

# MW级风电机组最大功率追踪复合控制策略\*

童亦斌<sup>1</sup> 刘展<sup>2</sup> 刘远远<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044;  
3. 西门子(中国)有限公司, 北京 100102)

**【摘要】** 针对目前普遍应用的间接转速控制技术由于风轮转动惯量大而导致动态跟踪特性较差的问题, 提出直接风速控制与间接风速控制相结合, 改善最大功率追踪响应性能的新型复合控制策略。针对风速测量不准确, 采用BP神经网络构建了有效风速估计模型。仿真实验证明, 基于有效风速估计与真实风速的一致性, 即使估计存在误差, 采用复合控制策略也可以提升风能利用系数, 提高发电量1%~2%。

**关键词:** 风力发电机组 最大功率追踪 复合控制 神经网络 风速估计

**中图分类号:** TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)09-0129-04

## Maximum Power Point Tracking Compound Control Strategy of MW Level Wind Turbines

Tong Yibin<sup>1</sup> Liu Zhan<sup>2</sup> Liu Yuanyuan<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China  
2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China  
3. Siemens Ltd. China, Beijing 100102, China)

### Abstract

Dynamic valid wind speed of aerodynamic characteristic wind wheel was evaluated based on BP neural network. According to the evaluated valid wind speed dynamically and combined direct wind speed control with indirectly wind control, a new complex control method was proposed. With this complex control method, dynamic characteristics of MPPT under indirect wind speed control can be obviously improved when wind speed evaluation is estimated with error. Besides, it can also follow the fluctuations of wind to increase the efficiency of wind power.

**Key words** Wind turbine, Maximum power point tracking, Compound control, Neural network, Wind speed estimate

### 引言

MW级变速变桨风力发电机组是目前风电行业大规模并网发电的主要设备, 而风能捕获性能是保证风电业主经济利益、降低风力发电成本、加速风力发电技术推广普及的关键环节之一, 因此最大功率追踪技术(MPPT)已成为目前风力发电控制技术研究热点。MPPT控制技术有两种实现方法: 直接风速控制和间接风速控制。直接风速控制是通过测

量的风速按照最佳叶尖速比直接调节风轮转速; 间接风速控制是通过测量风轮实时转速, 根据该转速所对应的稳态最优电磁力矩间接调节风轮转速。研究表明, 在不考虑风速测量误差的情况下, 由于其良好的动态特性, 采用直接转速控制将获得比间接转速控制更好的风能捕获能力<sup>[1]</sup>。但实际应用中, 由于风速存在测量误差, 而风轮转速精确测量很容易实现, 因此目前实际工业应用以间接转速控制为主。

本文通过BP神经网络建立基于风轮模型的有

效风速估计模型,动态实时实现有效风速估计;基于估计有效风速将直接风速控制与间接风速控制相结合,以实时估计的有效风速修正间接转速控制的电磁力矩输出,从而改善 MPPT 动态特性,给出复合控制策略与间接转速控制策略的对比仿真结果,验证控制策略的有效性。

## 1 有效风速估计

### 1.1 有效风速估计原理

对于风力机组,扫风面积通过的风能为

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

式中  $P_w$ ——通过风轮的能量

$\rho$ ——空气密度  $R$ ——风轮半径

$v$ ——通过风轮的有效风速

风轮吸收的能量可以表示为

$$P_b = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 v^3 \quad (2)$$

式中  $P_b$ ——风轮吸收的能量

$C_p(\lambda, \beta)$ ——风能利用系数<sup>[2]</sup>

由文献[2]可知,  $C_p$  可以表示为关于叶尖速比  $\lambda$  和桨距角  $\beta$  的函数。

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

式中  $\omega_b$ ——风轮转速

因此可以推导出,风轮产生的力矩

$$T_b = \frac{P_b}{\omega_b} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\omega_b R}{v}, \beta \right) \rho \pi R^2 v^3 = f(\omega_b, v, \beta) \quad (4)$$

由于风轮转矩受风产生的力矩往往比较难以测量,可由运动方程计算

$$T_b = T_e + J \frac{d\omega_b}{dt} \quad (5)$$

式中  $J$ ——风力发电机组主传动轴等效转动惯量

根据式(4),建立风轮转矩的反函数,将有效风速估计表示为

$$v = \bar{f}(T_e, \beta, \omega_b, \dot{\omega}_b) \quad (6)$$

在低于额定风速下的 MPPT 控制过程中,桨距角一般保持恒定,而风轮转速的加速度可以由风轮转速通过差分法求出,故式(6)在低于额定风速状态下的求解曲面如图 1 所示,可以写成

$$v = \bar{f}(T_e, \omega_b) \quad (7)$$

由图 1 可知,有效风速估计模型为一多值模型,即对于一组固定风轮转速与风轮驱动力矩的组合(风轮驱动力矩大于零),有两个有效风速值与其对应,通过与实际工况进行比对可知,此模型在有效风速估计范围只取该模型计算的较小值即可。

