



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104948385 B

(45)授权公告日 2018.02.09

(21)申请号 201510363542.X

(22)申请日 2015.06.26

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104948385 A

(43)申请公布日 2015.09.30

(73)专利权人 上海交通大学
地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72)发明人 蔡旭 贾锋 李征

(74)专利代理机构 上海汉声知识产权代理有限公司 31236

代理人 徐红银 郭国中

(51)Int.Cl.

F03D 7/00(2006.01)

(56)对比文件

- CN 102562453 A, 2012.07.11,
- CN 1410669 A, 2003.04.16, 全文.
- CN 201526421 U, 2010.07.14, 全文.
- CN 103244350 A, 2013.08.14, 全文.
- EP 2878809 A1, 2015.06.03, 全文.

审查员 朱钰荣

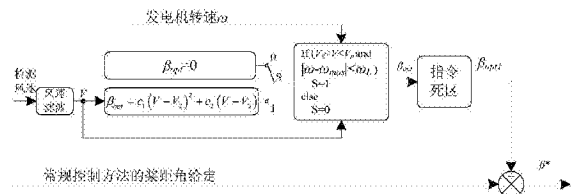
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法

(57)摘要

本发明提供了一种风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法,所述方法是恒额定转速区域通过提前桨距角动作增加发电量,其中:所提高发电量的风速区间是结束MPPT段的风速到额定风速之间这一风速区间;所适用的机组是在额定风速之前到达风力机额定转速的风电机组。本发明方法通过提前变桨控制,在恒额定转速区域通过提前桨距角动作增加发电量,该方法对常规控制方法的变桨控制做小幅修改,变流器控制则无需改动,变桨控制的改进通过修改软件完成,无需增加硬件。



1. 一种风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法,其特征在于,所述方法是恒额定转速区域通过提前桨距角动作增加发电量,其中:所提高发电量的风速区间是结束MPPT段的风速到额定风速之间这一风速区间 $[V_2, V_n]$;所适用的机组是在额定风速 V_n 之前到达风力机额定转速 ω_n 的风电机组,所述额定转速 ω_n 在小于额定风速 V_n 的风速 V_2 到达, ω_n 同时也是风力机组的最高转速 ω_{max} ;

所述变桨控制方法是基于风速检测的变桨控制方法或基于功率查表的变桨控制方法,其中:

所述基于风速检测的变桨控制方法,包括如下步骤:

第一步,检测风速,对检测到的风速信号进行低通滤波得到风速 V ,若风速 V 处于 $[V_2, V_n]$ 风速区间,且发电机转速 ω 满足 $|\omega - \omega_{max}| < \omega_L$, ω_L 设置为0.04倍的标么值,发电机转速的基准值为发电机同步转速, ω_{max} 为风电机组发电运行的最高转速,执行以下步骤:

第二步,根据第一步得到的风速 V ,按照下式计算最优变桨角度 β_{opt} ;

$$\beta_{opt} = c_1 (V - V_2)^2 + c_2 (V - V_2)$$

待定系数 c_1 和 c_2 提供辨识得到;

第三步,对第二步得到的最优变桨角度 β_{opt} 经过指令死区模块输出桨距角指令值 β_{opt1} ;

第四步,将第三步得到的桨距角指令值 β_{opt1} 加上常规控制桨距角指令作为优化后的桨距角指令 β^* ,由风机主控发送至变桨执行机构;

所述基于功率查表的变桨控制方法,包括如下步骤:

步骤一,检测发电机功率,对检测到的发电机功率信号进行低通滤波,若发电机功率大于风速 V_2 对应的稳态功率 P_{v2} 且小于额定功率,且发电机转速 ω 满足 $|\omega - \omega_{max}| < \omega_L$, ω_L 设置为0.04倍的标么值,发电机转速的基准值为发电机同步转速, ω_{max} 为风电机组发电运行的最高转速,执行以下步骤:

步骤二,根据发电机功率查表得到最优变桨角度 β_{opt} ;

所述最优变桨角度 β_{opt} ,采用以下方法确定:检测风速,对检测到的风速信号进行低通滤波得到风速 V ,根据公式 $\beta_{opt} = c_1 (V - V_2)^2 + c_2 (V - V_2)$,待定系数 c_1 和 c_2 提供辨识得到;在确定待定系数 c_1 和 c_2 并已知 $[V_2, V_n]$ 风速区间内发电机稳态功率曲线的基础上,按照一定风速间隔选取 $[V_2, V_n]$ 风速区间内一定数量的离散风速点,根据与这些离散风速点一一对应的发电机稳态功率和 β_{opt} 制作一张关于发电机稳态功率和 β_{opt} 一一对应的表,表中对于不在 V_2 对应稳态功率和 V_n 对应稳态功率之间的功率对应的 β_{opt} 为0;实现时根据实时测量得到的发电机功率通过查表和线性插值获取 β_{opt} ;

步骤三,对第二步得到的最优变桨角度 β_{opt} 经过指令死区模块输出桨距角指令值 β_{opt1} ;

步骤四,将第三步得到的桨距角指令值 β_{opt1} 加上常规控制桨距角指令作为优化后的桨距角指令 β^* ,由风机主控发送至变桨执行机构。

2. 根据权利要求1所述的风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法,其特征在于,所述基于风速检测的变桨控制方法中:所述待定系数 c_1 和 c_2 通过离线辨识方法得到,具体为:在专业风电仿真软件中对 $[V_2, V_n]$ 风速区间内某一风速分别设定不同桨距角大小,比较不同桨距角下的功率输出,输出功率最大所对应的桨距角即为该风速下的 β_{opt} ,选取 $[V_2, V_n]$ 风速区间内的其他风速点采用同样的方法分别确定出各自对应的 β_{opt} ,通过参数拟合得到待定系数 c_1 和 c_2 。

