

阻力型垂直轴风力发电系统特性的仿真分析

垂直轴风力发电系统有着独特的优点，由于其风轮运行环境复杂，数值分析得出结果计算准确度有限，使用水平轴风机发电功率计算公式作为参照，结果准确性难以得到保证。在对文献调研和统计的基础上，提出一种新的方法计算垂直轴风力发电系统特性数据。采用三维CFD软件模拟风轮旋转，得出风机机械转矩与功率；通过建立风机发电系统仿真模型，基于风机转矩、机械功率等数据计算得出发电机的电磁转矩和发电功率，进而分析风机的发电特性。所提出的方法为风机研究开辟了一条新的路径，对垂直轴风机设计开发提供了借鉴和参考。

李 争 高培峰 孙甜甜/河北科技大学电气工程学院

0 引言

近年来，环境污染加剧，清洁能源技术是世界各国关注的热点。风能是一种理想能源，不仅节能环保，取之不尽、用之不竭，且风机技术日趋完善，各种类型风机不断被研制成功。关于风机的文献数量不断增多，可见风能利用及风机发展是大势所趋^[1-3]。图1列举了2004~2013年国内外关于风机文献的发表数量，呈逐年上升趋势，从侧面验证了国内外关于风机的关注程度。目前关

于水平轴风力发电机的技术文献相对比较成熟，而垂直轴风机科研文献较少，但是随着永磁同步电机和交直交变频器技术的不断发展，垂直轴风机的快速发展成为可能。近些年科研人员重新又把目光转向了垂直轴风力发电技术。该类型风机文献数量不断增多，是最有希望得到规模化发展的中小容量风机类型^[4-5]。垂直轴风机有很多优点，不需要对风部件，结构简单，噪声小，自启动速度低，控制简单，相比于水平轴风机，风速变化范围更宽，适应性更强，易于在复杂风电场环境中进行风力发电，是未来风电行业的发展方向^[6-8]。

关于垂直轴风力发电机技术的研究，国内外进行了不懈探索，主要侧重于以下三个方向。

1) 一是进行风机仿真数值运算，Agus Sunyoto分析计算了达里厄型风机在不同风轮数量情况下，对风机性能的影响；孙瑞对小型垂直轴风机仿真运算，分别使用 $k-\epsilon$ 和SST $k-\omega$ 湍流模型比较，并与实验结果比较，分析了结果可靠性



李 争/教授

关键词/Keywords

垂直轴风机 ·
发电特性 ·
仿真模型 ·
机械功率 ·
CFD ·

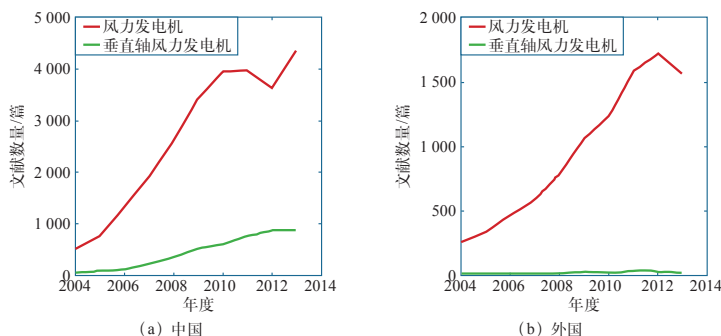


图1 国内外科研文献统计

河北省自然科学基金项目(E2014208134)。

及不同模型对风轮流场环境的影响^[9-10]。

2) 二是风机发电特性及控制算法方面的研究。Kooksun Lee使用欧拉方程,建模和仿真了使用两个发电机进行风力发电的情况,并通过实验验证了结果的正确性和可行性;Catalin Harabagiu把Savonius风机风轮做了一些改动,即加入270°导流罩,计算出风机的输出功率增大了2.5倍^[11-12]。

