

小型风电系统最大功率跟踪的研究

彭国平, 李 帅, 鱼振民, 易萍虎

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过对由新型无刷直流发电机构成的小型风力发电系统的分析, 提出了一种最大限度获取风能的控制方法, 该方法通过控制新型无刷直流发电机的电磁转矩 - 转速特性间接地控制了风力机的机械转矩 - 转速特性, 使风力机在额定风速以下以最佳尖速比运行, 自动跟踪其最大功率点. 详细阐述了运用此控制策略的功率调节器的设计方法, 并实际制作了 100 W 的功率调节装置. 系统实验结果表明, 新型控制方法在最大功率跟踪上取得了很好的效果, 对提高小型风电系统年发电量有参考和应用价值.

关键词: 风力机; 最大功率跟踪; 最佳叶尖速比; 直流变换器

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)04 - 0357 - 04

Research on Maximum Power Tracking of Small Size Wind Energy Conversion System

Peng Guoping, Li Shuai, Yu Zhenmin, Yi Pinghu

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A control method to maximizing the system output, for a small wind energy conversion system composed of a new type of brushless DC generator, is put forward. With the aid of the method, the wind turbine torque vs. rotate speed characters can be indirectly controlled via adjusting the machine electromagnetic torque vs. rotate speed characters, and the wind turbine operation with the optimum tip-speed ratio (TSR) and the maximum power point (MPP) is automatically tracked. A method for designing the power conditioner using this control strategy is presented in detail. A 100 W power conditioner prototype is designed and constructed. The experimental results confirm the effectiveness of this method during maximum power tracking.

Key words: wind turbine; maximum power tracking; optimum tip-speed ratio; DC-DC converter

近几年,我国 10 kW 以下风力发电系统发展很快,尤其是 2 kW 以下的机型,从设计制造到运行维护都取得了许多成功的经验,解决了一大批无电少电的农、牧、渔民的基本生活用电问题.但是,现有系统一般采用发电机输出直接对蓄电池进行充电,并没有对风力机转换环节进行控制,使得风能利用系数比较低,一般在 0.3 左右.根据贝茨理论,风能利用系数的极限值为 0.593^[1],如果控制风力机总是以最佳叶尖速比运行,年发电量可以提高 20% ~ 30%^[2].本文通过对自行研制的新型永磁无刷直流

发电机构成的小型风电系统的分析发现,如果能使发电机的输出电流跟随输出电压按照一定规律变化,就可以使风力机以最佳叶尖速比运行,自动跟踪其最大功率点,从而提高整个风电系统能量转换效率.文中根据此控制思想,详细阐述了功率调节器的设计过程,并实际制作了 100 W 的功率调节装置.

1 小型风力发电系统简介

(1) 风力机:把风能转换为机械能,本系统选用水平轴风力机 FD1.8 - 0.1/6.

收稿日期: 2003 - 09 - 25. 作者简介: 彭国平(1978 ~),男,硕士生;鱼振民(联系人),男,教授.

(2) 发电机:本系统采用一种新型永磁无刷直流发电机,转子为永磁体,定子输出的多相交流电压直接用二极管整流的方法变成直流,实验证明这种新型直流电机具有电压调整率低、输出纹波小、可以软启动等特点,其原理如图1所示。

(3) 电力电子接口:位于风力发电机和负载之间,主要完成能量变换以及协调整个系统工作,如图2所示。直流环节通常选用BUCK变换器或BOOST变换器,前者输出的电流连续,后者输入的电流连续,选择哪一种作直流环节,主要取决于对发电机的控制要求。

(4) 蓄电池:它是系统的储能装置,合理选择充电方式对延长蓄电池寿命有非常重要的作用。

(5) 逆变器和负载:逆变器用来将直流转换为交流,供交流负载使用,如果负载是直流负载,则不需要逆变器。

2 风能利用控制策略

图3为风力机输出功率-转速特性曲线,从图中可以看出,在某一固定转速下,风速越大风力机输出功率越大,在某一转速下可以输出最大功率, n 较小或太大时,风力机输出功率都会降低。实线为不同风