3. 根据权利要求1所述的风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法,其特征在于,所述基于风速检测的变桨控制方法中:确定最优变桨角度 β_{optt} 时,为避免桨距角频繁动作,对检测到的风速信号进行低通滤波处理得到风速 V ,对于上述公式计算得到的 β_{opt} 需要设定指令死区,即经过指令死区模块。

4. 根据权利要求1-3任一项所述的风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法,其特征在于,所述基于风速检测的变桨控制方法中:所述指令死区模块,其功能由受指令死区阈值 β_{dz} 控制的保持器实现,如果保持器输出 β_{optt1} 与最优变桨角度 β_{opt} 差值的绝对值大于 β_{dz} ,则保持器输出当前的最优变桨角度 β_{opt} ;否则保持器处于保持状态,输出上一时刻的 β_{opt1} 。

5. 根据权利要求1所述的风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法,其特征在于,所述基于功率查表的变桨控制方法中:所述待定系数 c_1 和 c_2 通过离线辨识方法得到,具体为:在专业风电仿真软件中对 $[V_2, V_n]$ 风速区间内某一风速分别设定不同桨距角大小,比较不同桨距角下的功率输出,输出功率最大所对应的桨距角即为该风速下的 β_{opt} ,选取 $[V_2, V_n]$ 风速区间内的其他风速点采用同样的方法分别确定出各自对应的 β_{opt} ,通过参数拟合得到待定系数 c_1 和 c_2 。

风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风力发电技术领域,具体地,涉及一种风电机组恒额定转速区域通过提前桨距角动作增加发电量的控制方法。

背景技术

[0002] 双馈风电机组受限于变流器容量,通常将机组转差率限定在 ± 0.3 之内。现有双馈机组在额定风速 V_n 之前(假定为 V_2)到达额定转速 ω_n ,此后转速基本恒定或在较小的范围内变化运行,现有技术桨距角则在到达额定风速前不予动作,这种运行控制策略导致了在 $[V_2, V_n]$ 风速区间内机组发电量存在一定提升空间。

[0003] 检索中发现现有技术有不少关于风电机组的变桨控制方法,比如中国专利申请号为201410171828.3的发明专利,该专利公开一种变速恒频风电机组变速变桨距联合控制方法,“该控制方法引入最优转速估计值以及转速参考值分别作为转速控制与变桨距控制的参考量,转速PID控制器根据最优转速估计值与风电机组额定转速的偏差进行转矩指令调节,变桨距PID控制器根据转速参考值与机组额定转速的偏差进行桨距角指令调节,实现转速控制与变桨距控制之间的解耦控制,避免转速控制与变桨距控制之间的干扰。当风速在额定值附近波动、风电机组捕获的气动功率大于额定功率时,气动功率估计值对应的转速参考值大于风电机组额定转速,变桨距PID控制器在转速PID控制器输出的转矩指令达到额定值之前调节桨距角指令,变速变桨超前联合控制,抑制机组转速和输出功率的超调。”

[0004] 但是上述技术仍旧没有考虑到机组发电量在 $[V_2, V_n]$ 风速区间内的提升问题。现有技术 $[V_2, V_n]$ 风速区间将桨距角设为某一恒定值(通常为0度),机组发电量存在一定提升空间。

发明内容

[0005] 针对现有技术中的缺陷,本发明的目的是提供一种风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法,通过提前变桨控制,提高了风力机气动转矩,从而在所述风速区域提高发电量。

[0006] 为实现以上目的,本发明提供一种风电机组恒额定转速区域提高发电量的变桨控制方法,所述方法是恒额定转速区域通过提前桨距角动作增加发电量,该方法对常规控制方法的变桨控制做小幅修改,变流器控制则无需改动,变桨控制的改进通过修改软件完成,无需增加硬件;其中:所提高发电量的风速区间是结束MPPT(最大功率点跟踪)段的风速到额定风速之间这一风速区间 $[V_2, V_n]$;所适用的机组是在额定风速 V_n 之前到达风力机额定转速 ω_n 的风电机组。所述额定转速 ω_n 在小于额定风速 V_n 的风速 V_2 到达, ω_n 同时也是风力机组的最高转速 ω_{max} 。

[0007] 本发明所述变桨控制方法,是一种基于风速检测的变桨控制方法,包括如下步骤:

[0008] 第一步,检测风速,对检测到的风速信号进行低通滤波得到风速 V ,若风速 V 处于 $[V_2, V_n]$ 风速区间,且发电机转速 ω 满足 $|\omega - \omega_{max}| < \omega_L$, ω_L 设置为0.04倍的标么值,发电机

转速的基准值为发电机同步转速, ω_{\max} 为风电机组发电运行的最高转速,执行以下步骤:

[0009] 第二步,根据第一步得到的风速 V ,按照下式计算最优变桨角度 β_{opt} :

$$[0010] \quad \beta_{\text{opt}} = c_1 (V - V_2)^2 + c_2 (V - V_2)$$

[0011] 待定系数 c_1 和 c_2 可以辨识得到; V_2 为额定风速 V_n 之前的风速;

