

基于估计的风力机最大功率跟踪控制

崔双喜¹, 王维庆¹, 周顺平²

(1. 新疆大学 电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 乌鲁木齐石化分公司炼油厂, 乌鲁木齐 830019)

摘要: 在额定风速以下, 变速恒频风力发电机组应采用可靠控制策略, 保证最大风功率跟踪; 在不估计风速的情况下, 提出一种风力机最大功率跟踪方法; 首先, 利用状态观测器和非线性扩展卡尔曼滤波, 估计风力机最佳转速, 采用 PI 控制器给出风力机转矩估值; 其次, 以风力机转矩、转速估值为输入, 采用风力机转矩前馈控制, 在计算风力机最优转速后, 给出发电机转矩控制量, 从而实现低风速时的最大功率跟踪; 在 Matlab/Simulink 软件上搭建了仿真平台, 仿真验证了估计的有效性和控制的正确性。

关键词: 最大功率跟踪, 状态观测器, 扩展卡尔曼滤波, PI 控制器, 转矩前馈控制,

Maximum Wind Power Tracking Based on Estimation

Cui Shuangxi¹, Wang Weiqing¹, Zhou Shunping²

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Urumqi Petrochemical Branch Refinery, China Petroleum Natural Gas Co. Ltd., Urumqi 830019, China)

Abstract: Below the rated wind speed, variable speed constant frequency wind turbine should be reliably controlled to ensure the maximum wind power tracking. Without estimating the wind, this paper put forward a kind of wind turbine maximum power tracking method, firstly, by using the extended Calman filter to estimate wind turbine speed, a PI controller is used, wind turbine torque estimation is given, secondly, torque feed forward controller which wind turbine torque and speed estimation are the input is used to control the generator torque, to achieve maximum power tracking of low wind speed. Simulation platform is built in Matlab/Simulink software, the simulation verifies the effective of estimation and the correctness of control.

Key words: maximum power point tracking; state observer; extended calman filter; PI controller; torque feed forward control

0 引言

额定风速以下是风力发电机组运行可以不受功率限制的风速范围, 在这一运行区域, 风力发电机组控制系统的主要任务是, 通过对转速的控制来获得最大风能^[1-5]。对转速的控制通常是通过发电机转矩直接或间接控制实现的^[6]。通过最佳叶尖速比, 利用实测风速, 采用变速恒频技术, 根据风速相应控制转子转速, 使发电机工作在最佳功率状态, 这就要求测量的风速与作用在桨叶上的风速有良好的关联性, 但是风速必须在到达桨叶之前就测出, 由于风速仪测量的仅是某固定点的风速, 在风剪切等影响下, 风速在整个桨叶扫掠面积上是不一致的, 所以得到要求的风速测量值非常困难。对于非线性强耦合的风力发电机组, 本文采用状态观测器和非线性扩展卡尔曼滤波, 估计转子最佳转速, 通过转速估计误差, 由 PI 控制器估计风力机气动转矩, 采用转矩前馈控制给出发电机转矩的最佳控制量, 实现风力机的最大功率跟踪。这种方法的优点是, 不需要估计有效风速, 即可得到风力机转子最佳转速和发电机转矩最佳控制量。

1 风力机数学模型

由空气动力学可知, 风力机输出的功率可表示为

$$P_w = 0.5\rho\pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \theta) \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度; R 为风轮半径; V 为风轮上游风速; θ 为桨

距角; λ 为叶尖速比; $C_p(\lambda, \theta)$ 为风能利用系数, 与叶尖速比 λ 和桨叶桨距角 θ 成非线性的关系。风力机叶尖速比 λ 为

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V} \quad (2)$$

式中, ω_r 为风力机风轮转速 (rad/s);

风力机产生的气动转矩为

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_r} = \frac{0.5\rho\pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \theta)}{\omega_r} \quad (3)$$

风机机组风轮侧的动态方程可写为

$$J_t \frac{d\omega_r}{dt} = T_w - T_g - K_t \omega_r \quad (4)$$

式中, $J_t = J_r + n_g^2 J_g$, $K_t = K_r + n_g^2 K_g$, $T_g = n_g T_{em}$, J_r 为风轮转动惯量, J_g 为发电机转动惯量, K_r 为风轮阻尼系数, K_g 为发电机阻尼系数, T_g 为归算至风轮侧的发电机转矩 (以下简称发电机转矩), T_{em} 为发电机电磁转矩, n_g 为齿轮传动增速比, J_t 为风力机总转动惯量, K_t 为风力机总阻尼系数。

式 (4) 可写为以 ω_r 为状态变量的状态方程的形式, 如

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_t} T_w - \frac{1}{J_t} T_g - \frac{K_t}{J_t} \omega_r \quad (5)$$