3) 三是研究风机某个部件能承受的外界条件及运行环境。丁树业以永磁同步电机为例,研究了电机内部、外部冷却介质的流动特性,揭示了介质的流动特性^[13]。

本文在结合已有分析技术的基础上,进行分步模拟计算,首先进行CFD模拟计算,基于Senegal式双层风轮模型,计算出风机的机械转矩等数据,然后使用Simulink搭建关于风机的发电特性模块,发电机选择永磁同步电机,计算风机的发电功率,最终分析得出系统的发电特性。

1 CFD三维模拟计算

1.1 风机模型

风机模型为Senegal式风机,风轮扇叶由一个半圆柱面和一个长方形平板组成,风轮有两层,每层由三个扇叶组成,如图2所示。发电机与风轮转轴直接相连,便于风力发电,减少了能量耗散。图3为风机的仿真模型,为了便于计算,对不影响空气动力学分析的部分结构进行简化,发电



图2 Senegal式风力发电机

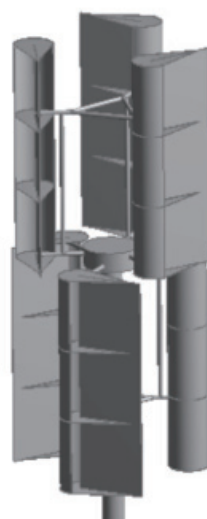


图3 风机仿真模型

机部分在仿真模型中采用圆柱体代替。

1.2 设计参数及求解设置

本文数值仿真计算使用Fluent软件,风轮高度为4 m,内径为1.7 m,外径为1.9 m;采用有限体积法以及全隐式多网格耦合算法,模拟风机非定常流动,流体为等温、不可压缩的空气,模拟风速较低时的情况。垂直轴风机周围风场流体环境复杂,计算使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

湍动能 k 方程为

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (1)$$

湍动能耗散率 ε 方程为

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中, μ_l 为层流黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数。

风机数值计算需要剖分网格,网格划分为两个区域,静止域和旋转域,如图4所示。为了比较真实地模拟瞬态计算,更好地衔接两个域之间的数据传递,在静止域和旋转域之间使用滑移网格。入口设定为速度入口,出口设定为压力出口,压力计算值为零,风轮依据笛卡尔坐标系,设定旋转速度。

求解设置中算法使用基于有限体积法的压力修正法,Simplec的压力校正亚松弛因子设定为1,

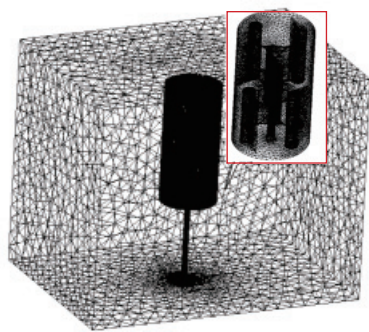


图4 风机网格剖分

有助于计算的快速收敛,具体参数使用默认值,仿真准确度设定为 10^{-3} ,仿真时间设定为4 s。

图5为风机在风速为4.9 m/s、尖速比为0.374时的转矩系数;当风速固定时,风机旋转周期一定,旋转一周经过三个周期;受气动性能的影响,风轮上下两层流场相互耦合,产生比一层风轮计算转矩更复杂的非线性变化,但是转矩波动范围更小,机械功率更稳定。

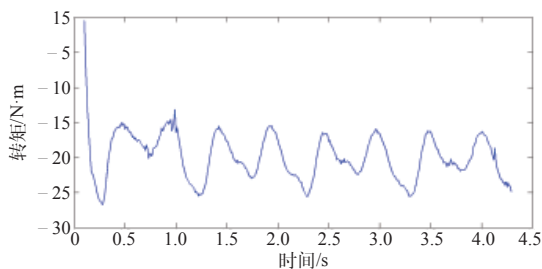


图5 尖速比为0.374时的转矩曲线

2 风力发电机动态数学模型

本研究重在捕捉风机的最佳发电功率,因此在Simulink搭建了两个模块,包括风机模型和发电机模型。在模型中发电特性检测采用交变频器将交流变为直流后,通过电阻和电感检测发电机的电压、电流等数据。