[0012] 第三步,对第二步得到的最优变桨角度 β_{opt} 经过指令死区模块输出桨距角指令值 $\beta_{\text{opt}1}$ 。

[0013] 第四步,将第三步得到的桨距角指令值 $\beta_{\text{opt}1}$ 加上常规控制桨距角指令作为优化后的桨距角指令 β^* ,由风机主控发送至变桨执行机构。

[0014] 本发明在 $[V_2, V_n]$ 风速区间根据上述公式提前动作桨距角,从而提高 $[V_2, V_n]$ 风速区间的气动转矩,从而提高发电量。

[0015] 优选地,所述待定系数 c_1 和 c_2 通过离线辨识方法得到,具体为:在专业风电仿真软件中对 $[V_2, V_n]$ 风速区间内某一风速分别设定不同桨距角大小,比较不同桨距角下的功率输出,输出功率最大所对应的桨距角即为该风速下的 β_{opt} ,选取 $[V_2, V_n]$ 风速区间内的其他风速点采用同样的方法分别确定出各自对应的 β_{opt} ,通过参数拟合得到待定系数 c_1 和 c_2 。

[0016] 优选地,确定最优变桨角度 β_{opt} 时,为避免桨距角频繁动作,对检测到的风速信号进行低通滤波处理得到 V ,对于上述公式计算得到的 β_{opt} 需要设定指令死区,即经过指令死区模块。

[0017] 优选地,指令死区模块的功能由受指令死区阈值 β_{dz} 控制的保持器实现,如果保持器输出 $\beta_{\text{opt}1}$ 与最优变桨角度 β_{opt} 差值的绝对值大于 β_{dz} ,则保持器输出当前的最优变桨角度 β_{opt} ;否则保持器处于保持状态,输出上一时刻的 $\beta_{\text{opt}1}$ 。

[0018] 本发明所述变桨控制方法,是一种基于功率查表的变桨控制方法,包括如下步骤:

[0019] 步骤一,检测发电机功率,对检测到的发电机功率信号进行低通滤波,若发电机功率大于风速 V_2 对应的稳态功率 P_{V_2} 且小于额定功率,且发电机转速 ω 满足 $|\omega - \omega_{\max}| < \omega_L$, ω_L 设置为0.04倍的标么值,发电机转速的基准值为发电机同步转速, ω_{\max} 为风电机组发电运行的最高转速,执行以下步骤:

[0020] 步骤二,根据发电机功率查表得到最优变桨角度 β_{opt} ;

[0021] 步骤三,对第二步得到的最优变桨角度 β_{opt} 经过指令死区模块输出桨距角指令值 $\beta_{\text{opt}1}$;

[0022] 步骤四,将第三步得到的桨距角指令值 $\beta_{\text{opt}1}$ 加上常规控制桨距角指令作为优化后的桨距角指令 β^* ,由风机主控发送至变桨执行机构。

[0023] 优选地,另外考虑到风速测量准确性问题,在对机组特性十分清楚的情况下,所述最优变桨角度 β_{opt} ,采用以下方法确定:检测风速,对检测到的风速信号进行低通滤波得到风速 V ,根据公式 $\beta_{\text{opt}} = c_1 (V - V_2)^2 + c_2 (V - V_2)$,待定系数 c_1 和 c_2 提供辨识得到;在确定待定系数 c_1 和 c_2 并已知 $[V_2, V_n]$ 风速区间内发电机稳态功率曲线的基础上,按照一定风速间隔选取 $[V_2, V_n]$ 风速区间内一定数量的离散风速点,根据与这些离散风速点一一对应的发电机稳态功率和 β_{opt} 制作一张关于发电机稳态功率和 β_{opt} 一一对应的表,表中对于不在 V_2 对应稳态功率和 V_n 对应稳态功率之间的功率对应的 β_{opt} 为0;实现时根据实时测量得到的发电机功率通过查表和线性插值获取 β_{opt} 。

[0024] 与现有技术相比,本发明具有如下的有益效果:

[0025] 本发明方法通过提前变桨控制,在恒额定转速区域通过提前桨距角动作增加发电量,该方法对常规控制方法的变桨控制做小幅修改,变流器控制则无需改动,变桨控制的改进通过修改软件完成,无需增加硬件。

附图说明

[0026] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述,本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显:

[0027] 图1为本发明一实施例适用机组的典型运行控制策略;

[0028] 图2为本发明一实施例的实现方法框图;

[0029] 图3为本发明一实施例指令死区模块示意图;

[0030] 图4为本发明一实施例在风速为9m/s的验证图;

[0031] 图5为本发明一实施例在风速为9.5m/s的验证图;

[0032] 图6为本发明一实施例在动态风速下的验证,其中:图(a)为实施例所采用的风速,图(b)为桨距角,图(c)为发电机电功率。

具体实施方式

[0033] 下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明,但不以任何形式限制本发明。应当指出的是,对本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变形和改进。这些都属于本发明的保护范围。

[0034] 如图1所示,本发明是对现有常规控制方法在机组特定运行范围内的优化和补充,现有机组通常在小于额定风速 V_n 的风速 V_2 即达到额定转速 ω_n ,此额定转速同时也是机组的最高转速 ω_{max} 。本发明的基本内容是恒额定转速区域通过提前桨距角动作增加发电量的控制方法,仅需对常规控制方法的变桨控制做小幅修改,变流器控制则无需改动,变桨控制的改进通过修改软件完成,无需增加硬件。具体而言,所提高发电量的风速区间是结束MPPT段的风速到额定风速之间这一风速区间 $[V_2, V_n]$,所适用的机组是在额定风速之前到达风力机额定转速的风电机组。特别说明本发明提高的是风力机这一原动力的出力,适用对象是根据风力机是否在额定风速之前到达风力机额定转速来决定的,与发电机类型及电气拓扑无关。