2 控制目标与策略

在风速低于额定风速时, 应使风力机输出功率最大化。风能利用系数 $C_p(\lambda, \theta)$ 是叶尖速比和桨距角的函数, 在桨距调节的风轮中, 通过使用变速, 就能使风力机运行在最优点 C_{popt} , 此时桨距角为 θ_{opt} , 叶尖速比为 λ_{opt} , 即

$$C_p(\lambda_{opt}, \theta_{opt}) = C_{popt} \quad (6)$$

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{ropt} R}{V} \quad (7)$$

收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2014-02-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51267017)。

作者简介: 崔双喜 (1970-), 男, 甘肃武威人, 博士研究生, 主要从事风力发电系统建模、控制及仿真方向的研究。

由式 (6) ~ (7) 可知, 在低风速时, 风力机若要获得最大功率, 只要将桨距角固定在最优值, 保持叶尖速比 λ 为最优值 λ_{opt} , 则在风速变化时, 转速 ω_r 必须跟踪最优转速 ω_{ropt} 才能实现。低风速时, 控制器控制目标应是风力机转速 ω_r 跟踪最优转速 ω_{ropt} 。

通常, 风力发电机组是通过背靠背的两个变频器连接到电网上的, 对最优转速的跟踪, 是通过控制发电机电磁转矩 T_{em} 的控制实现的, 传统的方法是, 通过控制转子侧变频器的触发角来实现控制 T_{em} , 由 $T_g = n_g T_{em}$ 可知, 控制了 T_g , 就相当于控制了 T_{em} , 本文是采用通过控制 T_g , 来间接控制 T_{em} 的。

3 最大功率跟踪控制实现

3.1 最优转速 ω_{ropt} 下的发电机转矩 T_g 控制量

假设风力机气动转矩 T_w 的估值 \hat{T}_w 和转速 ω_r 估值 $\hat{\omega}_r$ 已知, 在最优叶尖速比 λ_{opt} 和桨距角 θ_{opt} 下, 由式 (3) 及式 (6) ~ (7) 可得最优转速 ω_{ropt} 为

$$\omega_{ropt} = \sqrt{\frac{\hat{T}_w}{K_{opt}}} \quad (8)$$

式中, $K_{opt} = 0.5\rho\pi R^5 C_{popt}/\lambda_{opt}^3$ 。

风力机转速估值 $\hat{\omega}_r$ 跟踪最优转速 ω_{ropt} 时, 风力机输出最大功率, 此时, 发电机转矩控制量由式 (4) 可写为

$$T_g = K_c(\omega_{ropt} - \hat{\omega}_r) + \hat{T}_w - K_i \hat{\omega}_r \quad (9)$$

式中, K_c 为比例系数。

式 (8) ~ (9) 用于实现气动转矩前馈控制, 给出发电机转矩最优控制量, 如图 1 所示。

3.2 风力机转速和气动转矩的估计

若已知气动转矩估值 \hat{T}_w 和风力机转速估值 $\hat{\omega}_r$, 发电机转矩控制量由式 (9) 得到。若将发电机转矩和气动转矩估值作为控制输入, 状态方程式 (5) 的重构状态观测器方程如式 (10) ~ (11)^[7], 风力机转速可由扩展卡尔曼滤波估计得到^[8-9]。

$$\frac{d\hat{\omega}_r}{dt} = \hat{A}\hat{\omega}_r + \hat{B}_1 T_g + \hat{B}_2 \hat{T}_w + K(\omega_r - \hat{\omega}_r) \quad (10)$$

$$\hat{y} = \hat{C}\hat{\omega}_r \quad (11)$$

式中, K 为卡尔曼增益, \hat{A} 状态变换矩阵, \hat{B}_1 和 \hat{B}_2 为输入控制矩阵, \hat{C} 为观测矩阵, 本文取为 1, $\hat{\omega}_r$ 为重构状态变量, 即转速的估值。

扩展卡尔曼滤波估计步骤:

- (1) 初始化状态变量 $x_p(0) = x_{init}$;
- (2) 由预测状态估计, 计算预测值 $y_p(k) = g[x_p(k)]$;
- (3) 计算观测值与预测值的估计误差 $e(k) = y(k) - y_p(k)$;

(4) 计算修正后的状态 $x_c(k) = x_p(k) + Ke(k)$, 其中 K 为卡尔曼增益;

$$\begin{aligned} K(k) &= P_p(k)C^T[CP_p(k)C^T + R]^{-1} \\ P_c(k) &= [I - K(k)C]P_p(k) \\ P_p(k+1) &= AP_c(k)A^T + QQG^T \end{aligned} \quad (12)$$

