



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104329224 A

(43) 申请公布日 2015. 02. 04

(21) 申请号 201410640389. 6

(22) 申请日 2014. 11. 13

(71) 申请人 湖南世优电气股份有限公司

地址 411101 湖南省湘潭市高新区火炬创新创业园

(72) 发明人 周腊吾 张磊 陈浩 石建

(74) 专利代理机构 湘潭市汇智专利事务所(普通合伙) 43108

代理人 颜昌伟

(51) Int. Cl.

F03D 7/00(2006. 01)

权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统及变桨方法

(57) 摘要

本发明提供了一种直驱型永磁风力发电机组变速率变桨方法,步骤如下:1) 激光测风雷达检测实际风速 V_w;2) 分别得到风速偏差值 ΔV 和功率偏差值 ΔP;3) 判断风速偏差值 ΔV 的大小,若 ΔV<0 则变桨执行机构以变桨速率 V = V_max 变桨到最大迎风角,若 ΔV ≥ 0 则执行下一步骤;4) 对功率偏差值 ΔP 做微分处理,判断 dΔP/dt 值的大小,若 dΔP/dt = 0,变桨执行机构保持当前速度变桨;若 dΔP/dt>0,变桨执行机构加速变桨;若 dΔP/dt<0,变桨执行机构减速变桨。本发明的变桨方法在不同风况下,变桨执行机构都能够快速做出响应,减少了由于功率偏差小幅波动而造成的变桨电机频繁正反转现象的发生,也降低变桨执行机构的疲劳程度,延长了变桨执行机构的使用寿命。本发明还提供一种直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统。



1. 一种直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统,其特征在于:包括激光测风雷达、第一双输入减法器、第二双输入减法器、微分器、主控制器、变桨执行机构、风轮及直驱永磁发电机,所述主控制器包括桨距角控制模块和变速率控制模块,激光测风雷达的输出端与第一双输入减法器的第一输入端相连,第一双输入减法器的第二输入端输入额定风速,第一双输入减法器的输出端与桨距角控制模块的输入端相连,桨距角控制模块的输出端与变桨执行机构的输入端相连,变桨执行机构通过风轮与直驱永磁发电机相连,直驱永磁发电机的输出端与第二双输入减法器的第一输入端相连,第二双输入减法器的第二输入端输入风电机组的额定功率,第二双输入减法器的输出端分别与桨距角控制模块的输入端、微分器的输入端、变速率控制模块的输入端相连,微分器的输出端与变速率控制模块的输入端相连,变速率控制模块的输出端与变桨执行机构的输入端相连。

2. 一种利用如权利要求 1 所述的直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统进行变桨的方法,包括以下步骤:

1) 激光测风雷达检测实际风速 V_w ;

2) 将激光测风雷达检测到的实际风速 V_w 与额定风速 V_{wn} 进行差值运算得到风速偏差值 ΔV , 风速偏差值 ΔV 输入至桨距角控制模块中;检测计算出风电机组输出功率 P_e , 将输出功率 P_e 与额定功率 P_w 进行差值运算得到功率偏差值 ΔP , 功率偏差值 ΔP 输入至桨距角控制模块中;

3) 桨距角控制模块判断风速偏差值 ΔV 的大小,若 $\Delta V < 0$ 则桨距角控制模块输出桨距角位置信号至变桨执行机构,变桨执行机构以变桨速率 $V = V_{max}$ 变桨到最大迎风角,若 $\Delta V \geq 0$ 则执行下一步骤;

4) 对功率偏差值 ΔP 做微分处理并将处理后 $d\Delta P/dt$ 的值和功率偏差值 ΔP 一起送入变速率控制模块中,桨距角控制模块和变速率控制模块协同工作,桨距角控制模块输出桨距角位置信号 θ 至变桨执行机构,变速率控制模块输出变桨速率 V 至变桨执行机构,变速率控制模块判断 $d\Delta P/dt$ 值的大小,若 $d\Delta P/dt = 0$,变桨执行机构保持当前速度变桨至桨距角控制模块指定的桨距角;若 $d\Delta P/dt > 0$,变桨执行机构加速变桨至桨距角控制模块指定的桨距角;若 $d\Delta P/dt < 0$,变桨执行机构减速变桨至桨距角控制模块指定的桨距角。

