

变速风力发电机控制策略研究及仿真

邢作霞¹, 郑琼林¹, 刘光德²

(¹北京交通大学电气工程学院, 100044; ²沈阳工业大学风能技术研究所, 110023)

摘要: 本文针对最佳叶尖速比运行的变速风力发电机的结构形式和运行特点, 研究其运行控制策略, 发电机转速功率控制策略等, 并进行仿真和结果分析。

关键词: 变速, 风力发电机、控制策略

The research and simulation of variable speed wind turbine control strategy

Xing Zuoxia¹, Zheng Qionglin¹, Liu Guangde²

(¹Beijing Jiaotong University, 100044, China; ²Shenyang University of Technology, 110023)

Abstract: This paper researched variable speed wind turbine configuration and operation characteristics, modeling operation control and generator control strategy, finally simulation and get results.

Key words: variable speed, wind turbine, control strategy

0、引言

随着风电技术的发展, 恒速运行的机组由于只能在运行的某一点上保持较高的能量捕获效率, 造成机组运行效率低[1], 取而代之的变速机组可以保持最佳叶尖速比运行, 大大提高机组的能量捕获效率, 目前成为发展的主流。

而变速机组中, 双馈式和直驱式无齿轮箱结构为常见结构形式, 变速风力发电机组的控制比失速型机组复杂, 而双馈式变速风电机组比直驱式复杂, 本文主要针对双馈式变速风力发电机组的控制策略进行研究, 包括运行逻辑控制, 功率、转速控制等, 最后基于国产 SUT61-1000 机组的设计进行仿真。

1、控制系统功能概述

一般来说, 所有风机的控制系统统一划分起来, 可以分为 2 个层次, 如图 1 所示, 一个是运行控制系统, 也称为监控管理系统, 位于上层, 另一个为功率和速度控制系统, 位于下层。

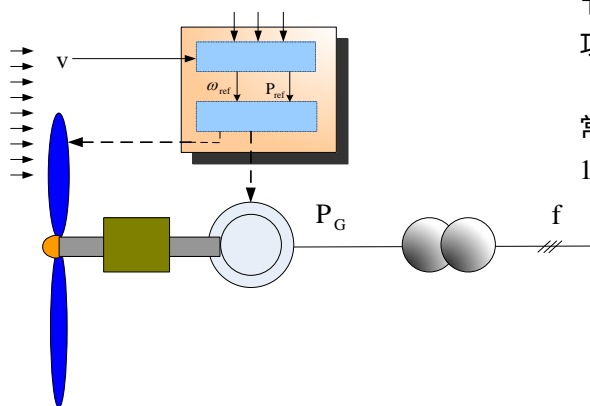


图 1: 风机控制系统划分层次图

风力发电机运行控制系统功能有:

- 根据不同测量数据, 给出功率和速度控制系统的参考值;
- 产生顺序控制信号, 使风力发电机可以从一个状态转入另一个状态;
- 顺序检查风力发电机状态, 执行保护功能。

功率和速度控制可以认为是 2 个独立部分, 第一个功率限制器作用在风轮上, 另一个速度控制器作用在发电机上, 实际是变频器上。

功率限制器控制叶片桨距角, 速度和功率为跟踪调节参数, 它所起到的作用为:

- 捕捉尽可能大的风能;
- 保护风轮、发电机、大功率电力电子器件, 避免大风时超载;
- 在脱网时保护风机机械部分, 避免机械冲击。

速度控制器控制转矩, 功率、电流为调节参数, 起到的主要作用是平滑风力发电机功率输出, 增加阻尼, 减小电磁振荡。

现代风机中为了提高风能捕获效率, 较常见有两个基本控制策略为:

- 1) 恒定尖速比控制策略, 控制风机最佳尖速比运行, 获得最大能量吸收效率, 风机的功率特性曲线 $c_p(\lambda, \theta)$ 存储在控制器的内存中, 不断测量风速和风轮转速, 计算出实际尖速比, 并与最佳尖速比参考值 λ_{opt} 比较, 得到的误差信号反

馈到控制器中，从而使控制器调节转速，最小化误差信号。这种策略的缺点是由于上风向机组风速传感器在风轮后面，测量不准确，此外， $c_p(\lambda, \theta)$ 特性曲线随叶片翼面的改变而改变，也不准确。