式中, G 为过程噪声协方差矩阵, Q 为过程噪声的自协方差矩阵, R 为观测噪声的自协方差矩阵, $P_p(k)$ 为当前时刻预测误差的协方差矩阵, $P_c(k)$ 为当前时刻估计误差的协方差矩阵。

(5) 用修正状态计算下一时刻的预测状态 $x_p(k+1) = f[x_c(k), u(k)]$;

在估计时, 假设初始状态及过程和观测噪声都是零均值的高斯噪声。

气动转矩估值 \hat{T}_w 可通过转速估值误差, 由 PI 控制器的输出得到, 如图 1 所示。

3.3 最大功率跟踪控制系统图

由以上分析, 设计的最大功率跟踪控制系统图如图 1 所示。扩展卡尔曼滤波估计风力机转速, 对转速估值偏差, 利用 PI 控制器估计气动转矩, 然后计算最优转速, 采用气动转矩前馈控制, 给出发电机转矩 T_g 最优控制量, 把额定风速以下, 对风力机转速的控制问题, 转化为对发电机转矩 T_g 的控制, 实现基于估计的风力机最大功率跟踪。

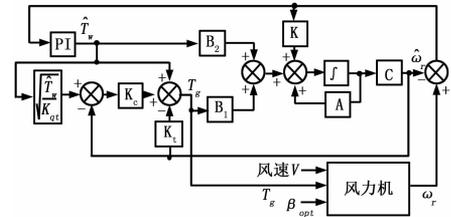


图 1 最大功率跟踪系统图

4 仿真研究

利用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建系统仿真平台, 仿真模拟风速如图 2 所示, 风速平均值为 7 m/s。

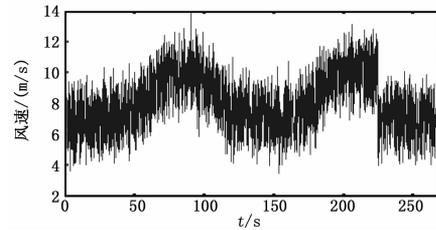


图 2 仿真模拟风速

风力机转速实测值和估计值仿真曲线如图 3 所示。控制曲线表明, 风力机估计转速能够很好地跟随测量转速。

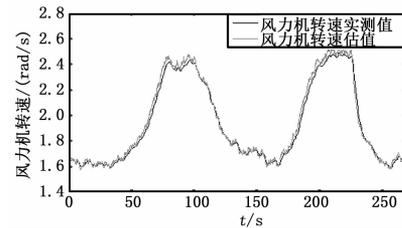


图 3 测量和估计转速

风力机气动转矩实测值和估计值仿真曲线如图 4 所示。从仿真曲线可看出, 估计的气动转矩与实测转矩能够较好的吻合。

从以上仿真曲线中, 可以看出, 无论风速怎样变化, 被估计的转速和气动转矩, 都在跟随风速的变化而变化, 以实现低风速时风功率的最大捕获。

风力机最大功率跟踪曲线如图 5 所示, 由仿真曲线可看出, 风速变化时, 功率跟随风速变化, 在控制风力机实现转速最优下, 获得最大功率。

(下转第 1421 页)

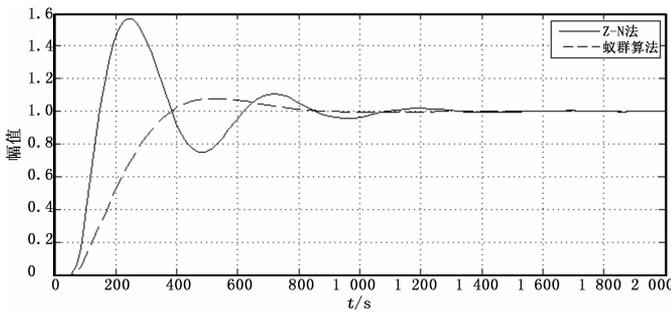


图 4 优化前后系统阶跃响应曲线

表 1 两种控制方法的 PID 参数及性能指标

PID 控制方法	K_p	T_i	T_d	σ (%)	t_s
Z-N 法	20.000	23.643	0.025 7	59	800
蚁群算法	10.231	35.753	0.179 2	9	1 300

5 结束语

理论分析和实际仿真研究表明, 本文提出的将蚁群算法和不完全微分 PID 控制器有机结合起来, 优化 PID 参数的策略, 与常规 PID 控制相比, 有更好的鲁棒性, 有效地减少了磨机给矿的波动, 对于解决复杂的磨矿过程给矿控制具有良好的实用性。

参考文献:

[1] 王泽红, 陈炳辰. 球磨机负荷检测的现状与发展趋势 [J]. 中国粉体技术, 2001, 7 (1): 19-23.