3. 如权利要求 2 所述的变桨方法,其特征在于:所述步骤 2) 中,风速偏差值等于实际风速减去额定风速,即 $\Delta V = V_w - V_{wn}$ 。

4. 如权利要求 2 所述的变桨方法,其特征在于:所述步骤 2) 中,功率偏差值 ΔP 等于输出功率减去额定功率,即 $\Delta P = P_e - P_w$ 。

5. 如权利要求 2 所述的变桨方法,其特征在于:所述步骤 2) 中,风电机组输出功率计算公式为 $P_e = T_e \omega_e$, 其中 ω_e 为电角频率, $\omega_e = n_p \omega_g$, n_p 为发电极对数, ω_g 为直驱型永磁发电机转速; $T_e = 1.5 n_p i_q \lambda$, i_q 为发电机 q 轴的电流, λ 为永磁体的磁链。

6. 如权利要求 2 所述的变桨方法,其特征在于:所述步骤 2) 中,风电机组额定功率计算公式为 $P_w = T_w \omega_g$, 其中 T_w 为风力机的机械输入转矩, ω_g 为直驱型永磁发电机转速;

$T_w = \frac{1}{2} C_p(\theta, \gamma) \rho \pi R^2 V_w^3 / \gamma$, 其中: ρ 为空气密度; R 为风力机转子半径; θ 为桨距角; 叶尖速比 $\gamma = \omega_g R / V_w$, C_p 为风能利用系数,其表达式为 $C_p(\theta, \gamma) = 0.22[116/\beta - 0.4\theta - 5]$

$\exp(-12.5/\beta)$, 式中 $\beta = 1 / \left(\frac{1}{\gamma + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \right)$ 。

7. 如权利要求 2 所述的变桨方法, 其特征在于: 所述步骤 3) 中, 桨距角 θ 的计算公式为:

$$\theta = \begin{cases} (K_p + \frac{K_i}{S}) * \Delta P & V_w < V_{wn} \\ (K_p + \frac{K_i}{S}) * \Delta P + K_{pi} * (V_{wn} - V_w) & V_w > V_{wn} \end{cases}$$

式中, V_{wn} 为额定风速, K_{pi} 为比例系数, $\frac{1}{S}$ 为积分项, K_p, K_i 分别为桨距角控制模块中 PI 控制器的比例和积分系数。

8. 如权利要求 2 所述的变桨方法, 其特征在于: 所述步骤 4) 中, 变桨速率 V 的确定方法如下: 将功率偏差值 ΔP 分为小、中、大三部分, 将功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 分为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大七个部分, 将功率偏差值 ΔP 和功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 区间范围都用标么值表示, 功率偏差值变化率 ΔP 以发电机的额定功率为基准值, 功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 以 1MW/s 为基准值, 其中, 功率偏差值 ΔP 小的区间范围为 $[0, 0.1]$, 中的区间范围为 $[0.1, 0.2]$, 大的区间范围为 $[0.2, 0.3]$, 功率偏差变化率 $d\Delta P/dt$ 的负大区间范围为 $[-0.1, -0.05]$, 负中的区间范围 $[-0.05, -0.005]$, 负小的区间范围为 $[-0.005, -0.0005]$, 零的区间范围为 $[0.0005, 0.0005]$, 正小的区间范围为 $[0.0005, 0.005]$, 正中的区间范围为 $[0.005, 0.05]$, 正大的区间范围为 $[0.05, 0.1]$ 。当功率偏差变化值 ΔP 为小时, 若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为负大、负中、负小、零中的一种, 则变桨速率为 $V = V_{min}$, 若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为正小、正中、正大中的一种, 则变桨速率为 $V = V_{mid}$; 当功率偏差变化值 ΔP 为中时, 若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为负大、负中中的一种, 则变桨速率为 $V = V_{min}$, 若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为负小、零中的一种, 则变桨速率为 $V = V_{mid}$, 若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为正小、正中、正大中的一种, 则变桨速率为 $V = V_{max}$; 当功率偏差变化值 ΔP 为大时, 不论功率偏差变化率 $d\Delta P/dt$ 为多大, 变桨速率均为 $V = V_{max}$ 。