- 2) 最大功率点跟踪控制策略，这种控制策略基于功率与速度的变化率来控制，即跟踪峰值 $dP/d\omega = 0$ ，在机组运行时，风轮转速有微小的增加或减少时，测量功率变化，并观测 $dP/d\omega$ 的变化，如果 $dP/d\omega > 0$ ，调节风轮转速增加，如果 $dP/d\omega < 0$ ，调节风轮转速减小，最终 $dP/d\omega \approx 0$ ，叶轮转速不再改变，达到最大功率捕获点。这种控制策略对风速和叶片特性的改变不敏感。

上面的控制策略都只适用于机组部分负载情况下，即切入风速和额定风速之间的这段区域，在额定风速和切出风速之间的区域称为全负载运行区，并不适用此策略。

1.1 速度控制器策略

控制策略根据不同风机类型而不同，采用恒定尖速比运行的风机，机组运行工况可以定义为以下几个运行区域，在不同区域给定不同的速度参考值²：

■ 部分负载

- 1) 风速 v 大于切入风速，但小于 v_1 ，

$$v < v_1 = \frac{\omega_{\min} R}{\lambda_{\text{opt}}}$$

其中， ω_{\min} 为风轮转速最小值。控制器控制

风轮转速等于转速最小值： $\omega_{\text{ref}} = \omega_{\min}$

- 2) 风速满足下列条件时

$$v_1 \leq v < v_2 = \frac{\omega_{\max} R}{\lambda_{\text{opt}}}$$

其中， ω_{\max} 为风轮转速最大值，一般来说，等于额定值 ω_n 。控制器按照最佳尖速比控

制策略，控制风轮转速为： $\omega_{\text{ref}} = \frac{v \lambda_{\text{opt}}}{R}$

- 3) 风速大于 v_2 ，发电机控制器保持最大风轮转速输出： $\omega_{\text{ref}} = \omega_{\max}$

- 全负载状态，发电机控制器保持风轮转速恒定，给定值为额定风轮转速。

1.2 功率限制器策略

功率限制器的控制策略为：

- 部分负载下，叶片桨距角可以保持恒定，如为 0 或等于一个负的很小值。
- 全负载下，调整叶片桨距角，保持风机转速 ω 和功率在额定值下。

2、风机运行控制策略

风机运行控制的目标是保证风机不同运行状态下的自动运行，并自动执行保护功能。风机可以运行在不同状态，如图 2 所示，有些状态是稳定运行区，有些是过渡区，详细划分如下³：

■ 出厂调试（过渡区）

这种状态下，主要进行结构、信号状态、部件响应的测试并记录，如果出现误差将导致测试中断。

■ 静止状态（稳定区）

风轮静止，刹车激活，叶片在全翼展位置，发电机脱网。

■ 启动状态（过渡区）

风驱动风轮旋转，发电机没有并网，风轮转速通过改变桨距角进行控制，当转速达到最小设置点时，转入等待状态。

■ 等待状态（稳定区）

风机准备并网，转速通过桨距角的调节进行控制，检测是否满足并网条件，然后转到并网过程。

■ 并网过程（过渡区）

转速达到并网转速时，执行并网前的同步化过程，设置最小参考功率给定，并执行保护功能。

■ 部分负载运行（稳定区）

对于变速风机来说，叶片桨距角调整到最佳值，一般保持恒定，优化发电机功率和转速的关系，根据功率速度优化曲线调节功率给定值。

- 全负载运行（稳定区）
设置功率的额定值为参考值。
- 关机（过渡区）
无故障发生时，由并网过程、部分负载运行或全负载运行转到等待状态，控制信号送到发电机控制器，发电机功率和电流减小为 0，风机脱网。当故障发生时，执行故障脱网程序。
- 停机（过渡区）
风机从任何一种状态转为静止状态。
- 故障和急停脱网（过渡区）
由于故障，停止风机运行，不可能自动恢复。

