



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103939286 B

(45)授权公告日 2017.08.04

(21)申请号 201410171828.3

(22)申请日 2014.04.25

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 103939286 A

(43)申请公布日 2014.07.23

(73)专利权人 中国科学院电工研究所
地址 100190 北京市海淀区中关村北二条6号

(72)发明人 胡书举 李丰林 邓雅

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责任公司 11251

代理人 关玲

(51)Int.Cl.
F03D 7/00(2006.01)

(56)对比文件

- CN 102155356 A, 2011.08.17,
- CN 102518555 A, 2012.06.27,
- CN 103362738 A, 2013.10.23,
- CN 101660489 A, 2010.03.03,
- CN 101900080 A, 2010.12.01,
- US 4339666 A, 1982.07.13,
- CN 102996335 A, 2013.03.27,
- CN 101404476 A, 2009.04.08,
- CN 102777320 A, 2012.11.14,
- US 4160170 A, 1979.07.03,

审查员 赵银凤

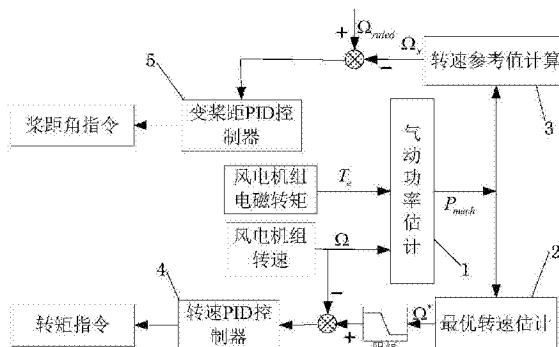
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

变速恒频风电机组变速变桨距联合控制方法

(57)摘要

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。



1. 一种变速恒频风电机组变速变桨距联合控制方法,其特征是,所述的控制方法以由气动功率估计得到的气动功率估计值作为转速控制与变桨距控制的输入,由转速控制进行转矩指令的输出调节,由变桨距控制进行桨距角指令的输出调节,实现转速控制与变桨距控制之间的解耦控制;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控制器将在转速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,实现变速变桨超前联合控制,抑制机组转速和输出功率的超调;

所述的气动功率估计以风电机组传感器采集的转子转速与发电机电磁转矩作为输入,由风电机组的传动链方程计算得到气动功率估计值;

所述的转速控制以所述的气动功率估计得到的气动功率估计值作为输入,通过气动功率-最优转速估计值曲线得到最优转速估计值,将经过限幅的最优转速估计值与实际风电机组转速的偏差作为转速PID控制器的输入,进行转矩指令输出调节;当未经限幅的最优转速估计值小于额定转速时,转速PID控制器输出的转矩指令使风电机组进入最大风能捕获状态;当最优转速估计值大于额定转速值时,将转速PID控制器的转速给定值限制为额定转速值,完成从最大风能捕获控制到风电机组恒转速控制的状态切换;当转速PID控制器输出的转矩指令达到额定转矩时,风电机组将进入额定风速以上的变桨距恒转矩控制状态;

所述的变桨距控制以所述的气动功率估计得到的气动功率估计值作为输入,通过气动功率-转速参考值曲线得到转速参考值,将该转速参考值与风电机组设定的额定转速值的偏差作为变桨距PID控制器的输入,通过变桨距PID控制器进行桨距角指令输出调节;当风速高于风电机组额定风速值时,风电机组的转速参考值 Ω_x 会高于额定转速,此时变桨距PID控制器将调节输出的桨距角指令,使风电机组捕获的气动功率限制在额定功率值附近。

2. 根据权利要求1所述的变速恒频风电机组变速变桨距联合控制方法,其特征在于,所述的气动功率-转速参考值曲线分为三段:AB、BC和CE;AB段为风电机组固有转速-最大功率曲线;BC段为连接转速-最大功率曲线额定转速对应功率点与风电机组额定功率点的垂直线;CE段为经过风电机组额定功率点的直线,该直线上的点对应的气动功率与转速参考值成正比关系。

变速恒频风电机组变速变桨距联合控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种变速恒频风电机组的控制方法,特别涉及一种变速恒频风电机组的变速变桨距联合控制方法。

背景技术

[0002] 现有大型变速恒频风电机组多采用变速变桨距运行方式,当风速低于额定风速时通常根据转速控制器的输出调节机组功率,实现机组的最大风能捕获控制,当风速高于额定风速时,变桨距控制器开始控制变桨距执行机构动作,减少机组吸收的气动功率,维持机组的正常运行。当大型变速恒频风电机组在额定风速附近运行时,如何对机组进行有效的控制,将直接影响机组的运行性能与安全性,目前通常采用将耦合点提前的方法或者采用状态切换控制方法来实现转速控制和变桨距控制之间的解耦控制。前一类方法,由于耦合点的提前导致了一部分能量的损失;后一类方法,当风速在额定值附近变化时两个控制器之间容易出现相互干扰的现象,不能充分利用转速控制和变桨距控制协同工作的优势,排斥两者之间的联合控制,有可能导致机组转速或输出功率超调。

[0003] 专利200910183567.6“一种兆瓦级风电机组联合控制方法”中,当风力发电机处于额定风速附近时,转矩控制方法与变桨距控制方法同时保持运行状态,该专利利用了PID算法的积分饱和特性,使得转矩PID控制器和变桨距PID控制器之间的切换平滑,避免了控制器之间的相互干扰。