一种直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统及变桨方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风力发电机组控制领域,特别涉及一种直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统及变桨方法。

背景技术

[0002] 随着全国多个城市雾霾的日益严重,环境污染也越来越受到人们的关注,我国现在发电仍然以火力发电为主,火力发电大量使用煤炭不仅给环境带来严重负担,而且煤炭是不可再生能源,不利于可持续发展的需求。

[0003] 风能作为一种清洁能源越来越受到人们的重视,随着技术的创新,风力发电的成本也在不断降低,风力发电控制系统作为风力发电机组的核心,如何提高风能利用率,保证风力发电机组安全可靠运行,延长风电机组使用寿命是研究人员关注的重点。

[0004] 目前,为了保证外界风速在额定风速以上时风电机组恒功率运行,风电机组的控制系统采用变桨距控制,由于实际风况的复杂性,容易造成发电机输出功率的波动,因此要求变桨距控制系统具有快速响应能力,风机主控制器一旦发出改变桨距角命令,变桨控制器必须控制三台伺服驱动器,使变桨电机以最快速度到达指定位置。现阶段,有研究人员对变速率变桨控制进行了初步研究,在文献“基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制”中采用功率实时反馈,将功率偏差和功率偏差的变化率作为模糊控制算法的输入,输出为变桨速度指令,但是当出现功率偏差较大而功率偏差率较低时,输出变桨速度过低,变桨控制系统无法做出快速响应。文献“兆瓦级风电机组电动变桨距控制系统的研究与实现”对功率偏差信号的大小进行了限制,降低了风电机组输出功率的波动,功率发生变化时变桨机构能够快速响应,但是在额定风速以下,风机输出功率小于额定功率时,采用变速率变桨控制增加了算法的复杂性。

发明内容

[0005] 为了解决上述技术问题,本发明提供一种结构简单、安全可靠的直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统,并提供一种利用直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统进行变桨的方法。

[0006] 本发明解决上述问题的技术方案是:一种直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统,包括激光测风雷达、第一双输入减法器、第二双输入减法器、微分器、主控制器、变桨执行机构、风轮及直驱永磁发电机,所述主控制器包括桨距角控制模块和变速率控制模块,激光测风雷达的输出端与第一双输入减法器的第一输入端相连,第一双输入减法器的第二输入端输入额定风速,第一双输入减法器的输出端与桨距角控制模块的输入端相连,桨距角控制模块的输出端与变桨执行机构的输入端相连,变桨执行机构通过风轮与直驱永磁发电机相连,直驱永磁发电机的输出端与第二双输入减法器的第一输入端相连,第二双输入减法器的第二输入端输入风电机组的额定功率,第二双输入减法器的输出端分别与桨距角控制模块的输入端、微分器的输入端、变速率控制模块的输入端相连,微分器的输出端与变速

率控制模块的输入端相连,变速率控制模块的输出端与变桨执行机构的输入端相连。

[0007] 一种利用上述直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统进行变桨的方法,包括以下步骤:

[0008] 1) 激光测风雷达检测实际风速 V_w ;

[0009] 2) 将激光测风雷达检测到的实际风速 V_w 与额定风速 V_{wn} 进行差值运算得到风速偏差值 ΔV , 风速偏差值 ΔV 输入至桨距角控制模块中;检测计算出风电机组输出功率 P_e , 将输出功率 P_e 与额定功率 P_w 进行差值运算得到功率偏差值 ΔP , 功率偏差值 ΔP 输入至桨距角控制模块中;

[0010] 3) 桨距角控制模块判断风速偏差值 ΔV 的大小,若 $\Delta V < 0$ 则桨距角控制模块输出桨距角位置信号至变桨执行机构,变桨执行机构以变桨速率 $V = V_{max}$ 变桨到最大迎风角,若 $\Delta V \geq 0$ 则执行下一步骤;