[2] 周平, 柴天佑. 磨矿过程磨机负荷的智能检测与控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25 (6): 1095-1098.
 [3] 周克良, 张建荣. 模糊-PID 串级控制在磨机给矿控制系统中的应用 [J]. 煤矿机械, 2008, 29 (2): 162-164.
 [4] 劳春萍, 杨承志. 模糊智能控制在磨矿分级给矿系统中的应用 [J]. 自动化仪表, 2011, 32 (10): 60-65.
 [5] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
 [6] 赵云涛, 王京, 宋勇, 等. 蚁群算法在中厚板液压伺服系统中的应用研究 [J]. 机床与液压, 2008, 36 (8): 266-269.
 [7] 尹宏鹏, 柴毅. 基于蚁群算法的 PID 控制参数优化 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43 (17): 4-7.
 [8] 陈书谦, 张丽虹. 蚁群算法在 PID 控制器参数优化中的应用 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (1): 238-241.
 [9] 浦铁成, 白晶, 浦欣. 蚁群算法 PID 控制器在磁轴承控制系统中的应用 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2007, 8 (6): 562-565.
 [10] 肖仲平, 王莹, 周金峰, 等. 基于蚁群算法的真空烧结炉最优 PID 温控系统 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (2): 159-161.
 [11] 杜中杰, 陈鸿, 闫晓军. 基于蚁群算法的矿井提升机变频调速系统 [J]. 煤矿机械, 2010, 31 (11): 91-96.
 [12] 段海滨, 王道波, 黄向华, 等. 基于蚁群算法的 PID 参数优化 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2004, 37 (5): 97-100.
 [13] 许贺群. 基于改进蚁群算法的 PID 参数优化 [J]. 制造业自动化, 2011, 33 (4): 1-4.

(上接第 1411 页)

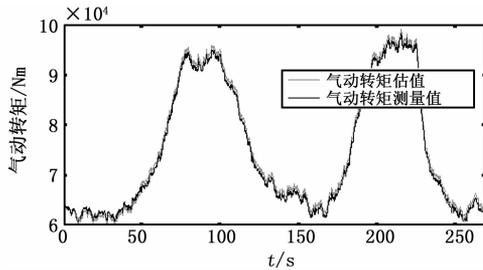


图 4 测量和估计气动转矩

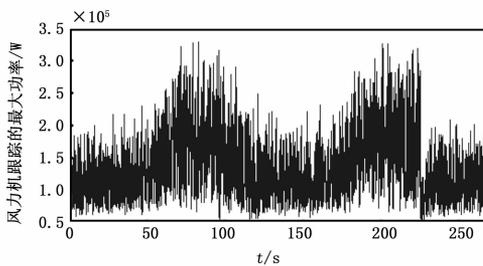


图 5 最大功率跟踪曲线

5 结语

在额定风速以下, 风力机控制的目标是最大风能捕获, 而传统的控制方法需要准确估计风速。由于风剪切等因素影响, 对大型风力机是不现实的。本文在不估计风速的条件下, 对风

力机转速的控制问题, 转化为对发电机转矩的间接控制问题。利用最优叶尖速比和风力机最优风能利用系数, 通过对风力机气动转矩的估计, 给出风力机获得最大功率时的最优转速。采用风力机气动转矩前馈控制, 得到发电机转矩最佳控制量。以估计的气动转矩和发电机最优转矩为输入, 引入状态观测器并采用扩展卡尔曼滤波估计转速, 最终实现风力机最大功率跟踪。最大功率跟踪控制的好坏, 决定于对气动转矩和转速估计的准确性, 仿真结果验证了估计的有效性和控制的可行性。

参考文献:

[1] 张文苑, 郑恩让, 朱玉国, 等. 兆瓦级同步风力发电机变桨距控制策略研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2203-2204.
 [2] 王焱, 韩玉玲, 乔德浩. 无传感器双馈异步风力发电机直接转矩控制 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (4): 845-847.
 [3] 马祎炜, 俞俊杰, 吴国祥, 等. 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.
 [4] 匡洪海, 吴政球, 李圣清. 基于同步扰动随机逼近算法的最大风能追踪控制 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (24): 34-38.
 [5] 何玉林, 任海军, 金鑫, 等. 基于间接转矩控制的风电机组功率测控平台 [J]. 太阳能学报, 2011, 32 (2): 198-203.
 [6] 杨金明, 吴捷, 杨俊华. 基于自抗扰控制器的风力发电系统的最大风能捕获控制 [J]. 太阳能学报, 2004, 25 (4): 525-529.
 [7] 李理敏, 龚文斌, 刘会杰, 等. 基于自适应扩展卡尔曼滤波的载波跟踪算法 [J]. 航空学报, 2012, 33 (7): 1319-1328.
 [8] 仲卫进, 艾芊. 扩展卡尔曼滤波在动态负荷参数辨识中应用 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (2): 47-50.