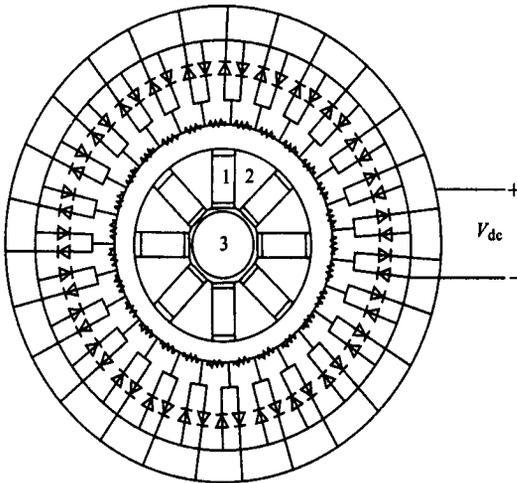


图1 新型无刷直流发电机原理示意图

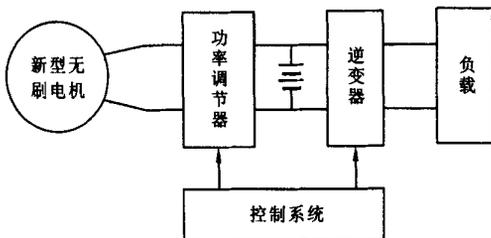


图2 电力电子接口的示意图

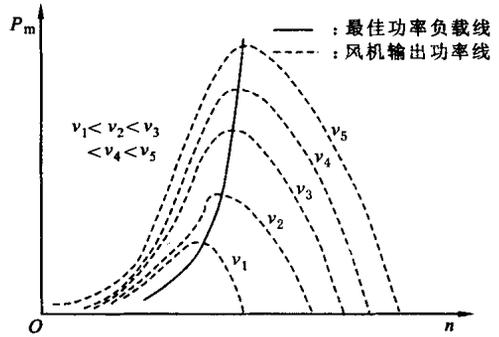


图3 风力机功率-转速特性图

速下风力机输出最大功率的连线,也称为最佳功率负载线。控制风力机始终跟踪其最大功率点,即工作在最佳功率负载线上就是闭环风力发电系统所追求的控制目标。由文献[3]知,风力机只有在最佳叶尖速比下运行,才能输出最大机械功率。此时,风力机的转速与风速成正比关系,风力机的最大输出机械功率与风速的3次方或转速的3次方成比例

$$n = k_1 v \tag{1}$$

$$P_{max} = k_2 n^2 = k_3 v^3 \tag{2}$$

式中: n 为风轮转速; v 为风速; k_1 、 k_2 、 k_3 为与风机结构相关的常数; P_{max} 是风力机输出最大功率。

风力机在不同风速下输出的最大功率(即发电机最大输入功率)减去发电机的空载损耗(电机实验得到),就得到了发电机的最大电磁功率

$$P_M = P_{max} - P_0 \tag{3}$$

式中: P_0 是发电机空载损耗; P_M 为发电机电磁功率。

风力机在各种风速下产生最大机械功率时的转速就对应发电机相应的转速,据此我们获得了发电机最大电磁功率与转速的关系曲线,它反映的风力机输出功率正好与转速成立方关系

$$P_M = k_2 n^3 - P_0 \tag{4}$$

又因为 $P_M = T \cdot n$,所以

$$T = \frac{60 P_M}{2 n} \tag{5}$$

式中: T 为发电机电磁转矩。由式(5)可以推出发电机电磁转矩和发电机转速最佳工作曲线的关系,此关系同样反映风力机输出功率与转速成立方关系。为了便于实现,在实际应用时,我们通过两条直线组成的折线来逼近这条工作曲线

$$\begin{cases} T = 0 & n < n_{min} \\ T = Kn + b & n \geq n_{min} \end{cases} \tag{6}$$

