

# 基于牛顿-拉夫逊法的风速观测器设计

刘乾<sup>1</sup>, 徐洋超<sup>2</sup>, 李赞<sup>3</sup>

(1. 南京磐能电力科技股份有限公司, 江苏 南京 210032;

2. 国网浙江省电力公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000;

3. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 风速是风力发电机的一个重要参量, 准确获取风机运行过程中实时的风速信息对风机的控制十分重要。文中基于牛顿-拉夫逊方法, 设计并实现了一种风速观测器。该观测器根据风轮机运行中实时的运行状态数据, 迭代估计出叶尖速比的近似值, 再由它与风速的对应关系计算出实时的估计风速, 达到风速观测的目的。最后, 将该风速观测器分别在 Matlab 和风力机模拟器中进行仿真和实验验证, 结果表明, 所设计的风速观测器具有良好的风速估计性能, 符合预期目标。

**关键词:** 牛顿-拉夫逊算法; 风速观测; 变速风电机组; 叶尖速比; 风力机模拟器

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)05-0071-05

## 0 引言

风能具有很强的波动性和不确定性, 这一特性要求风力机 (wind turbine, WT) 在适应不断变化的风况的同时还能高效运行<sup>[1-4]</sup>。变速风力机小于额定功率运行时, 风力机控制器的主要控制目的是使风力机尽可能多地利用风能, 通常采用最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 控制策略, 在风速发生改变时跟踪风速, 最终实现发电效率最高的目的。在一些 MPPT 控制策略中, 准确的实时风速对 MPPT 算法的可靠性与有效性有很大影响, 因此有效地估计风速变得尤为重要。

目前获取实时风速信息主要是通过风速计或风速观测方法。风经过风轮时产生的尾流会对安装在机舱上的风速计的测风效果产生影响, 这一不可避免的噪声导致了风速计所测轮毂处的风速是不准确的<sup>[5,6]</sup>。在风机轮毂正前方等高处安装风速计虽能减小尾流对风速测量的影响, 但增加了实现难度和应用成本。因此, 通常采用在线估计的风速观测方法。

当前主流的观测估计风速的方法主要分为以下几类。一是假定电力生产和有效风速之间存在一个静态关系<sup>[7,8]</sup>, 采用稳态关系方程的方法来估计风速。这个假设比较粗略, 忽略了转子加速所储存的能量。二是采用简单的传动系统模型加以估计。该模型假定传动系统是完全刚性的, 风速估计结果对于转速测量噪声比较敏感<sup>[9-11]</sup>。三是基于观测器的估计方法, 结合传动系统的线性模型和非线

性气动模型, 使用非线性算法或者通过在线线性化 (如卡尔曼滤波) 来直接估计风速, 但增加了算法的复杂性<sup>[10-12]</sup>。

文中在风力机的气动模型和传动链模型的基础上, 通过非线性代数方程的牛顿-拉夫逊求解方法设计并实现了一种风速观测器, 并将设计的风速观测器分别在 Matlab 及风力机模拟器中进行了仿真和实验校验。结果表明该风速观测器能够较为准确地估计出实时风速。

## 1 相关风机控制概述

### 1.1 风机气动模型

假设风轮为一个平面, 同时该平面上每个点的风速大小相等且垂直于平面, 经过风轮的瞬时风能可以表示为:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风轮半径;  $v$  为风速。

用风能利用系数  $C_p$  来表示风能的捕获效率, 因而可以把风力机捕获的风功率和风轮对传动链作用的气动转矩<sup>[13]</sup>表示如下:

$$\begin{cases} P_a = 0.5 \rho \pi R^2 v^3 C_p \\ T_a = \frac{P_a}{\omega} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P_a$  为气动功率;  $T_a$  为气动转矩;  $\omega$  为风轮角速度。研究表明,  $C_p$  的数值受到叶尖速比  $\lambda$  和桨距角  $\beta$  的影响。其中, 叶尖速比  $\lambda$  定义为:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (3)$$