2.1 风机模型

风能机械功率主要与风速、风轮角转速有关,尖速比是反应风机风电特性的一个重要参数,风轮越长,或者风轮旋转速度越快,尖速比越大,特性方程如下,即

$$TSR = \frac{R\omega}{V} \quad (3)$$

式中, R 为风轮半径; ω 为风机的角速度; V 为来流风速。

风能转换效率与风机机械转矩和角速度成正比,与风速成反比,同时还与风机周围流场黏性系数、风轮结构参数有关,下式为风能利用率方程,即

$$C_p = \frac{P_T}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \quad (4)$$

式中, P_T 为风机的机械功率,是转矩乘风轮转速; ρ 为空气的密度; A 为风轮扫掠面积; V 为来流风速^[14]。

根据风能转换效率公式,以Fluent测出的转矩数据作为变量,测出了在风速分别为4.9 m/s、6.7 m/s和8.9 m/s,以及尖速比分别为0.141、0.284、0.374、0.568和0.78时的转化效率。如图6所示,风速为4.9 m/s时转换效率为 C_{p1} 、 C_{p2} 和 C_{p3} 分别是指风速为4.9 m/s、6.7 m/s和8.9 m/s时的情况。根据图6可知,随着风速的增加,风能转换效率降低,并且尖速比在0.5左右获得最大值。下面以风速为6.7 m/s、尖速比为0.568时作为算例,以转矩作为源数据,使用曲线拟合,计算风机旋转一周的机械功率,如图7所示。关于在更宽范围风速情况下的功率转换效率,将在后续研究中总结变化趋

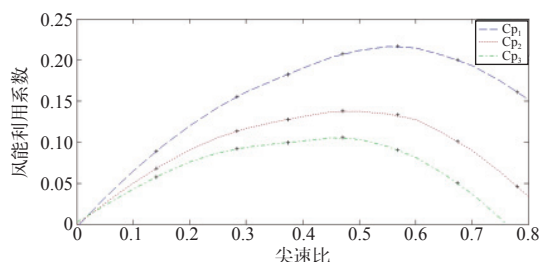


图6 风机转换效率

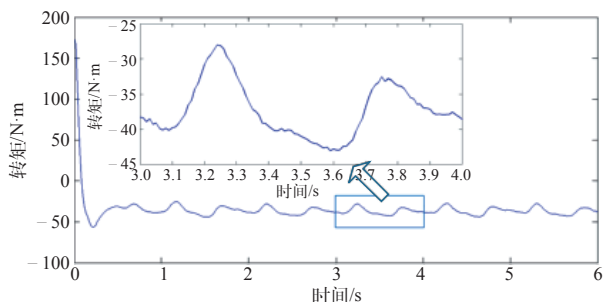


图7 尖速比为0.568时的转矩曲线

势,更全面地反应Senegal式风机的转矩特性及控制方案。

2.2 发电机数学模型

发电机使用静止坐标系表达时,加入运动和转矩方程后,电机电流向量和磁链矩阵表述相对复杂,因此以旋转坐标系作为参考,忽略定子电磁暂态过程,则永磁同步电机的磁链方程和转矩方程为

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q} \quad (6)$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (7)$$

式中, L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴的电感; R 为定子绕组的电阻; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴的电流; v_d 、 v_q 分别为 d 、 q 轴的电压; ω_r 为转子的角速度; λ 为通过永磁转子和定子侧相对位置变化产生气隙磁通的幅值; p 为极对数; T_e 为电磁转矩。

2.3 模型搭建

为仿真分析风机的发电特性,在各模块分别建模的基础上,搭建仿真系统模型如图8所示。主要包括两个核心模块,即转矩拟合和发电模块。使用瞬态分析,将转矩计算数据输入至发电机模块,计算获得发电特性曲线。图8中,示波器 S_1 、 S_2 分别为风机机械功率和风机转矩; S_3 为发电机三相电流; S_5 为经过整流器后永磁发电机的电压和电流。