式中: K 、 b 均为常数,由风力机的几何结构决定。按

此关系来控制发电机的转矩 - 转速特性,实际上就可以控制风力机按照最佳叶尖速比运行,实现最大功率点跟踪控制。

对于直流发电机来说,有

$$T = C_T I_{dc} \phi \tag{7}$$

$$E = C_e n \phi \tag{8}$$

式中: C_T 是电磁转矩常数; I_{dc} 是发电机的输出电流; ϕ 是每极主磁通; E 是发电机电枢电势; C_e 是常量. 把式(7)、式(8)代入式(6),得

$$C_T I_{dc} \phi = K \frac{E}{C_e \phi} + b \tag{9}$$

由图 4 所示电路,得

$$V_{dc} = E - I_{dc} R \tag{10}$$

式中: V_{dc} 为发电机输出电压; R 为直流电机电枢绕组电阻. 把式(9)代入式(10),得

$$I_{dc} = \frac{KV_{dc}}{C_T C_e \phi^2 - KR} + \frac{bC_e \phi}{C_T C_e \phi^2 - KR} \tag{11}$$

一旦发电机和风力机选定以后, C_e 、 C_T 、 ϕ 、 K 、 b 、 R 就是常数,因此令

$$K = \frac{K}{C_T C_e \phi^2 - KR}; \quad b = \frac{bC_e \phi}{C_T C_e \phi^2 - KR} \tag{12}$$

则有 $I_{dc} = KV_{dc} + b$ (13)

式(13)表明,只要检测到发电机输出电压 V_{dc} , 求出所对应的控制参考电流 I_{dc} . 通过控制,使得发电机输出电流逼近 I_{dc} ,就可以控制发电机的电磁转矩 - 转速特性符合式(6),从而使得风力机最优运行.至此,我们获得了在额定功率以下风力机最佳叶尖速比运行的实际控制方法。

3 功率调节器的设计

功率调节器的主电路选用加输入滤波的 BUCK 电路,如图 4 所示.采用输入滤波器有如下优点:

- (1) 平滑 BUCK 输入电流,使发电机定子电流连续;
- (2) 限制由于 BUCK 输入端电流脉动产生的 EMI;
- (3) 当输入端电压出现瞬变时,保护变换器及其负载,从而提高系统的可靠性;
- (4) 使采样输入电流变得容易,易于控制输入电流按照控制策略跟随输入电压.

3.1 输入阻尼滤波器的设计

单级 LC 输入滤波器的阻尼因数低,因而效率

高,但是谐振峰值高达两倍的输入电压,使得滤波电容和功率开关处于危险境地.如果给滤波电容串联一个电阻 R_d ,就可提高阻尼因数,并限制谐振峰值.但是,由于大部分脉动电流都要通过 R_d ,因而降低了滤波器的效率.本文采用图 4 中由阻尼滤波器、电阻 R_d 和电容 C_2 串联,再和输入滤波电容并联的方式,可以在一定程度上解决这个矛盾.电阻 R_d 用来限制滤波器截止频率处的输出峰值阻抗, C_2 阻塞了输入电压的直流分量,避免了在 R_d 上的功率耗散^[4].

根据文献[4],最优 $R_{d,opt} = (L_1/C_1)^{1/2}$, $C_2 = 4C_1$.

3.2 控制系统

控制系统结构如图 5 所示,由发电机输出电压 V_{dc} ,按照式(13)可以计算出参考电流 I_{dc} ,它与实际发电机输出电流 I_{act} 的误差输入 PI 补偿器,补偿器的输出去控制开关管 Q_1 的占空比,使得 I_{act} 跟随 V_{dc} 按照控制策略设定值变化.

本文使用三端开关器件电路模型法对系统进行建模,求取了控制输出传递函数,用 MATLAB 仿真后,确定采用 PI 作为补偿器,通过仿真求取合适的 PI 参数,并通过实验进行进一步校正.