[0035] 以下将就本发明的原理进行阐述。

[0036] 风电机组最大功率跟踪就是要最大限度获取风力机气动功率,由于机组在 $[V_2, V_n]$ 风速区间恒转速运行,则 $[V_2, V_n]$ 风速区间的最大气动功率跟踪问题可转化为最大气动转矩跟踪问题。水平轴风力机的气动转矩 T_a 可以用切向力系数 C_t 来描述,

$$[0037] \quad T_a = \int_{r_0}^R 0.5 \rho B W^2 C_t r dr \quad (1)$$

[0038] ρ 为空气密度, B 为桨叶个数, W 为叶素上的合成风速, l 为桨叶弦长, r 为叶素所在半径, r_0 为轮毂半径, R 为叶尖处半径, dr 是积分微元,其中,

$$[0039] \quad C_t = C_l(i) \sin I - C_d(i) \cos I \quad (2)$$

[0040] 式中 C_l 为升力系数, C_d 为阻力系数, I 为入流角, C_l 、 C_d 随攻角 i 变化,某典型机组升、

阻力系数随攻角*i*变化的曲线可近似表示如下(考虑到风力机在正常发电运行状态攻角的变化范围,这里仅给出了攻角*i*在0~10度之间的规律):

$$[0041] \quad C_d = \begin{cases} C_{d0} + k_{cd}(i-i_0); & i_0 < i < i_1 \\ C_{d0}; & 0 < i \leq i_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$[0042] \quad C_l = k_{cl}i; 0 < i < i_1 \quad (4)$$

[0043] k_{cd} 是阻力系数随攻角*i*变化的变化率, k_{cl} 是升力系数随攻角*i*变化的变化率。其中 C_{d0} 的典型值为0.005, k_{cd} 的典型值为0.07878, k_{cl} 的典型值是7.21927, i_0 的典型值是0.0384弧度, i_1 的典型值是0.1745弧度。上述典型值来源于某5MW机组。

$$[0044] \quad I = \arctan \frac{(1-a)V}{(1+b)\omega R} = \arctan \left(\frac{1-a}{1+b} \frac{1}{\lambda} \right) \quad (5)$$

$$[0045] \quad i = I - \beta \quad (6)$$

[0046] 式中 β 为桨距角, a 为大型风电机组轴向诱导因子, b 为大型风电机组周向诱导因子, ω 为风力机转速, λ 为叶尖速比, V 为风速。

[0047] 由于 v_2 是MPPT段和恒最低转速段的分界点,需要借助风速为 V_2 时的转矩系数 C_{tv2} 进行分析,假定风速 V_2 时采用常规控制在气动稳态下 a 和 b 分别为 a_{v2} 和 b_{v2} ,记该状态下的入流角

$$[0048] \quad I \approx \frac{(1-a_{v2})V_2}{(1+b_{v2})\omega_{\max} R} = kV_2 \quad (7)$$

[0049] 若采用常规机组控制,桨距角恒定为 β_0 (通常为0度),记风速为 V_2 时的 C_{tv2} 如式(8)所示

$$[0050] \quad C_{tv2} \approx C_{lv2} kV_2 - C_{dv2} \quad (8)$$

[0051] 式(7)、(8)考虑到入流角 I 很小,从而 $\sin I \approx I$, $\cos I \approx 1$,并据此做出了简化,式中 C_{lv2} 和 C_{dv2} 分别是风速 V_2 下的升力系数和阻力系数。

[0052] 风速变化、转速变化和桨距角变化均会导致 a 和 b 变化,但是三者的小幅变化对 a 和 b 变化的影响是微弱的。则在 V_2 附近足够小的邻域内可假定 a 和 b 保持与风速 V_2 时相同。现假设一个略大于 V_2 的风速 $v_0 = V_2 + dv$,假设 dv 足够小,则此时入流角 I 可以简化为

$$[0053] \quad I \approx \frac{(1-a_{v2})v_0}{(1+b_{v2})\omega_{\max} R} = kv_0 \quad (9)$$

[0054] 攻角

$$[0055] \quad i = I - \beta \approx kv_0 - \beta \quad (10)$$

[0056] 若采用常规机组控制在 $[V_2, V_n]$ 风速区间将桨距角设为0,考虑正常运行状态中 $i > i_0$,则风速 v_0 下的切向力系数 C_t 可计算如下:

$$[0057] \quad \begin{aligned} C_t &= C_l(i) \sin I - C_d(i) \cos I \\ &\approx (C_{lv2} + kdvk_{cl})k(V_2 + (v_0 - V_2)) - (C_{dv2} + kdvk_{cd}) \\ &\approx C_{lv2} kV_2 - C_{dv2} + kdv(k_{cl}kv_0 - k_{cd}) + kdvC_{lv2} \\ &= C_{lv2} + kdv(k_{cl}kv_0 - k_{cd}) + kdvC_{lv2} \end{aligned} \quad (11)$$

[0058] 根据式(2)、(6),在 V_2 附近足够小的风速左邻域内:

$$[0059] \quad \frac{dC_t}{d\beta} = k_{cd} - k_{cl}kV \quad (12)$$

[0060] 由于 V_2 对应于MPPT段,该风速下常规桨距角(0度)为最优值,则有

$$[0061] \quad \left. \frac{dC_t}{d\beta} \right|_{\substack{V=V_2 \\ \beta=0}} = k_{cd} - k_{cl}kV_2 = 0 \quad (13)$$