[0011] 4) 对功率偏差值 ΔP 做微分处理并将处理后 $d\Delta P/dt$ 的值和功率偏差值 ΔP 一起送入变速率控制模块中,桨距角控制模块和变速率控制模块协同工作,桨距角控制模块输出桨距角位置信号 θ 至变桨执行机构,变速率控制模块输出变桨速率 V 至变桨执行机构,变速率控制模块判断 $d\Delta P/dt$ 值的大小,若 $d\Delta P/dt = 0$,变桨执行机构保持当前速度变桨至桨距角控制模块指定的桨距角;若 $d\Delta P/dt > 0$,变桨执行机构加速变桨至桨距角控制模块指定的桨距角;若 $d\Delta P/dt < 0$,变桨执行机构减速变桨至桨距角控制模块指定的桨距角。

[0012] 上述变桨方法中,所述步骤 2) 中,风速偏差值等于实际风速减去额定风速,即 $\Delta V = V_w - V_{wn}$ 。

[0013] 上述变桨方法中,所述步骤 2) 中,功率偏差值 ΔP 等于输出功率减去额定功率,即 $\Delta P = P_e - P_w$ 。

[0014] 上述变桨方法中,所述步骤 2) 中,风电机组输出功率计算公式为 $P_e = T_e \omega_e$, 其中 ω_e 为电角频率, $\omega_e = n_p \omega_g$, n_p 为发电极对数, ω_g 为发电机转速; $T_e = 1.5n_p i_q \lambda$, i_q 为发电机 q 轴的电流, λ 为永磁体的磁链。

[0015] 上述变桨方法中,所述步骤 2) 中,风电机组额定功率计算公式为 $P_w = T_w \omega_g$, 其中

T_w 为风力机的机械输入转矩, ω_g 为直驱型永磁发电机转速; $T_w = \frac{1}{2} C_p(\theta, \gamma) \rho \pi R^2 V_w^3 / \gamma$,

其中: ρ 为空气密度; R 为风力机转子半径; θ 为桨距角; 叶尖速比 $\gamma = \omega_g R / V_w$, C_p 为风能利用系数,其表达式为 $C_p(\theta, \gamma) = 0.22[116/\beta - 0.4\theta - 5] \exp(-12.5/\beta)$, 式中

$$\beta = 1 / \left(\frac{1}{\gamma + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \right)。$$

[0016] 上述变桨方法中,所述步骤 3) 中,桨距角的计算公式为:

$$[0017] \quad \theta = \begin{cases} (K_p + \frac{K_i}{S}) * \Delta P & V_w < V_{wn} \\ (K_p + \frac{K_i}{S}) * \Delta P + K_{pi} * (V_{wn} - V_w) & V_w > V_{wn} \end{cases}$$

[0018] 式中, V_{wn} 为额定风速, K_{pi} 为比例系数, $\frac{1}{S}$ 为积分项, K_p , K_i 分别为桨距角控制模块中 PI 控制器的比例和积分系数。

[0019] 上述变桨方法中,所述步骤 4) 中,变桨速率 V 的确定方法如下:将功率偏差值 ΔP 分为小、中、大三部分,将功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 分为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大七个部分,将功率偏差值 ΔP 和功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 区间范围都用标么值表示,功率偏差值变化率 ΔP 以发电机的额定功率为基准值,功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 以 1MW/s 为基准值,其中,功率偏差值 ΔP 小的区间范围为 $[0, 0.1]$,中的区间范围为 $[0.1, 0.2]$,大的区间范围为 $[0.2, 0.3]$,功率偏差变化率 $d\Delta P/dt$ 的负大区间范围为 $[-0.1, -0.05]$,负中的区间范围 $[-0.05, -0.005]$,负小的区间范围为 $[-0.005, -0.0005]$,零的区间范围为 $[0.0005, 0.0005]$,正小的区间范围为 $[0.0005, 0.005]$,正中的区间范围为 $[0.005, 0.05]$,正大的区间范围为 $[0.05, 0.1]$ 。当功率偏差变化值 ΔP 为小时,若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为负大、负中、负小、零中的一种,则变桨速率为 $V = V_{\min}$,若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为正小、正中、正大中的一种,则变桨速率为 $V = V_{\text{mid}}$;当功率偏差变化值 ΔP 为中时,若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为负大、负中中的一种,则变桨速率为 $V = V_{\min}$,若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为负小、零中的一种,则变桨速率为 $V = V_{\text{mid}}$,若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为正小、正中、正大中的一种,则变桨速率为 $V = V_{\max}$;当功率偏差变化值 ΔP 为大时,不论功率偏差变化率 $d\Delta P/dt$ 为多大,变桨速率均为 $V = V_{\max}$ 。