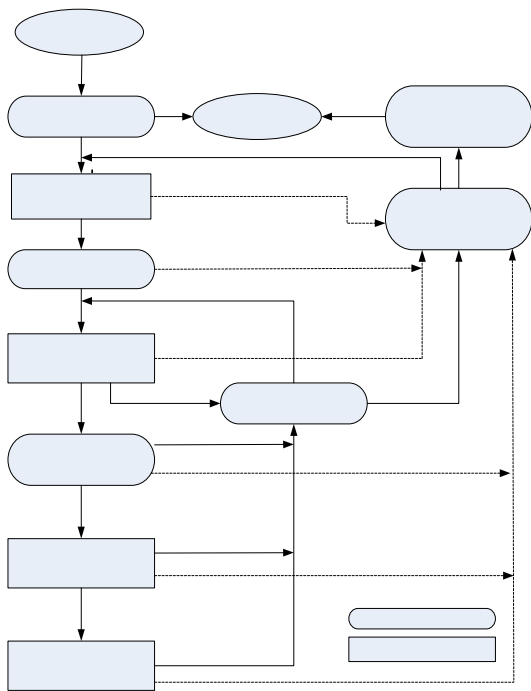


图 2：风机运行状态划分

在每个状态工况下，都有详细的流程，例如并网运行逻辑控制如图 3 所示，首先检测外部运行条件是否满足，然后进行判断、计算，最后完成同步过程而并网，中间要随时判断故障的发生。

3、双馈异步发电机控制

双馈异步发电机通过一个转子侧连接的四象限变流器与电网耦合，使机组可以运行在亚同步速和超同步速状态，机组在超同步速运行时，功率流可以从转子侧馈入电网，机组运行在亚同步速时，功率流从电网侧或定子侧供给转子，通过控制转子侧电流的幅值和相位，可以改变机组运行效率和传输给