$C_p$  与  $\lambda$  和  $\beta$  之间的关系只能通过工程测试获得的经验公式或者  $C_p-\lambda-\beta$  曲面数组,  $C_p$  的特性曲线如图 1 所示。对于不同的风力发电机, 其  $C_p-\lambda-\beta$  关系特性亦不同。因此,  $C_p$  曲线模型的模型简单, 但对于  $C_p-\lambda-\beta$  经验公式或曲面数组未知的风机无法建模。

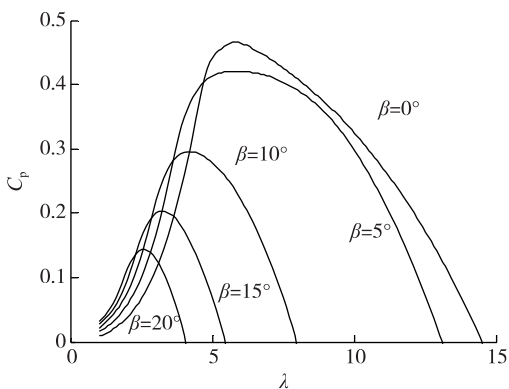


图 1  $C_p-\lambda-\beta$  特性曲线

Fig.1 Characteristic curve of  $C_p-\lambda-\beta$

## 1.2 风机控制策略

变化的风速改变了叶片攻角, 造成  $\lambda$  发生改变, 捕获的风功率和传输的机械功率也不断变化, 从而影响了风电系统的能量转化效率。由图 1 可知, 在桨距角一定的条件下, 风能利用系数在某一叶尖速比下取得最大值, 因此为保证风力机高效稳定运行, 控制系统必需能够根据实时风速对风力机进行 MPPT 控制。

叶尖速比法是当前风力机 MPPT 控制中一个常见的方法。最优叶尖速比法<sup>[14-16]</sup>通过控制风机转速, 使  $\lambda$  达到最优叶尖速比 ( $\lambda_{opt}$ ), 如图 1 所示, 从而让风力机在不同风速下都能以最大的  $C_p$  运行。风力机运行时的  $\lambda$  是根据公式(1—3)通过实时风速和风力机转速计算而得到的。控制器根据参考值与实际值的偏差来调节电磁转矩从而改变风机的转速, 实现风机以  $\lambda_{opt}$  运行, 达到最佳运行状态。最优叶尖速比法控制目标明确, 原理简单, 动态性能更好, 但其缺点在于需要获得实时风速信息来参与计算。

## 1.3 风速估计的意义

叶尖速比法实现过程中需要实时风速数据。通常实时风速可以通过风速计来测量, 但准确测量的难度较大, 不能完全反应作用在风机叶片上的风速, 并且风速计的惯性造成测量误差和延迟, 同时风速测量装置也会增加成本。基于上述原因, 在风机应用叶尖速比法时, 通常可以采用风速估计的方法获得较准确的风力机轮毂处的有效风速。

## 2 基于牛顿-拉夫逊法的风速观测的原理

为了得到有效风速, 可以将风力机作为风速仪, 通过转速等有效信息估计所需风速。风速估计主要由气动转矩的估计和计算风速估计值两部分组成。首先利用转速和电磁转矩估计气动转矩, 然后再利用气动转矩估计值进行风速估计值的计算。

### 2.1 气动转矩的估计

功率平衡估计法 (power balance estimation, PBE)<sup>[17]</sup> 中风机传动链的转速方程为:

$$J\dot{\omega} = T_a - T_e \quad (4)$$

式中,  $J$  为风轮转动惯量;  $\dot{\omega}$  为转速的加速度;  $T_e$  是电磁转矩。可得气动转矩的动态表达式:

$$T_a = J\dot{\omega} + T_e \quad (5)$$

其中的转速加速度  $\dot{\omega}$  在实际中可以通过差分的方法获取, 即  $\dot{\omega} = \Delta\omega/T_s$ ,  $\Delta\omega$  为前后两次测量转速差,  $T_s$  为两次测量时间间隔。