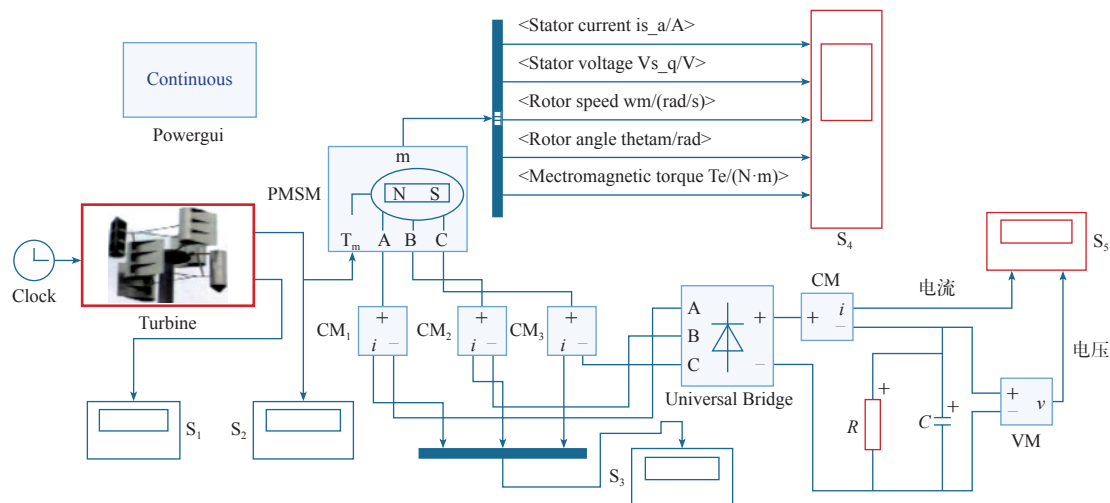


图8 Simulink风机模块搭建

3 结果分析

当风速不同时,风机输出机械转矩不同,据此对代表典型工况的两个算例进行仿真分析,首先以风速为4.9 m/s、尖速比为0.374为例,仿真时间设定为1 s;其次是风速为6.7 m/s、尖速比为0.5时,仿真时间设定为5 s,从而更清晰地反应了风机特性。

图9~12为风机在风速为4.9 m/s时的发电特性。图9为风机的机械功率。图10中电压、电流相乘得出发电机的发电功率,两者之间略有差别,主要是因为功率传输中的损耗因素导致的,并且与发电机设置的参数有关。图11为风机的三相电

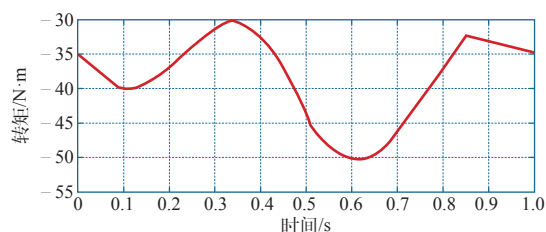


图9 风速为4.9 m/s时的风机转矩

流,因为是永磁同步发电机,且风机转速不高,发电机转速也随之减慢,电流曲线在周期中呈现局部不规则的特点,该问题可通过发电机端口输出所接交-直-交变频器进行整形滤波后达到理想的效果。