[0062] 由于 k_{cd} 、 k_{cl} 及 k 均大于0,根据式(13),则 v_0 略大于 V_2 时,

$$[0063] \quad k_{cd} - k_{cl}kv_0 < 0 \quad (14)$$

[0064] 可见式(11)等式右边第二项在风速略大于 V_2 时对切向力系数有正面作用。若在 $[V_2, V_n]$ 风速区间采用变桨控制,假设变桨角度 $\Delta\beta$,则

$$[0065] \quad C_t = C_{t_0} + (kdv - \Delta\beta)(k_{cl}kV - k_{cd}) + kdvC_{t_0} \quad (15)$$

[0066] dv 代表风速小幅增量。

[0067] 可见桨距角负调一定角度可以提高式(11)等式右边第二项的正面作用,从而提高切向力系数达到增大气动转矩增加发电量的目的。由于变桨存在非线性特性,本发明方案在特定风速下存在一个最优变桨角度。

[0068] 假设大于 V_2 的某一特定风速 v_{01} 下的最优桨距角为 β_{01} ,并假设该风速下对应于式(7)中的系数 k 发生一定量变后变化为 k' ,则

$$[0069] \quad \left. \frac{dC_t}{d\beta} \right|_{\substack{V=v_{01} \\ \beta=\beta_{01}}} = k_{cd} - k_{cl}k'v_{01} = 0 \quad (16)$$

[0070] 则在略大于 v_{01} 的风速 v_{02} ,

$$[0071] \quad \left. \frac{dC_t}{d\beta} \right|_{\substack{V=v_{02} \\ \beta=\beta_{01}}} = k_{cd} - k_{cl}k'v_{02} < 0 \quad (17)$$

[0072] 式(16)、(17)表明,在风速 v_{01} 最优桨距角 β_{01} 的基础上进一步减小桨距角可以增加风速 v_{02} 下的 C_t ,即随风速减小 β_{opt} 减小。

[0073] 以上对本方案的原理性陈述结果表明:1.在 $[V_2, V_n]$ 风速区间内,合理的正调桨可以提高发电量,该结论表明了变桨的方向;2. $[V_2, V_n]$ 风速区间内某一特定风速下存在一个对应的最优桨距角 β_{opt} ;3.随风速减小,特定风速下的 β_{opt} 单调减小。

[0074] 上述结论表明了变桨的方向和最优变桨角度随风速的单调性关系,属于定性的说明,特定风速下的最优变桨角度 β_{opt} 仍难以直接定量。即便如此,根据上述定性结论可做出如下合理假定(考虑到风速为 V_2 时最优桨距角为0):

$$[0075] \quad \beta_{opt} = c_1(V - V_2)^2 + c_2(V - V_2) \quad (18)$$

[0076] 对于式(18)中的待定系数 c_1 和 c_2 可以辨识得到。一种离线辨识方法是在专业风电仿真软件中对 $[V_2, V_n]$ 风速区间内某一风速分别设定不同桨距角大小,比较不同桨距角下的功率输出,输出功率最大所对应的桨距角即为该风速下的 β_{opt} 。选取 $[V_2, V_n]$ 风速区间内的其他风速点采用同样的方法分别确定出各自对应的 β_{opt} ,建议获取4组以上 V 和 β_{opt} 对应的数据,通过参数拟合得到式(18)中的 c_1 和 c_2 。

[0077] 本发明在 $[V_2, V_n]$ 风速区间根据式(18)提前动作桨距角,从而提高 $[V_2, V_n]$ 风速区

间的气动转矩,从而提高发电量。需要指出的是,虽然本发明方案中所述 $[V_2, V_n]$ 风速区间与大于 V_n 风速段的变桨方向相反,但由于本发明方案中改进的变桨控制是开环的桨距指令,而常规控制方法在大于 V_n 风速段的变桨控制是基于转速检测和功率检测的闭环控制,在转速超限或功率超限后变桨的闭环控制会自动触发并占主导地位,因此无需额外考虑变桨的切换控制。

[0078] 根据式(18)确定 β_{opt} 时,为避免桨距角频繁动作,对检测到的风速信号进行低通滤波处理得到 V ,对于式(18)计算得到的 β_{opt} 需要设定指令死区。如图2所示,为本发明的实现方法流程。

[0079] 所述指令死区模块,其功能由受指令死区阈值 β_{dz} 控制的保持器实现,如图3所示。如果保持器输出 β_{opt1} 与最优变桨角度 β_{opt} 差值的绝对值大于 β_{dz} ,则保持器输出当前的最优变桨角度 β_{opt} ;否则保持器处于保持状态,输出上一时刻的 β_{opt1} 。

[0080] 另外考虑到风速测量准确性问题,在对机组特性十分清楚的情况下,提供以下替代计算 β_{opt} 的方法:在确定式(18)中待定系数并已知 $[V_2, V_n]$ 风速区间内发电机稳态功率曲线的基础上,按照一定风速间隔选取 $[V_2, V_n]$ 风速区间内一定数量的离散风速点(建议10组以上),根据与这些离散风速点一一对应的发电机稳态功率和 β_{opt} 制作一张关于发电机稳态功率和 β_{opt} 一一对应的表(表中对于不在 V_2 对应稳态功率和 V_n 对应稳态功率之间的功率对应的 β_{opt} 为0)。实现时根据实时测量得到的发电机功率通过查表和线性插值获取 β_{opt} 。