### 2.2 风速估计

牛顿-拉夫逊法是一种用于求解非线性代数方程的方法, 其特点是把非线性方程求解过程, 转变成对线性方程反复求解的过程。通过把非线性函数  $f(x)$  在  $x_0$  点的某邻域内进行泰勒级数展开, 再舍去二次项及高次项, 可以得到线性方程, 并最终得迭代公式: 当序列  $\{x_k\}$  收敛于一个特定值, 则该特定值就是非线性方程的根<sup>[18]</sup>。

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (6)$$

风机气动转矩为:

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{P_a}{\omega} = \frac{0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda)}{\omega} \\ &= \frac{0.5\rho\pi R^5 C_p(\lambda)}{\lambda^3} \omega^2 \end{aligned} \quad (7)$$

令:

$$F(\lambda) = T_a - \frac{0.5\rho\pi R^5 C_p(\lambda)}{\lambda^3} \omega^2 \quad (8)$$

根据牛顿-拉夫逊算法得到以下迭代公式:

$$\Delta\lambda^{(k)} = -F(\lambda^{(k)}) / \left[ \frac{\partial F(\lambda^{(k)})}{\partial \lambda^{(k)}} \right] \quad (9)$$

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)} \quad (10)$$

当解出  $\lambda$  近似解后, 由  $v = \omega R / \lambda$  求得当前估计风速。

## 3 风速观测的实验验证

应用 Matlab Simulink 仿真和风力机模拟器实验进行验证, 以风速最大误差, 误差平均值等为评价指标, 通过 MPPT 控制实验, 验证基于牛顿-拉夫逊

法的风速观测器工程实用性和有效性。

### 3.1 仿真与实验环境

仿真中风机采用 600 kW 机型,具体参数见表 1,相应的 Matlab Simulink 仿真模块如图 2 所示。

表 1 风机的机型参数

| 参数描述                         | 参数值     |
|------------------------------|---------|
| 额定功率/kW                      | 600     |
| 额定转速/( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 1780    |
| 切入风速/( $m \cdot s^{-1}$ )    | 4       |
| 风轮半径/m                       | 20      |
| 风机转动惯量/( $kg \cdot m^2$ )    | 613 301 |
| 齿轮箱传动比                       | 43.165  |
| 最大风能利用系数                     | 0.460 3 |
| 最佳叶尖速比                       | 5.7     |
| 空气密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )   | 1.225   |

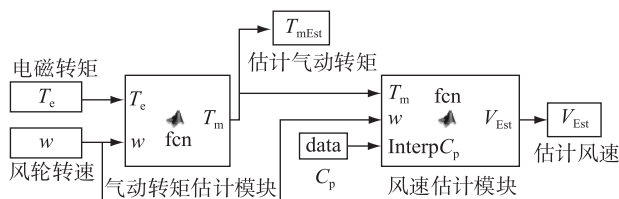


图 2 Matlab 风速估计仿真模块

Fig.2 Simulation module of wind speed estimation

风力机模拟器作为实际风机的实验替代设备,可以在实验室环境下模拟风力机特性,方便研发机构进行相关的性能测试研究<sup>[18-21]</sup>。实验平台主要由风轮模拟器、实时数字模拟系统以及发电并网子系统构成,其结构如下图 3 所示。

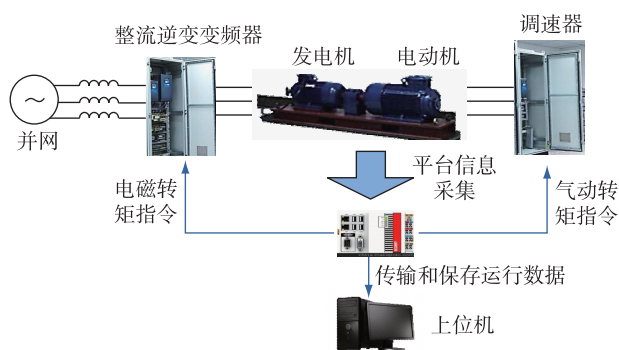


图 3 风力机模拟器实验平台设备结构

Fig.3 Device structure diagram of wind turbine simulator platform

风轮由感应电动机(induction motor, IM)模拟,向发电机提供风轮的气动转矩。发电并网子系统将永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)作为实际风电机组中的发电机,并通过一套整流/逆变装置连接到电网侧,该部分