电网的有功、无功功率。

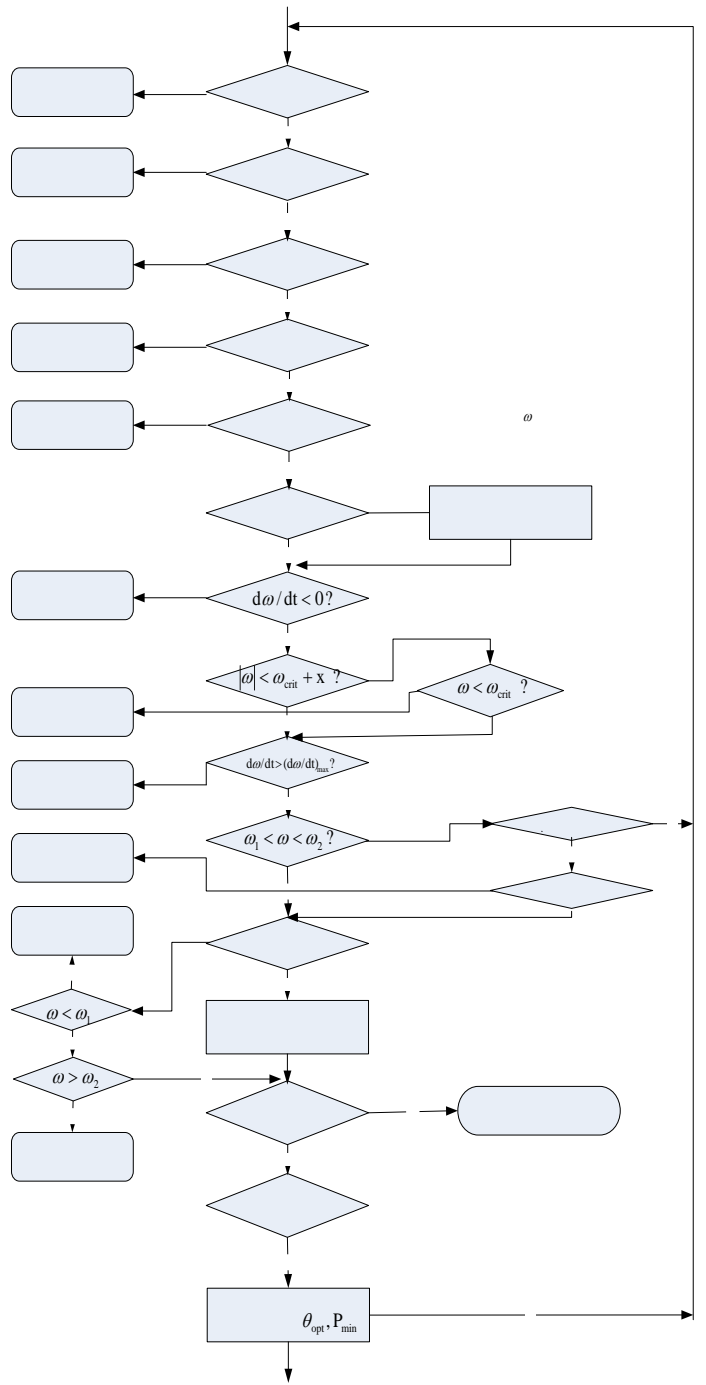


图 3：并网运行逻辑控制

采用双馈风力发电系统的优点有故障和急停脱网

- 允许机组变速运行，提高风能捕获效率；
- 存储发电机转子的旋转动能，当风速减小时再释放出来，平滑功率传输；
- 可以达到转速的快速调整，吸收瞬变阵风，允许变桨距调节有一定的

停机

等待

- 时滞，减小叶片和转轴的应力、超载；
- 不需要电容器，可以实现无功功率控制；
- 噪声低；
- 减小齿轮箱、叶片、塔架的磨损；
- 对电网振荡和谐波有阻尼作用。

双馈风力发电系统的控制比较复杂，控制框图如图 4 所示，由网侧频率控制器和电机侧控制器组成。网侧控制器主要调节中间电路参数，如电压和直流母线电流。电机侧控制器主要实现有功功率、无功功率的控制，通过旋转坐标系的解耦，调节转子电流 d 轴分量控制有功功率输出，调节转子电流 q 轴分量控制无功功率输出。假设 $v_{ds} = v_s$

的情况下，功率的表达式如下⁴：

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_s i_{dR}$$

$$Q_s = -\frac{3}{2} \left(\frac{v_s^2}{\omega L_s} + \frac{L_m}{L_s} v_s i_{qR} \right)$$

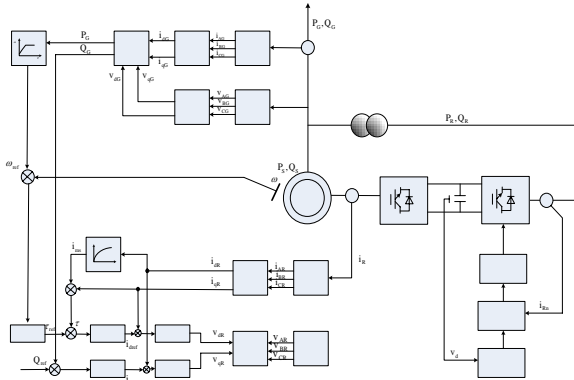


图 4：双馈风力发电机组控制系统

图中，AD—模数转换器，CT—坐标变换，SR—速度调节器，TR—转矩调节器，QR—无功功率调节器，IdR—转子 d 轴电流调节器，IqR—转子 q 轴电流调节器，GCR—电网电流调节器，ICVR—中间电路电压调节器，PWM—脉宽调制。