[0081] 本发明方案是对常规方法在机组特定运行范围内的优化和补充。根据所述的内容,在离线确定式(18)中待定系数 c_1 和 c_2 的基础上:

[0082] 本发明基于风速检测的变桨控制方法为:

[0083] 第一步.检测风速,对检测到的风速信号进行低通滤波得到风速 V ,若风速 V 处于 $[V_2, V_n]$ 风速区间,执行以下步骤。

[0084] 第二步.根据第一步得到的风速 V ,按照式(18)计算最优变桨角度 β_{opt} ;

[0085] 第三步.对第二步得到的最优变桨角度 β_{opt} 经过指令死区模块输出桨距角指令值 β_{opt1} 。

[0086] 第四步.将第三步得到的桨距角指令值 β_{opt1} 加上常规控制桨距角指令作为优化后的桨距角指令 β^* ,由风机主控发送至变桨执行机构。

[0087] 另外,本发明基于功率查表的变桨控制方法为:

[0088] 第一步.检测发电机功率,对检测到的发电机功率信号进行低通滤波,若发电机功率大于风速 V_2 对应的稳态功率 P_{v2} 且小于额定功率,执行以下步骤;

[0089] 第二步.根据发电机功率查表得到最优变桨角度 β_{opt} ;

[0090] 第三步.对第二步得到的最优变桨角度 β_{opt} 经过指令死区模块输出桨距角指令值 β_{opt1} 。

[0091] 第四步.将第三步得到的桨距角指令值 β_{opt1} 加上常规控制桨距角指令作为优化后的桨距角指令 β^* ,由风机主控发送至变桨执行机构。

[0092] 本发明经过专业风电软件Bladed进行了模拟,模拟结果证明可行,且本发明所述桨距角确定方法是有效的。

[0093] 本发明在一台商用1.5MW机组上进行多组仿真验证,该机组桨叶半径 R 为43米, V_2 为8m/s,额定风速 V_n 为10m/s,风力机额定转速1.8rad/s。

[0094] 在Bladed中经过二分逼近法反复试凑,得出风速8.5m/s时的 β_{opt} 为-0.5度、风速8.8m/s时的 β_{opt} 为-0.8度、9.2m/s时的 β_{opt} 为-1.2度、9.8m/s时的 β_{opt} 为-1.8度。根据这四组数据确定出式(17)中的待定系数为 $c_1=0, c_2=-1$ 。

[0095] 此后仿真中 $[V_{cutin}, v_1]$ 风速区间的 β_{opt} 由式(18)确定,部分仿真结果如下:

[0096] 如图4所示,本发明在9m/s风速下的验证。风速为9m/s的情况,根据式(17)计算得到 β_{opt} 为-1.0度,采用本发明方法与常规方法(桨距角0度)的对比如下,可见该风速下功率相比于常规控制提高约10.5kW。

[0097] 如图5所示,本发明在9.5m/s风速下的验证,风速为9.5m/s的情况,根据式(17)计算得到 β_{opt} 为-1.5度,采用本发明方法与常规方法的对比如下,可见该风速下功率相比于常规控制提高约为19.8kW。

[0098] 本发明方案也在动态风速下进行了验证,验证中仍然采用式(18)计算 β_{opt} ,采用基于风速检测的实现方法进行验证。选取恒最高转速段风速如图6(a)所示,采用本发明所提出的技术与常规控制仿真对比结果如图6所示。

[0099] 本发明可以在现有技术的基础上提高 $[V_2, V_n]$ 风速区间的发电量。本发明仅仅需要在现有变桨控制策略基础上做出小幅修改,无需增加额外硬件装置。

[0100] 以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是,本发明并不局限于上述特定实施方式,本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改,这并不影响本发明的实质内容。