[0020] 本发明的有益效果在于:本发明的变桨方法采用桨距角控制模块和变速率控制模块协同工作,分别输出桨距角位置信号和变桨速率至变桨执行机构执行变桨,不同风况下,变桨执行机构都能够快速做出响应,额定风速以下时,变桨执行机构保持最小桨距角不变,使风机吸收实际风功率达到最大,保持最佳叶尖速比;额定风速以上时,根据功率偏差和功率偏差变化率使变桨执行机构加速,匀速或减速运行,其控制算法简单,控制过程平缓,减少了由于功率偏差小幅波动而造成的变桨电机频繁正反转现象的发生,同时也降低变桨执行机构的疲劳程度,延长了变桨执行机构的使用寿命。

附图说明

[0021] 图 1 为本发明变桨系统的结构框图。

[0022] 图 2 为图 1 中变桨执行机构的载荷模型图。

[0023] 图 3 为本发明变桨方法的流程图。

具体实施方式

[0024] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的说明。

[0025] 如图 1 所示,本发明包括激光测风雷达、第一双输入减法器、第二双输入减法器、微分器、主控制器 1、变桨执行机构、风轮及直驱永磁发电机,所述主控制器 1 包括桨距角控制模块和变速率控制模块,激光测风雷达实时检测风速,其输出端与第一双输入减法器的第一输入端相连,第一双输入减法器的第二输入端输入额定风速,第一双输入减法器的输出端与桨距角控制模块的输入端相连,桨距角控制模块的输出端与变桨执行机构的输入端相连,输出桨距角位置信号至变桨执行机构,变桨执行机构通过风轮与直驱永磁发电机相连,直驱永磁发电机的输出端与第二双输入减法器的第一输入端相连,第二双输入减法器的第二输入端输入风电机组的额定功率,第二双输入减法器的输出端分别与桨距角控制模块的输入端、微分器的输入端、变速率控制模块的输入端相连,微分器的输出端与变速率控

制模块的输入端相连,变速率控制模块的输出端与变桨执行机构的输入端相连,输出变桨速率信号至变桨执行机构。

[0026] 在此需要区分变速变桨距控制的概念,本发明的变速率变桨不同于发电机转速调节,而是指变桨电机速率的调节。

[0027] 图2为本发明变桨系统中变桨执行机构载荷模型,风机的载荷主要有轮毂中心的倾覆力矩 M_{top} 和偏航力矩 M_{yaw} ,而倾覆力矩和偏航力矩是由桨叶根部挥舞弯矩 M_{x1} 和 M_{y1} 造成的。采用变速率变桨控制可以减小叶片根部载荷的波动,实现减小风电机组变桨执行机构疲劳载荷的目的。

[0028] 如图3所示,一种利用上述直驱型永磁风力发电机组变速率变桨系统进行变桨的方法,包括以下步骤:

[0029] 1) 激光测风雷达检测实际风速 V_w 。

[0030] 2) 将激光测风雷达检测到的实际风速 V_w 与额定风速 V_{wn} 进行差值运算得到风速偏差值 ΔV , $\Delta V = V_w - V_{wn}$,风速偏差值 ΔV 输入至桨距角控制模块中;检测计算出风电机组输出功率 P_e ,将输出功率 P_e 与额定功率 P_w 进行差值运算得到功率偏差值 ΔP , $\Delta P = P_e - P_w$,功率偏差值 ΔP 输入至桨距角控制模块中;