4、仿真及分析

针对变速机组结构，采用 SUT61-1000 的设计数据，部分仿真参数如下：

系统设计数据：		发电机数据：	
平均风速	12m/s	额定功率	1000kW

桨距角	0 度	额定电压	690VAC
风轮转速	21rpm	频率	60Hz
风轮直径	61m	额定电流	836.7A

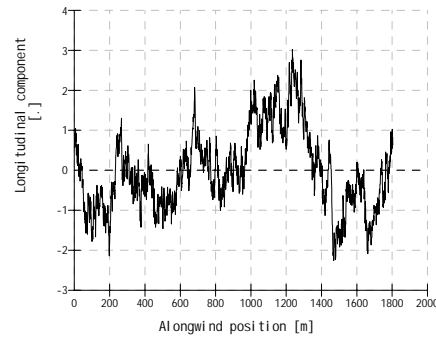


图 5：轮毂处风速变化情况

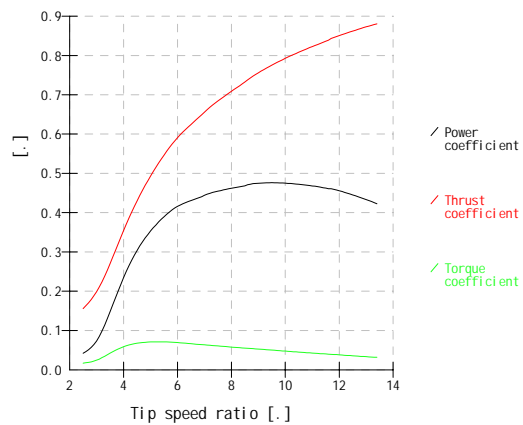


图 6：风轮功率系数、推力系数、转矩系数变化

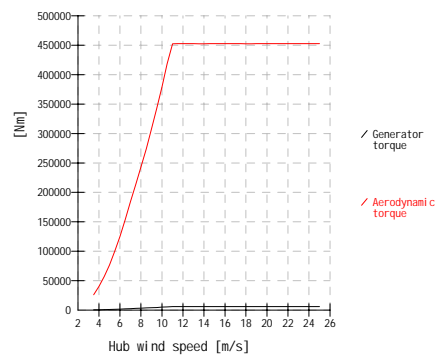


图 7：发电机转矩和气动转矩比较

[4]. Z.lubosny, Wind Turbine Operation in Electric Power Systems Advanced Modeling[M], Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003, printed in Germany. P92-96

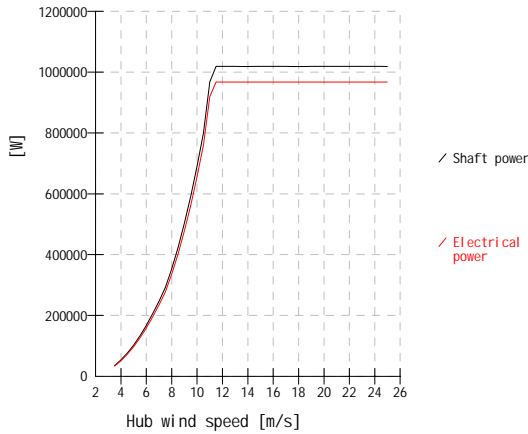


图 8：机械轴功率和电功率比较

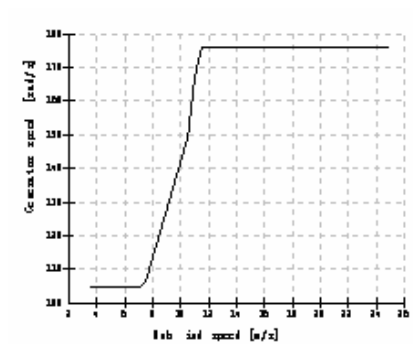


图 9：发电机转速随风速变化

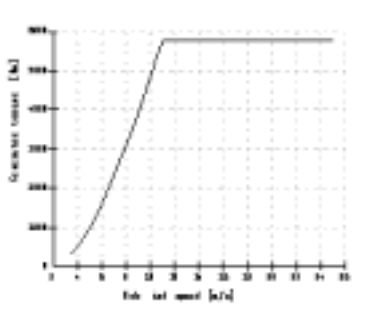


图 10：发电机转矩随风速变化

5、结论

本文建模了变速风力发电机的控制策略，并进行仿真验证，验证了变速风机的功率速度控制作用。

[参考文献]

[1]. F.Blaabjerg,Z.Chen,S.B.Kjaer. , Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. IEEE Trans. Power Electron.,2004,19 (5):1184-1194
 [2]. Harri Vihriala, control of variable speed wind turbines[D], Doctoral thesis, 2002.10
 [3]. Ekanayake, J.B.; Holdsworth, L.; XueGuang Wu; Jenkins, N.; Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines,Power Systems, IEEE Transactions on Volume 18, Issue 2, May 2003 Page(s):803 - 809

联系方式：

联系人：

传真：

通信地址：

邢作霞

024-25692668

沈阳工业大学南院 88 信箱

联系电话： 024-25691657

E-mail： xingzuox1976@163.com

邮政编码： 110023