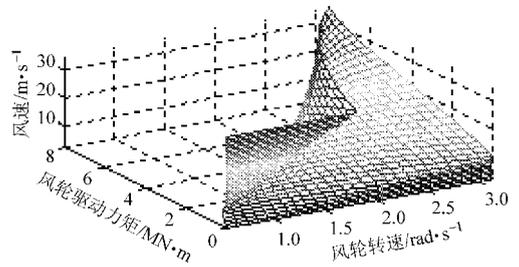


图 1 有效风速估计模型

Fig. 1 Effective wind speed estimation model

### 1.2 有效风速估计仿真

针对经典的风轮模型

$$C_p = \begin{cases} (0.44 - 0.0167\beta) \sin \left( \frac{1.5\lambda - 3}{15 - 0.3\beta} \pi \right) - \\ 0.00184(1.5\lambda - 3)\beta \\ 0 \quad (C_p < 0) \end{cases} \quad (8)$$

根据文献[3]通过构建 BP 神经网络建立有效风速估计模型, BP 神经网络包括 2 个隐层, 每个隐层 15 个节点, 隐层均采用双曲正切 S 型函数, 输出层采用线性传输函数。

假设某直驱风力发电机组相关仿真参数如下: 风轮转动惯量  $J = 2\,500\,000 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ , 风轮半径  $R = 38.5 \text{ m}$ , 空气密度  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ , 采用自寻优控制, 即  $T_e = K_{opt} \omega^2$ , 并假设电磁力矩可以瞬时响应, 风速信号采用文献[4]测量方法, 设计风速序列满足 Kaimal 谱密度函数, 600 s 平均风速为 8 m/s 的风速序列, 仿真结果如图 2 所示。

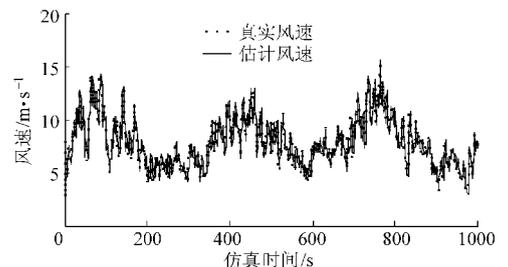


图 2 有效风速估计仿真

Fig. 2 Effective wind speed estimation simulation

由图 2 可知,有效风速估计获得了满意的效果,由于瞬时风速湍流强度较大,有效风速估计存在一定的误差,通过计算仿真估计风速平均相对误差为 5.83%。

## 2 复合 MPPT 控制

直接风速控制是目前 MPPT 控制策略研究的重点,文献[5~8]介绍了准确的风速测量或预测与一些先进控制方法相结合实现直接风速控制的方法,因此,瞬时风速的准确测量或预测是这些方法实现的必要条件。而现实的情况是,风轮由于扫风面积

大,同时由于风阔线和风的人射角等风特性的存在,目前很难通过测风传感器获得准确的风速。而如果采用风速预测,由于风的随机性,很难建立精确的瞬时风速模型。此外估计精度尤其是中高频率瞬时风速波动的预测精度难以保障。目前工业普遍应用的是通过测量风轮转速实现间接转速控制。间接转速控制虽然方便可行,但是由于间接转速控制是开环控制,完全依赖风轮的气动特性追踪最佳转速,由于风轮巨大的转动惯量,风轮转速的变化相对于风速的变化存在明显的惯性滞后,间接转速控制往往只能追踪风能量谱相对低频部分,对于由于风湍流抖动产生的稍高频率的风速变化则欠缺良好的追踪效果。针对目前间接转速控制动态特性相对较差,而直接转速控制风速获取不准确的问题,提出了一种复合 MPPT 控制策略。

2.1 复合 MPPT 控制原理

直接风速控制技术中风速难以精确测量,而间接风速控制动态性能有待提高,本文所提出的复合控制结合两种控制方式的优点,在允许估计风速误差的情况下将直接风速控制与间接风速控制相结合,提高 MPPT 动态响应能力,算法设计思路如图 3 所示。