[0031] 其中: $P_e = T_e \omega_e$,其中 ω_e 为电角频率, $\omega_e = n_p \omega_g$, n_p 为发电机极对数, ω_g 为发电机转速; $T_e = 1.5 n_p i_q \lambda$, i_q 为发电机 q 轴的电流, λ 为永磁体的磁链; $P_w = T_w \omega_g$, P_w 即为图3中风电机组的额定功率 P_w^* ,其中 T_w 为风力机的机械输入转矩, ω_g 为直驱型永磁发电机转速;

$T_w = \frac{1}{2} C_p(\theta, \gamma) \rho \pi R^2 V_w^3 / \gamma$,其中: ρ 为空气密度; R 为风力机转子半径; θ 为桨距角;叶尖速比 $\gamma = \omega_g R / V_w$, C_p 为风能利用系数,其表达式为 $C_p(\theta, \gamma) = 0.22[116/\beta - 0.4\theta - 5] \exp(-12.5/\beta)$,式中 $\beta = 1 / (\frac{1}{\gamma + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1})$ 。

[0032] 3) 桨距角控制模块判断风速偏差值 ΔV 的大小,若 $\Delta V < 0$ 则桨距角控制模块输出桨距角位置信号 θ 至变桨执行机构,变桨执行机构以变桨速率 $V = V_{max}$ 变桨到最大迎风角,若 $\Delta V \geq 0$ 则执行下一步骤;

[0033] 其中桨距角的计算公式为:

$$[0034] \quad \theta = \begin{cases} (K_p + \frac{K_i}{S}) * \Delta P & V_w < V_{wn} \\ (K_p + \frac{K_i}{S}) * \Delta P + K_{pl} * (V_{wn} - V_w) & V_w > V_{wn} \end{cases}$$

[0035] 式中, V_{wn} 为额定风速, K_{pl} 为比例系数, $\frac{1}{S}$ 为积分项, K_p , K_i 分别为桨距角控制模块中 PI 控制器的比例和积分系数。

[0036] 4) 对功率偏差值 ΔP 做微分处理并将处理后 $d\Delta P/dt$ 的值和功率偏差值 ΔP 一起送入变速率控制模块中,桨距角控制模块和变速率控制模块协同工作,桨距角控制模块输出桨距角位置信号 θ 至变桨执行机构,变速率控制模块输出变桨速率 V 至变桨执行机构,变速率控制模块判断 $d\Delta P/dt$ 值的大小,若 $d\Delta P/dt = 0$,变桨执行机构保持当前速度变桨至桨距角控制模块指定的桨距角;若 $d\Delta P/dt > 0$,变桨执行机构加速变桨至桨距角控制模

块指定的桨距角；若 $d\Delta P/dt < 0$ ，变桨执行机构减速变桨至桨距角控制模块指定的桨距角。

[0037] 其中：变桨速率 V 的确定方法如下：将功率偏差值 ΔP 分为小、中、大三部分，将功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 分为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大 七个部分，如表 1 所示，将功率偏差和功率偏差值变化率对应的变桨速率大小制成表格，将功率偏差值 ΔP 和功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 区间范围都用标么值表示，功率偏差值变化率 ΔP 以发电机的额定功率为基准值，功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 以 1MW/s 为基准值，其中，功率偏差值 ΔP 小的区间范围为 $[0, 0.1]$ ，中的区间范围为 $[0.1, 0.2]$ ，大的区间范围为 $[0.2, 0.3]$ ，功率偏差变化率 $d\Delta P/dt$ 的负大区间范围为 $[-0.1, -0.05]$ ，负中的区间范围 $[-0.05, -0.005]$ ，负小的区间范围为 $[-0.005, -0.0005]$ ，零的区间范围为 $[0.0005, 0.0005]$ ，正小的区间范围为 $[0.0005, 0.005]$ ，正中的区间范围为 $[0.005, 0.05]$ ，正大的区间范围为 $[0.05, 0.1]$ 。当功率偏差变化值 ΔP 为小时，若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为负大、负中、负小、零中的一种，则变桨速率为 $V = V_{\min}$ ，若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为正小、正中、正大中的一种，则变桨速率为 $V = V_{\text{mid}}$ ；当功率偏差变化值 ΔP 为中时，若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为负大、负中中的一种，则变桨速率为 $V = V_{\min}$ ，若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为负小、零中的一种，则变桨速率为 $V = V_{\text{mid}}$ ，若功率偏差值变化率 $d\Delta P/dt$ 为正小、正中、正大中的一种，则变桨速率为 $V = V_{\max}$ ；当功率偏差变化值 ΔP 为小时，不论功率偏差变化率 $d\Delta P/dt$ 为多大，变桨速率均为 $V = V_{\max}$ 。