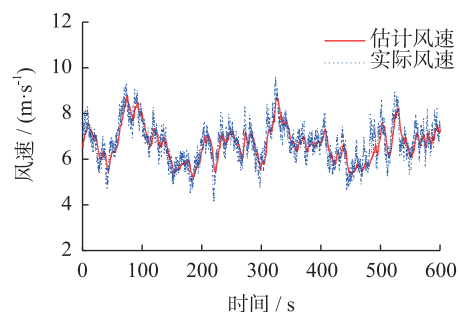
具有与实际风电系统一致的电气结构,用于还原风电的并网过程。实时数字模拟系统具有生成风速、模拟风力机气动输出以及实现风力机运行控制等作用,通过可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)对调速器、变频器等设备进行控制,完成风轮气动仿真、机械动态模拟以及风力机主控策略等功能。风力机模拟器平台参数见表 2。

表 2 风力机模拟器平台参数

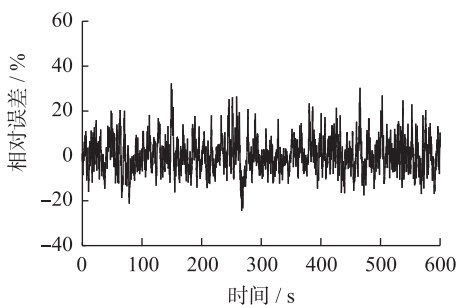
| 参数描述                                  | 参数值  |
|---------------------------------------|------|
| IM 额定功率/kW                            | 18.5 |
| IM 额定转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )       | 1500 |
| PMSG 额定功率/kW                          | 15   |
| PMSG 额定转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )     | 1500 |
| 模拟器系统转动惯量/( $kg \cdot m^2$ )          | 0.72 |
| PLC 指令控制周期/ms                         | 40   |
| 编码器脉冲/( $\text{pulse} \cdot r^{-1}$ ) | 1024 |

### 3.2 仿真与实验结果

在仿真程序中加载湍流风速文件,并根据运行过程中采集的实时状态对风速进行在线观测,最后对风速观测器估计得到的风速与风文件中的原始风速数据进行对比,判断所设计的风速观测器是否满足要求<sup>[18]</sup>。仿真结果如图 4 所示,仿真的统计数据如表 3 所示。



(a) 估计风速与实际风速对比



(b) 估计风速与实际风速相对误差

图 4 Matlab 仿真结果

Fig.4 The results of Matlab simulation

从仿真结果可以看出,实际风速平均值为 6.5 m/s,仿真观测的风速平均值为 6.475 5 m/s,两者的

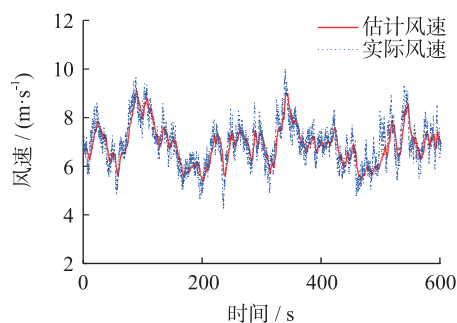
表3 Matlab 仿真统计数据

Table 3 Statistic data of Matlab simulation

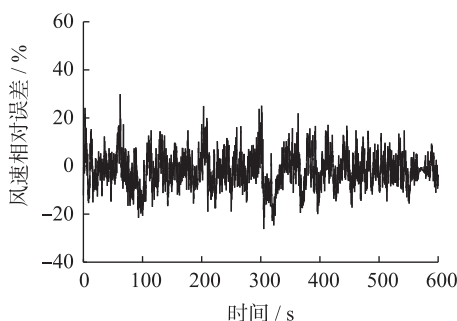
| 实际风速                                   | 观测风速    |
|--|---------|
| 平均风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  | 6.475 5 |
| 最大误差/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  | 1.660 4 |
| 误差平均值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 0.374 4 |
| 误差标准差/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 0.495 3 |
| 相对误差平均值/%                              | 5.813 8 |