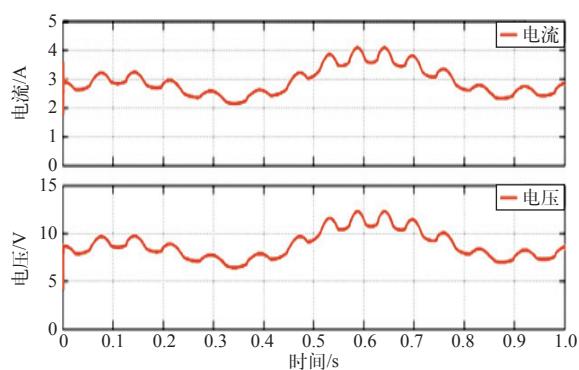


图10 电压、电流变化曲线

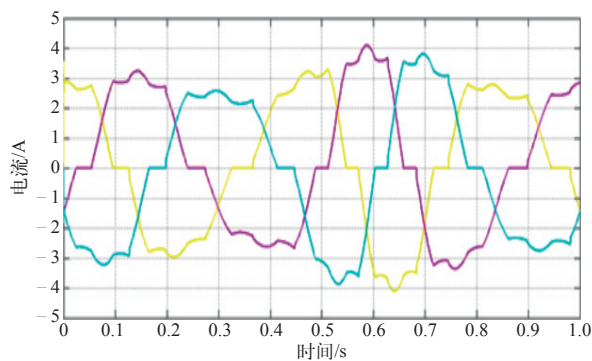


图11 三相电流变化曲线

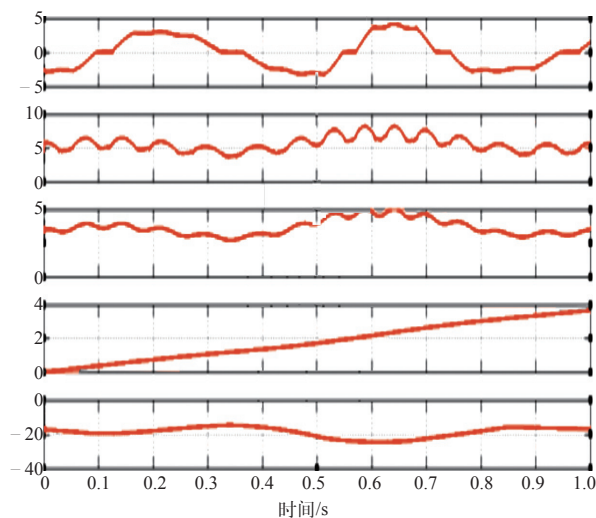


图12 发电机运行参数

图13~16为风机在风速为6.7 m/s时的发电特性。图13为仿真时间5 s内风机转矩的变化曲线,根据图形并与已有实验结果对比可知,建立的数学模型较为合理,能真实反映风机的机械转矩。随着风速增加,发电机转速升高,与图10相比,三相电流亦相对平滑,如图14所示。图15为电压、电流整流变换后的数值,由于着重观测发电