[0038] 表 1

[0039]

$d\Delta P/dt$ ΔP	负大	负中	负小	零	正小	正中	正大
正小	$V=V_{\min}$	$V=V_{\min}$	$V=V_{\min}$	$V=V_{\min}$	$V=V_{\text{mid}}$	$V=V_{\text{mid}}$	$V=V_{\text{mid}}$
正中	$V=V_{\min}$	$V=V_{\min}$	$V=V_{\text{mid}}$	$V=V_{\text{mid}}$	$V=V_{\max}$	$V=V_{\max}$	$V=V_{\max}$
正大	$V=V_{\max}$	$V=V_{\max}$	$V=V_{\max}$	$V=V_{\max}$	$V=V_{\max}$	$V=V_{\max}$	$V=V_{\max}$

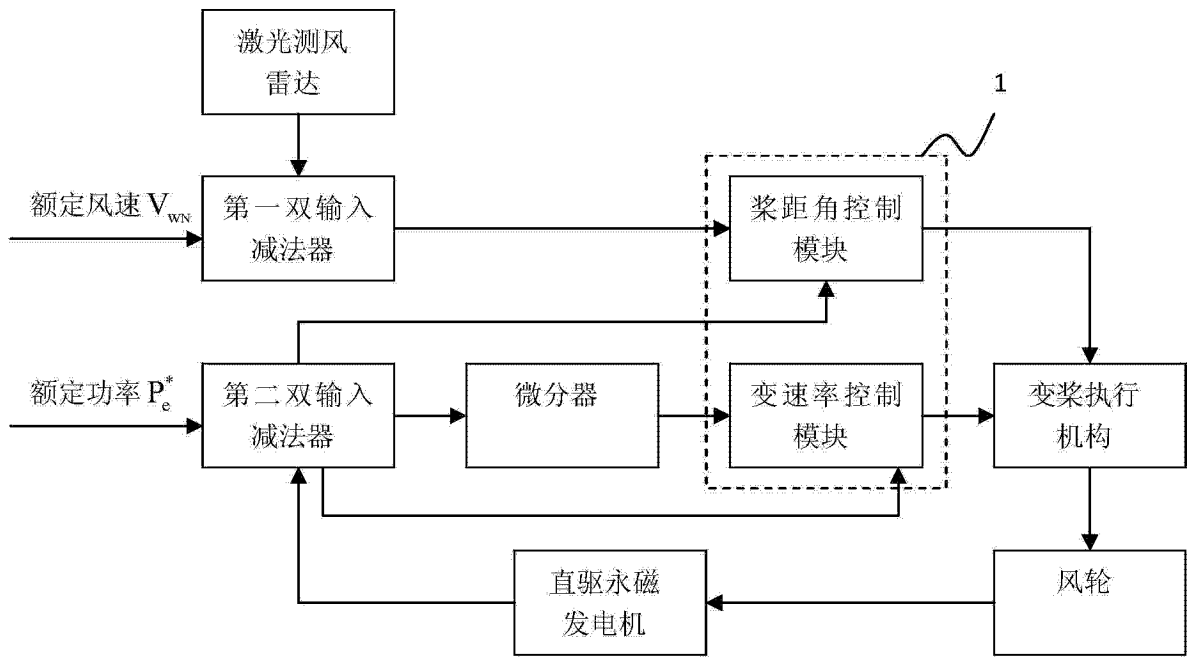


图 1

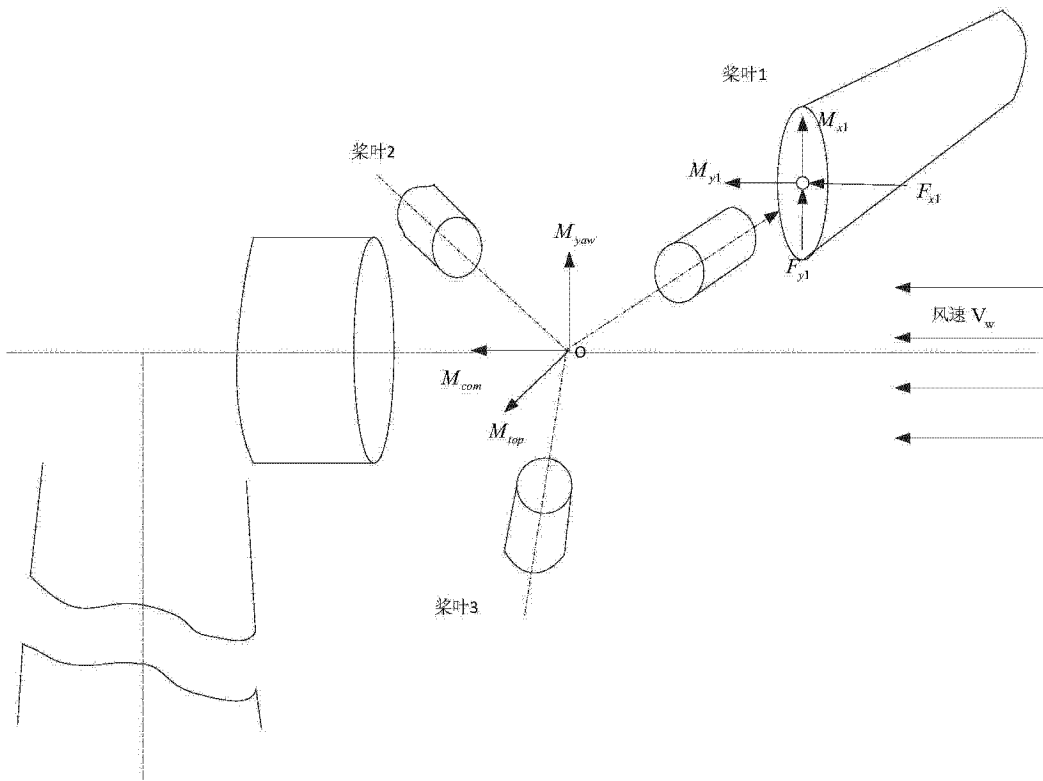


图 2

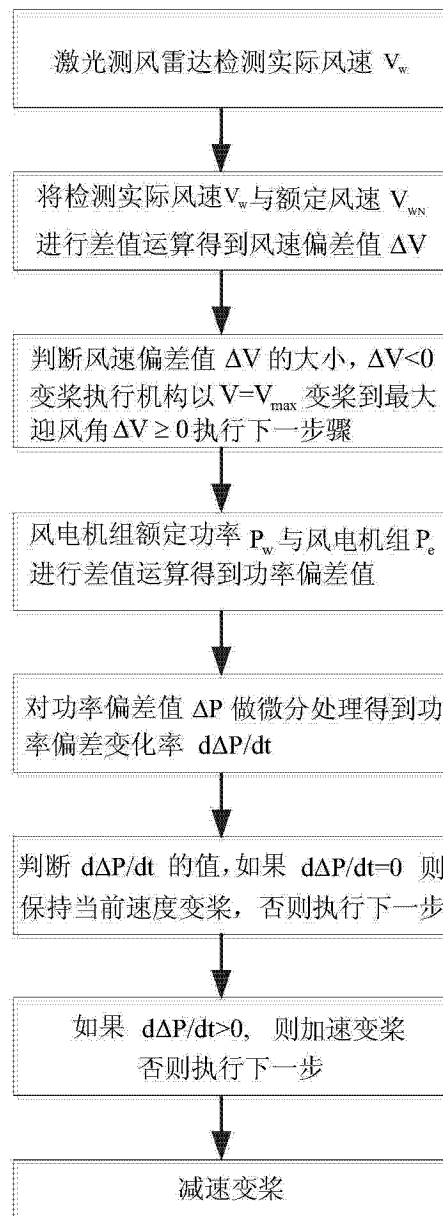


图 3