风速轨迹基本重合,说明风速观测器能够较为准确、及时地估计出实时风速。同时,两者误差绝对值的平均值为  $0.374\ 4\ \text{m/s}$ ,相对误差平均值为  $5.813\ 8\%$ ,说明风速的估计值与风速的实际值之间的偏差较小,具有良好的估计性能。

为验证风速观测器的实际效果,将其应用于风力机模拟器进行实验验证。风力机模拟器实验结果如图5所示,统计数据如表4所示。



(a) 估计风速与实际风速对比



(b) 估计风速与实际风速相对误差

图5 风力机模拟器实验结果

Fig.5 The experimental results of the wind turbine simulator

表4 风力机模拟器实验统计数据

Table 4 Statistic data of WTS experiment

| 实际风速                                   | 观测风速    |
|--|---------|
| 平均风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  | 6.536 7 |
| 最大误差/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  | 1.590 3 |
| 误差平均值/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 0.412 8 |
| 误差标准差/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 0.508 6 |
| 相对误差平均值/%                              | 5.673 0 |

从实验结果中可以看出,所设计的风速观测器在实际系统中观测到风速的平均值为  $6.536\ 7\ \text{m/s}$ ,实际风速平均值为  $6.5\ \text{m/s}$ ,同时两者的风速轨迹基本重合,说明风速观测器能够较为准确、及时地估计出模拟器实验平台设置的实时风速。进一步,两者误差绝对值的平均值为  $0.412\ 8\ \text{m/s}$ ,相对误差平均值为  $5.673\ 0\%$ ,风速的估计值与风速的实际值之间同样不存在较大偏差,说明其在实际中也具备良好的估计性能,符合设计要求。

## 4 结语

在风力机的气动模型和传动链模型的基础上,通过非线性代数方程的牛顿-拉夫逊方法设计并实现了一种风速观测器,分别通过 Matlab 和风机模拟器平台进行了仿真和实验的验证,结果表明本文设计的风速观测器估计风速的效果较好,满足了预期的设计目的,为风速观测器在实际风机中的应用奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] IQBAL M T, COONICK A H, ERERIS L L. Dynamic control options for variable speed wind turbines[J]. Wind Engineering, 1994, 18(1): 1-12.
- [2] SONG Y D, DHINAKARAN D, BAO X. Control of wind turbines using nonlinear adaptive field excitation algorithms[C]// Proceedings of the American Control Conference. Chicago, 2000: 1551-1555.
- [3] 陈载宇, 沈春, 殷明慧, 等. 面向 AGC 的变速变桨风电机组有功功率控制策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 9-14.  
CHEN Zaiyu, SHEN Chun, YIN Minghui, et al. Review of active power control strategy for variable-speed variable-pitch wind turbine participating in AGC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 9-14.
- [4] 张文, 阙波, 韦古强, 等. 双馈型风电场双层无功分配策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 79-83.  
ZHANG Wen, QUE Bo, WEI Guqiang, et al. Hierarchical distribution strategy of reactive power for DFIG wind farm[J]. Electric Power Engineering Technology, 36(1): 79-83.
- [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]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2005, 17(7): 1590-1593.
- [6] BOSSANYI E A. Adaptive pitch control for a 250 kW wind turbine[C]. Proc. British Wind Energy Conference. 1986: 85-92.
- [7] BHOWMIK S, SPEE R. Wind speed estimation based variable speed wind power generation [C] // Industrial Electronics Society 1998 IECON'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE. IEEE, 1998: 596-601.