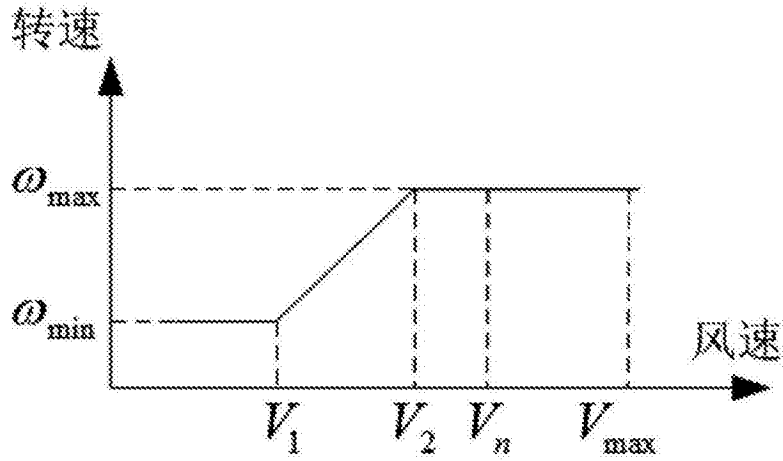


图1

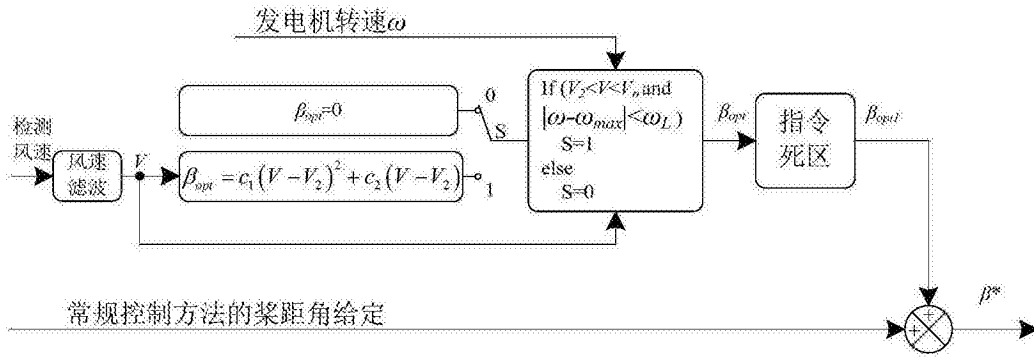


图2

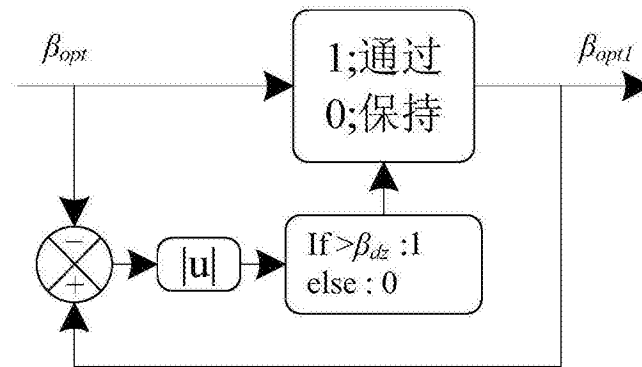


图3

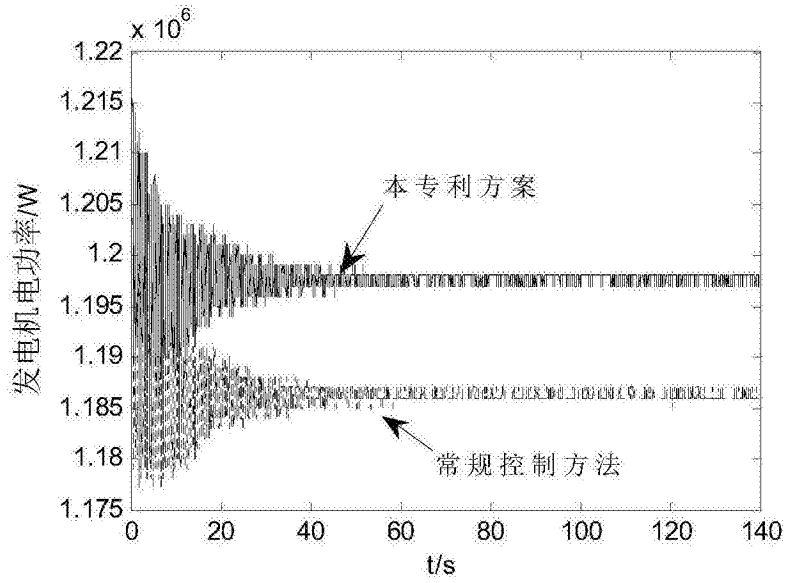


图4