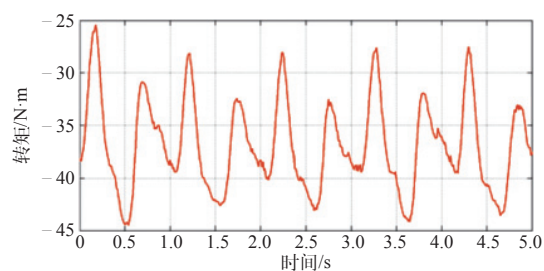


图13 风速为6.7 m/s时的风机转矩

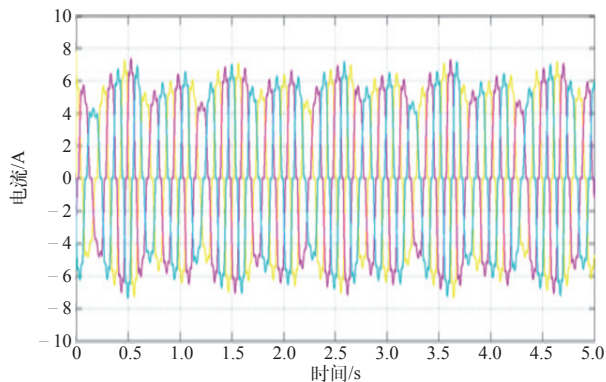


图14 三相电流变化曲线

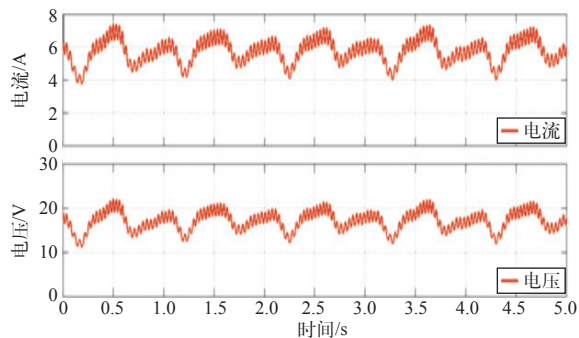


图15 整流后的电压和电流

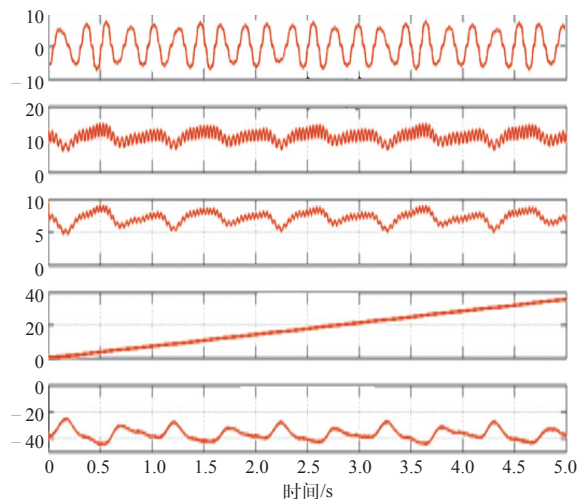


图16 发电机运行参数曲线

特性,使用不含滤波的基本三相整流器,存在波动,与实际情况吻合,这种情况在采用交-直-交变换器后可完全消除。

4 结束语

通过对垂直轴风机各部件特性的分析研究,建立了风机的三维仿真模型,模拟真实运行工况下风机的动态参数,据此计算得出转矩等结果。建立了风机系统的数学模型,并构建了发电模块,最终仿真得出风机发电特性。结果表明,所建立的风机发电系统特性仿真结果准确、合理。所提出的基于两个软件联合仿真的研究方案,计算工作量得到减少,可有效解决当前对垂直轴风机套用水平轴风机计算模型所带来的误差,为垂直轴风力发电系统的研究提供了借鉴和参考。

参考文献

- [1] 何志宁,刘座铭,张宗珍.垂直轴风力发电机的发展历史及现状[J].机械工程师,2014(2): 39-40.
- [2] 于伟,陈帝伊,马孝义.小型垂直轴风力发电机在农村的应用前景[J].农机化研究,2010,32(5): 236-239.
- [3] 严强.垂直轴风力发电机大型化的可行性研究[C].北京:中国农机工业协会风能设备分会风能产业,2014(2): 12-14.
- [4] 顾怡红.风力发电机叶片优化设计方法研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [5] 廖勇,何金波,姚骏,等.基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J].中国电机工程学报,2009,29(18): 71-77.
- [6] 位晓清,王东兴,蔡国忠.小型Savonius风机的创
- 新设计与仿真分析[J].能源与节能,2012(10): 1-3.
- [7] 赵炜.低风速启动垂直轴风力机的性能研究[D].昆明:昆明理工大学,2010.
- [8] 张亮.垂直轴永磁风力发电机控制系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [9] Sunyoto A, Wenchenubun F, Sutanto H. The effect of number of blades on the performance of h-darrieus type wind turbine [C]. International Conference on Qir, 2013: 192-196.
- [10] 孙瑞,赵大庆.小型垂直轴风机的数值模拟与试验对比研究[J].可再生能源,2013,31(10): 70-73.
- [11] Lee K, Kim S, Back J, et al. Modelling and control of dual generator type wind turbine (DGWT) [C]. 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), IEEE, 2013: 1830-1835.
- [12] Harabagiu C, Adochitei M, Burlica R. Effect of a semi-cylindrical wind shield on the power output of a vertical axis wind turbine [C]. 2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), IEEE, 2014: 695-700.
- [13] 丁树业,郭保成,冯海军,等.变频控制下永磁同步电机温度场分析[J].中国电机工程学报,2014,34(9): 1368-1375.
- [14] Placide J, Francois G, Alain B. Aerodynamic and mechanical system modeling of a vertical axis wind turbine (VAWT) [C]. Yichang: In Proceedings of IEEE Conference on Electrical and Control Engineering, 2011: 5189-5192.

(收稿日期: 2016-12-23) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告