- [8] THIRINGER T, PETERSSON A. Control of a variable-speed pitch-regulated wind turbine[R]. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2005.
- [9] HOOFT E L, ENGELEN T G. Estimated wind speed feed forward control for wind turbine operation optimisation[C] // Proceedings of European Wind Energy Conference in London, UK, 2004.
- [10] KODAMA N, MATSUZAKA T, INOMATA N. Power variation control of a wind turbine generator using probabilistic optimal control, including feed-forward control from wind speed[J]. Wind Engineering, 2000, 24(1): 13-23.
- [11] VIHRIALA H, RIDANPAA P, PERALA R, et al. Control of a variable speed wind turbine with feedforward of aerodynamic torque[C] // EWEC-CONFERENCE. 1999: 881-884.
- [12] SBARBARO D, PENA R. A nonlinear wind velocity observer for a small wind energy system[C] // Decision and Control 2000 Proceedings of the 39th IEEE Conference on. IEEE, 2000: 3086-3087.
- [13] 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: 130-142.  
YE Hangye. Control Technology of wind turbines [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2002: 130-142.
- [14] ERMIS M, ERTAN H B, AKPINAR E, et al. Autonomous wind energy conversion system with a simple controller for maximum-power transfer [J]. IEE Proceedings B-Electric Power Applications, 1992, 139(5): 421-428.
- [15] GARDENAS R, PENA R. Sensorless vector control of induction machines for variable-speed wind energy applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 196-205.
- [16] DATTA R, RANGANATHAN V T. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system[J]. IEEE Transactions on Energy conversion, 2003, 18(1): 163-168.
- [17] SOLTANI M N, KNUDSEN T, SVENSTRUP M, et al. Estimation of rotor effective wind speed: a comparison [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1155-1167.
- [18] 窦真兰, 王 晗, 张秋琼, 等. 虚拟风场和风力机模拟系统的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(20): 127-135.  
DOU Zhenlan, WANG Han, ZHANG Qiuqiong, et al. Experimental research on virtual wind farm and wind turbine emulator system[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2011, 31(20): 127-135.
- [19] LI Weijie, YIN Minghui, ZHOU Rui, et al. Investigating instability of the wind turbine simulator with the conventional inertia emulation scheme[C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2015 IEEE. IEEE, 2015: 983-989.
- [20] 吴 捷, 许燕灏. 基于异步电动机的风力机风轮动态模拟方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 46-49.  
WU Jie, XU Yanhan. Consolidation in-situ forming of aluminium oxide ceramic by acetate starch [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2005, 33(6): 46-49.
- [21] LI Weijie, YIN Minghui, CHEN Zaiyu, et al. Inertia compensation scheme for wind turbine simulator based on deviation mitigation [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(2): 228-238.

## 作者简介:



刘 乾

刘 乾(1978—),男,江苏南京人,工程师,从事智能配电网和新能源的研究和开发工作(E-mail: lizard010@163.com);

徐洋超(1991—),男,浙江绍兴人,硕士,从事智能电网及风力发电技术;

李 赞(1992—),男,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向为智能电网及风力发电技术。

## The Implementation of Wind Speed Observation Based on Newton-Raphson Method

LIU Qian<sup>1</sup>, XU Yangchao<sup>2</sup>, LI Yun<sup>3</sup>

(1. Nanjing PanNeng Technology Development Co Ltd., Nanjing 210032, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China;

3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Wind speed is an important parameter for the operation of wind energy conversion systems (WECSs), and its obtaining affects the control of WECSs. A wind speed observation based on Newton-Raphson Method is presented, which uses the real-time states collected in the operation of WECS to estimate the tip speed ratio. Then the estimated can be calculated by the relationship of the tip speed ratio and the wind speed. Finally, the wind speed observer is respectively verified by simulation and the wind turbine simulator based experiment. According to the emulational and experimental results, the wind speed observer has a satisfactory performance, meeting the desired goals.

**Key words:** Newton-Raphson Method; wind observation; variable speed wind turbine; tip speed ratio; wind turbine simulator

(编辑 刘晓燕)