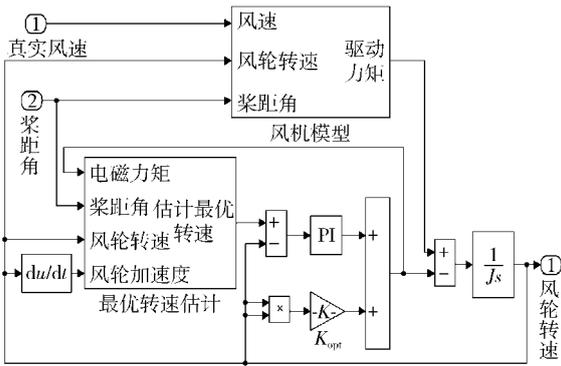


图3 复合控制原理框图

Fig.3 Compound control strategy illustrative diagram

与传统的自寻优控制相比,算法控制率为

$$\begin{cases} T_e = K_{opt} \omega^2 + C \\ C = K_p \Delta \omega + K_i \sum \Delta \omega \end{cases} \quad (9)$$

本策略通过对有效风速进行估计,确保有效风速在低频部分与真实风速具有良好的一致性,基于估计的有效风速根据风轮特性计算风轮最优转速,并将转速控制实现闭环,同时在控制率中引入控制性能改善项  $C$ ,这样虽然转速估计在相对频率较高的范围内有误差,但是由于低频部分可以通过有效风速估计的方法获得相对满意的效果,因此通过本控制策略可以帮助传统的自寻优系统更加快速找到最大功率跟踪点,加快系统最大功率跟踪过程动态

响应时间。

2.2 复合 MPPT 仿真及对比

风力发电机组仿真参数与有效风速估计仿真参数完全一致(图 4~5),设计在 8 m/s(120 s 内)的平均风速下基于 Matlab 的复合控制仿真与目前普遍应用的间接控制仿真进行对比,仿真结果如图 6~8 所示。