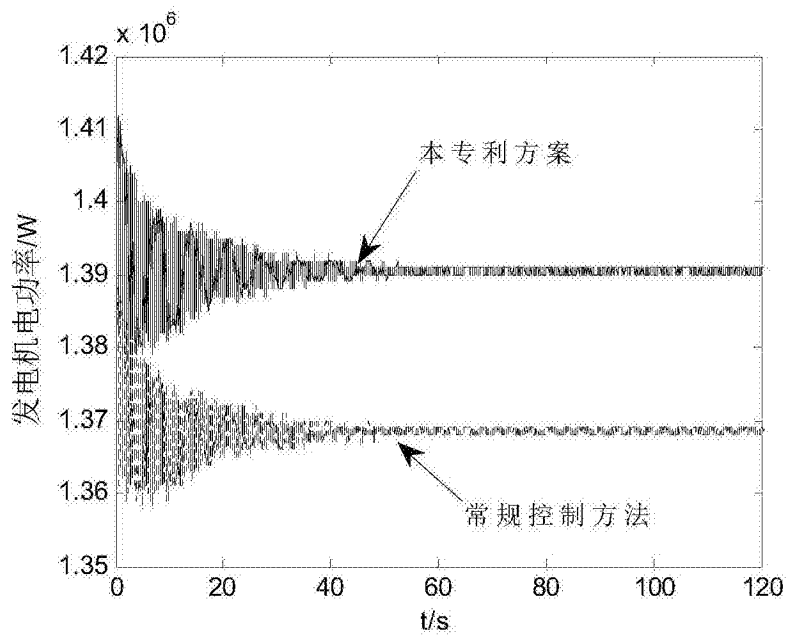
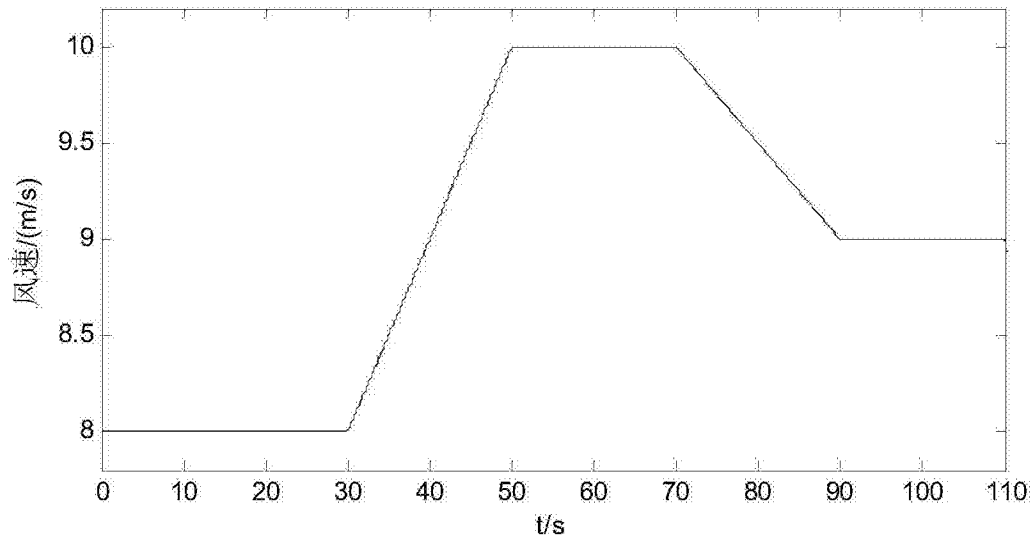
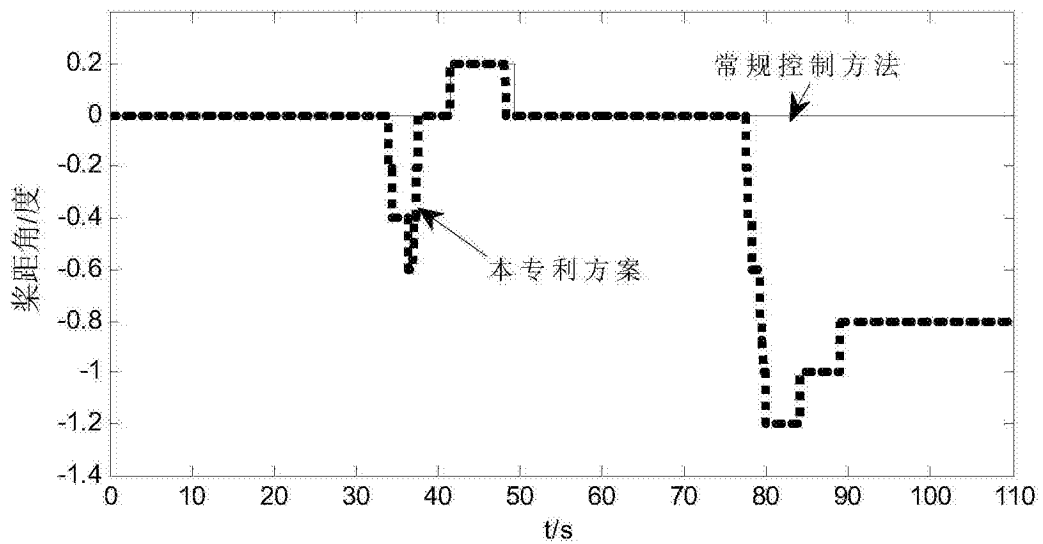


图5



(a)



(b)

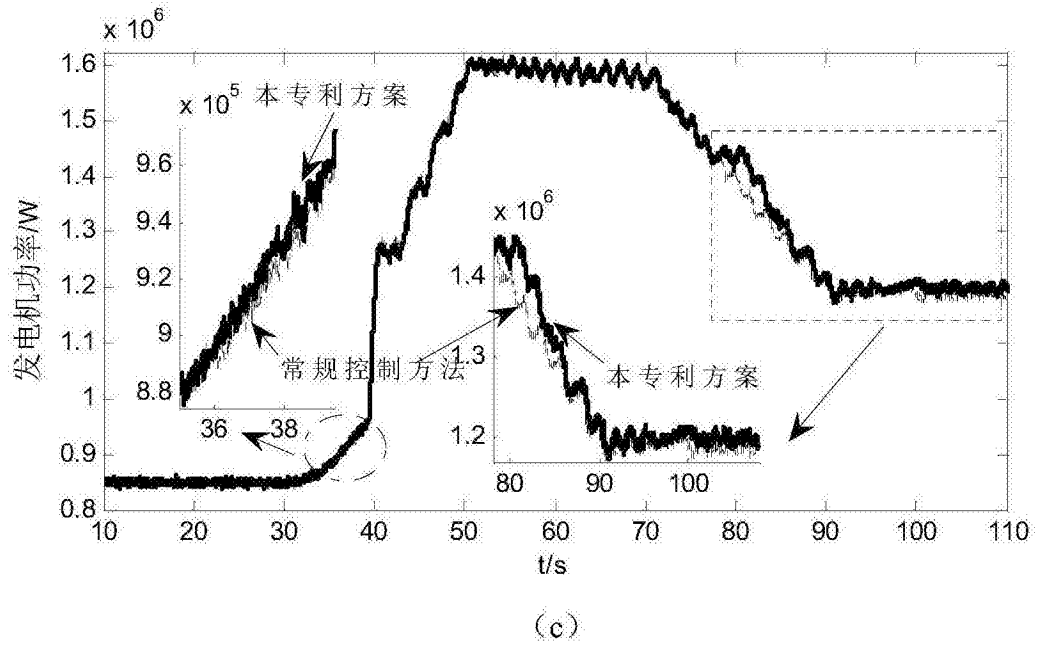


图6