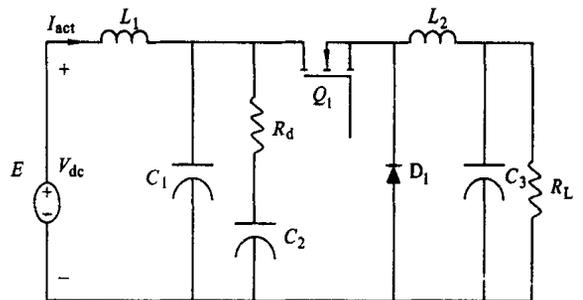


图 4 功率调节器主电路

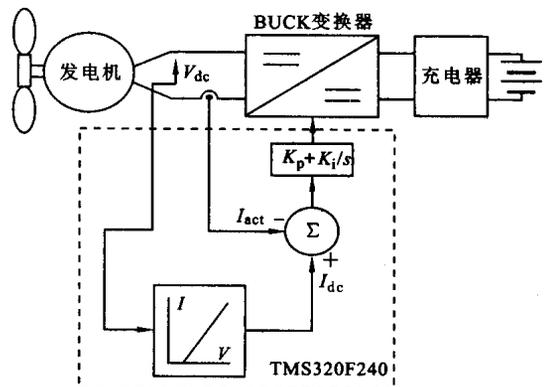


图 5 控制系统结构框图

4 硬件电路实现及其实验结果

4.1 硬件电路

电路参数如下:输入电压为 $0 \sim 56 \text{ V}$ (转速为 $0 \sim 800 \text{ r/min}$), $L_1 = 8 \mu\text{H}$, $C_1 = 660 \mu\text{F}$, $C_2 = 2\,000 \mu\text{F}$, $R_d = 0.12$, Q_1 选用 IRF540N, D_1 选用 MBR20100CT, $L_2 = 65 \mu\text{H}$, $C_3 = 470 \mu\text{F}$, $R_L = 3.9$, 开关频率为 30 kHz . 仿真得到的 PI 参数为 $K_p = 0.3$, $K_i = 477$.

本文采用基于 TMS320F240 的控制器来实现上述控制策略,采样间隔为 $50 \mu\text{s}$.

4.2 实验验证

首先不加调节器,在某一固定风速下,通过调节负载获取在此固定风速下发电机输出的功率-转速曲线,求出此风速下发电机输出的最大功率,在不同风速下获得的最大输出功率如表 1 中 P_1 所示,将此

数据拟合得到图 6 中的虚线.然后,加上功率调节器,在相应的风速下测取发电机输出功率,所得数据如表 1 中 P_2 所示,将此数据拟合得到图 6 中的实线.由图 6 可以看出,在不同风速下,通过功率调节器的调节,风力机可以很好地跟踪其功率最大点.

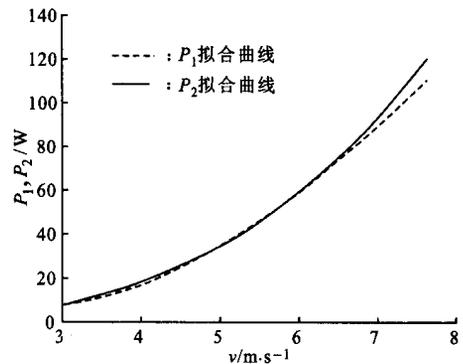


图 6 功率跟踪实验曲线

表 1 最大功率跟踪实验结果

$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3.0	4.0	4.5	5.3	6.0	6.3	6.9	7.5
P_1/W	8.528	15.466	25.714	36.507	51.825	65.216	78.45	96.44
P_2/W	8.788	16.044	25.920	37.908	52.692	65.046	78.01	102.66

5 结论

在由新型无刷直流发电机构成的小型风力发电系统的基础上,提出了一种自动跟踪功率最大点的控制方法.该方法通过控制新型无刷直流发电机的电磁转矩-转速特性,间接控制了风力机的机械转矩-转速特性,使风力机能够自动跟踪其最大功率点.文中阐述了控制方法的推演过程及功率调节器的设计方法,最后对基于 TMS320F240 的功率调节器构成的系统进行实验验证,发现在风速变化的情况下,系统总能很好地跟踪其功率最大点运行,表明了新型控制方法的正确性.

本文所述控制方法,只需检测发电机输出电流和输出电压,实现算法简单,且能够取得满意的跟踪

效果,对提高小型风电系统年发电量有参考和应用价值.

参考文献:

- [1] 勒古里雷斯 D. 风力机的理论与设计[M]. 施鹏飞,译. 北京:机械工业出版社,1985.
- [2] Mukund R P. Wind and solar power system[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [3] 许洪华,倪受元. 独立运行风电机组的最佳叶尖速比控制[J]. 太阳能学报, 1998, 1(19): 30~35.
- [4] Erickson R W. Fundamentals of power electronics[M]. 2nd ed. Norwell, USA: Kluwer Academic, 2001.

(编辑 杜秀杰)