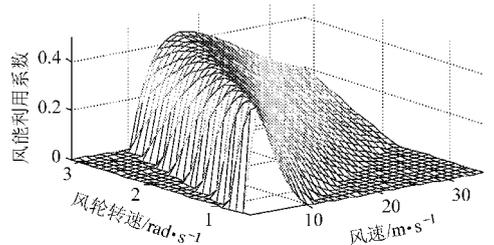


图4 风能利用系数模型

Fig.4 Wind turbine  $C_p$  model

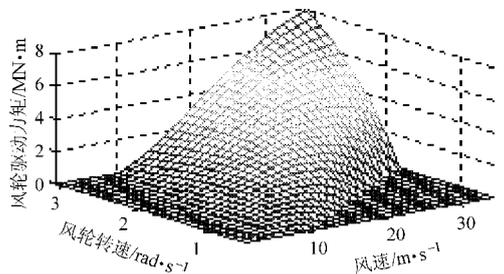


图5 风力发电机组模型

Fig.5 Wind turbine model

由于低于额定风速以下,风力发电机组保持桨距角最小,从而获取更多的风能,图 4 为根据式(8)构造的风力发电机组在桨距角等于零度时,风能利用系数模型。

图 5 为依据图 4 和式(4)绘制的风力发电机组在桨距角等于零度时,不同风速、转速情况下风轮驱动力矩曲面。该模型对应图 3 中的风机模型。

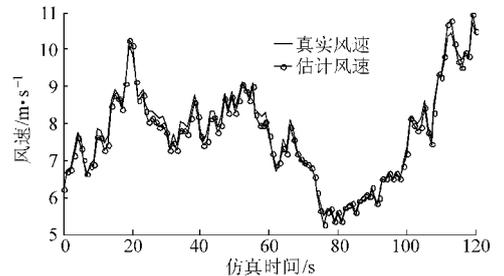


图6 动态风速估计对比曲线

Fig.6 Comparison curves of the dynamic wind speed estimation

由图 6 可知,采用风速估计方法获得了满意的风速估计效果,经过计算在 120 s 内风速估计平均误差为 4.96%。

由图 7、8 可知,采用复合控制策略,基于估计风速的转速闭环对间接转速控制率进行校正,加快了

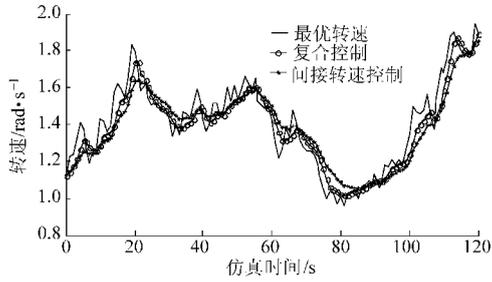


图7 风轮转速对比曲线

Fig. 7 Comparison curves of the rotor speed

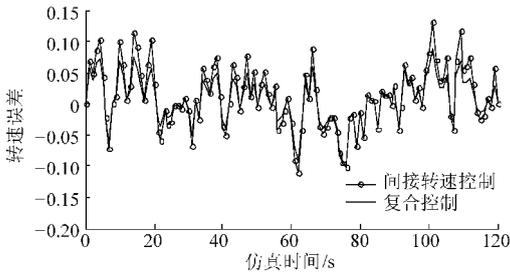


图8 风轮转速误差对比曲线

Fig. 8 Comparison curves of the rotor speed error

风轮转速向最优转速跟踪的动态响应时间,更好地动态跟踪了最大功率转速曲线。从仿真结果 80 ~ 100 s 的区间中,可以发现,当风速相对平稳时,复合控制和间接转速控制误差曲线基本重合,说明针对风速的低频部分复合控制并没明显地改善控制系统动态特性,而在风速波动相对剧烈的时间段内,复合控制策略在控制策略设计中通过有效风速估计引入相对高频风速 MPPT 修正量,实现了对更广频域范围内风速的 MPPT,更好地跟踪了风速相对高频变化部分,使风力发电机组转速更接近理论最优转速曲线,从而提高了风力发电机组的有效产能。

### 参 考 文 献

- 1 叶航冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2006.
- 2 Zaragoza J, Spiteri Staines C, Arias A, et al. Comparison of speed control strategies for maximum power tracking in a wind energy conversion system[C]//MELECON 2010—2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2010, 961 ~ 966: 26 ~ 28.
- 3 雷涛,贾利民. 基于实时状态的大型风电机组变桨非线性控制器设计[J]. 微计算机应用, 2009, 30(11): 14 ~ 18. Lei Tao, Jia Limin. Design of nonlinear controller of large-scale wind turbine pitch control system based on real-time status [J]. Microcomputer Applications, 2009, 30(11): 14 ~ 18. (in Chinese)
- 4 Martin O L Hansen. Aerodynamics of wind turbine[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2009: 127 ~ 139.
- 5 Narayana M, Putrus G, Jovanovic M, et al. Predictive control of wind turbines by considering wind speed forecasting techniques[C]//Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International, 2009: 1 ~ 4.
- 6 Shao Changhong, Chen Xiangjun, Liang Zhonghua. Application research of maximum wind-energy tracing controller based adaptive control strategy in WECS [C]//Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International, 2006: 14 ~ 16.
- 7 Abo-Khalil A G, Dong-Choon Lee. MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1 489 ~ 1 490.
- 8 Guo Peng. Research of a new MPPT strategy based on gray wind speed prediction[C]//Knowledge Acquisition and Modeling, 2009. KAM'09. Second International Symposium, 2009, 3: 120 ~ 123.
- 9 IEC 61400-1—2005 Wind turbines-part 1: design requirements[S]. 2005.

表1 仿真结果对比

Tab. 1 Comparison of the simulation results

性能参数	间接转速控制	复合控制
总风能/kW·h	50.812 1	50.812 1
风轮吸收能量/kW·h	21.651	130.2
风能利用系数	0.426 1	0.433 9
平均转速误差/%	6.9	4.1
风速估计误差/%		4.9

由表1可知,采用复合控制策略,在存在 4.9% 风速估计误差的情况下,可以有效增加风轮吸收的风能,大幅度的降低风轮实际转速与最优转速的平均误差,提高风能利用系数 0.007 8,提高发电量 1% ~ 2%,在 8 m/s(120 s 内)的风速下提高发电量 0.395 2 kW·h。

### 3 结束语

通过建立 BP 有效风速估计神经网络,在低于额定风速的情况下,基于风力发电机组的动态电磁力矩和风轮转速,实现了风力发电机组动态有效风速估计。基于动态有效风速估计,在允许估计存在一定误差的基础上,提出了一种将直接转速控制和间接转速控制结合的复合控制方法,该方法可以在更宽广的风速频域范围进行 MPPT 控制,使风轮转速动态跟踪特性更加接近最优转速曲线,特别是在风速波动频率相对较高时获得较好的动态 MPPT 效果,通过 Matlab 仿真量化分析,在低于额定风速 8 m/s 典型风况情况下,采用复合控制相对于间接风速控制技术可以提高平均风能利用系数 0.007 8,提高发电量 1% ~ 2%。