 1.5MW 风力机变桨变速的控制规律曲线，计算出该风力机在强风速区的最优功率曲线。为大型柔性风力机控制器设计提供理论基础，而且本文全机模型程序可为控制律设计提供仿真平台，能更好分析闭环风力机系统下，风力机的动态响应和受

载荷情况，反应出控制器是否设计合理。

参考文献

- 1 T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi. Wind Energy Handbook. 2005.
- 2 Wright A D. Modern Control Design for Flexible Wind Turbines[R]. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado. July 2004.
- 3 Martin O.L.Hansen. Aerodynamics of wind turbines, Second edition, Earthscan, 2008.
- 4 Gohard J. Free wake analysis of wind turbine aerodynamics. Wind Energy Conversion. Vol. VIII. U. S. Dept of Energy, C003141-T1/MIT, ASRL TR-184-14. 1978.
- 5 Tongguang Wang, B. Eng., M. Eng. Unsteady Aerodynamic Modelling of Horizontal Axis Wind Turbine Performance. Dissertation submitted to the Faculty of Engineering University of Glasgow for the degree of Doctor of Philosophy. November 1999.
- 6 Schepers JG, Heida J, Thomsen K, et al. Verification of European wind turbine design codes. Proceedings of the European Wind Energy Conference, Copenhagen, 2001; 581 - 586.
- 7 Samson D R. The analysis of shear distribution for multi-cell beams in flexure by means of successive numerical approximations. Journal of the Royal Aeronautical Society, Feb. 1954.
- 8 Zienkiewicz O C, Taylor K L. The Finite Element Method, Fifth Edition. Butterworth Heinemann, 2000.
- 9 Utignani, Luca. Aerodynamic performance analysis of a wind turbine in strong wind condition. Lyngby, Denmark: DTU Mechanical Engineering, March 2010.
- 10 Larsen, Helen Markou and Torben J. Control Strategies for operation of pitch regulated turbines above cut-out wind speeds. DTU, 2009.
- 11 Fernando D. Bianchi, Hernán De Battista and Ricardo J. Mantz. Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design[M]. ISBN 978-7-111-25829-2, 2007.

INVESTIGATION OF CONTROL STRATEGY FOR LARGE-SCALE WIND TURBINES IN STRONG WIND CONDITIONS

Cao Jiufa, Wang Tongguang

(Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract Wind turbines normally operate in the range between the cut-in wind speed of 3m/s and the cut-out wind speed of 25m/s. Once the cut-out wind speed is reached the wind turbine is brutally shut down and disconnected from the grid right away, especially in the case that offshore wind turbines frequently experience strong wind over the cut-out wind speed. This control strategy has an impact to the electrical grid and results in fatigue loads on wind turbine structure. Based on the theoretical power curve of a typical mega-watt wind turbine in this paper, the aerodynamics-structure bothway coupling is included, and flexible wind turbine model is established. The pitch angle and rotor speed for the power curve of rated wind speed in various control strategies are then optimized. Finally, the new theoretical power curve and its corresponding pitch angle and rotor speed regular curves are obtained to meet the requirements of maximum power output and minimum structural load through a multi-objective optimization approach. In this way, the wind turbine not only meets the load requirement and protect the electrical grid, but also can produce the more wind energy.

Keywords large-scale wind turbines; blade element momentum theory; aeroelasticity; control strategy