[0004] 专利201210409315.2“一种大型风电机组变桨距控制与转矩控制的解耦控制方法”中,采用联合偏差以及加入延迟环节的方法使桨距控制器与转矩控制器轮流起作用,实现平滑过渡,减少风电机组在额定状态附近工作时两种控制器的频繁切换。

[0005] 专利201210277908.8“风电机组扭矩与变桨解耦控制的方法”中,在扭矩控制器起主导作用的区域计算变桨控制偏置值,调整变桨控制器的发电机转速参考设定值并输出桨距角,在变桨控制器起主导作用的区域计算扭矩控制偏置值,调整扭矩控制器的发电机转速参考设定值输出相应的电磁扭矩给定值。该专利提高了两个控制器在各自区域内的性能,同时避免了相互干扰。

[0006] 上述这些专利虽然实现了变速变桨距的平滑切换与控制,但是当风速在额定值附近波动时,并没有充分利用变速与变桨距控制的联合控制优势,不能对突增的气动功率进行有效控制,风机转速与功率容易出现超调。

发明内容

[0007] 本发明的目的是克服现有技术存在的当风电机组运行于额定风速附近时,变速变桨距切换控制相互干扰以及机组转速功率可能出现超调的不足,提出一种变速变桨距风电机组在额定风速附近的变速变桨距联合控制方法。

[0008] 同传统方法相比,本发明通过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,实现转速与变桨距的解耦控制与超前联合控制,能够优化风

电机组在额定风速附近的运行控制性能,解决变速与变桨距控制之间的干扰问题,实现变速控制与变桨距控制的平滑切换,扩大机组变速运行区域,减小机组转速和输出功率可能出现的超调。

[0009] 本发明的控制方法为:由气动功率估计得到的气动功率估计值作为转速控制与变桨距控制的输入,由转速控制进行转矩指令的输出调节;转速控制方法为:将由最优转速估计得到的最优转速估计值经过限幅处理后与实际反馈转速之间的偏差作为转速PID控制器的输入,进行转矩指令的输出调节;由变桨距控制进行桨距角指令的输出调节,变桨距控制方法为:将由转速参考值计算得到的转速参考值与风电机组额定转速的偏差作为变桨距PID控制器的输入,进行桨距角指令的输出调节,从而实现转速控制与变桨距控制之间的解耦控制。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控制器将在转速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,实现变速变桨超前联合控制,有效抑制机组转速和输出功率的超调。

[0010] 本发明的变速恒频风电机组变速变桨距联合控制方法包括气动功率估计步骤、变桨距控制步骤和转速控制步骤。气动功率估计步骤是进行变桨距控制与转速控制的前提,变桨距控制步骤与转速控制步骤实现变速变桨距的解耦控制,具体步骤如下:

[0011] 1、气动功率估计步骤的目的是得到当前风电机组吸收的气动功率估计值,气动功率估计方法为:由风电机组传感器采集得到转子转速 Ω 与发电机电磁转矩 T_e ,根据风电机组传动链方程估计此时风电机组吸收的气动功率 P_{mech} 的估计值。

[0012] 2、转速控制步骤为:首先进行最优转速估计,以所述气动功率估计步骤得到的气动功率估计值作为输入,通过气动功率-最优转速估计值曲线得到最优转速估计值,然后将经过限幅的最优转速估计值与实际风电机组转速的偏差作为转速PID控制器的输入,进行转矩指令输出调节。

[0013] 当未经限幅的最优转速估计值小于额定转速时,转速PID控制器输出的转矩指令使风电机组进入最大风能捕获状态;当最优转速估计值大于额定转速值时,将转速PID控制器的转速给定值限制为额定转速值,完成从最大风能捕获控制到风电机组恒转速控制的状态切换;当转速PID控制器输出的转矩指令达到额定转矩时,风电机组将进入额定风速以上的变桨距恒转矩控制状态。

[0014] 所述的气动功率-最优转速估计值曲线是气动功率与最优转速估计值对应的曲线,通过该曲线可以得到气动功率估计值对应的最优转速估计值,该曲线为风电机组固有的转速-最大功率曲线。

[0015] 3、变桨距控制步骤中,变桨距控制的目的是将风电机组的转速参考值 Ω_x 控制在额定转速值 Ω_{rated} 附近,变桨距PID控制器的转速设定值为风电机组额定转速值 Ω_{rated} 。变桨距控制步骤为:首先进行转速参考值计算,以气动功率估计步骤得到的气动功率估计值作为输入,通过气动功率-转速参考值曲线得到转速参考值,然后将该转速参考值与风电机组设定的额定转速值的偏差作为变桨距PID控制器的输入,通过变桨距PID控制器进行桨距角指令输出调节。

[0016] 当风速高于风电机组额定风速值时,风电机组的转速参考值 Ω_x 会高于额定转速,此时变桨距PID控制器将调节输出的桨距角指令,使风电机组捕获的气动功率限制在额定

功率值附近。

[0017] 所述的气动功率-转速参考值曲线是气动功率与转速参考值对应的曲线,通过该曲线可以得到气动功率估计值对应的转速参考值。该曲线分为三段:AB、BC和CE;AB段为风电机组固有转速-最大功率曲线,BC段为连接转速-最大功率曲线额定转速对应功率点与风电机组额定功率点的垂直线,CE段为经过风电机组额定功率点的直线,直线上的点对应的气动功率与转速参考值成正比关系。

[0018] 本发明的优点在于:转速控制是对实际转速反馈的直接控制,而变桨距控制则是对气动功率估计值对应的转速参考值进行控制,从而实现了变速与变桨距控制之间的解耦控制。

[0019] 当风电机组在额定风速附近运行时,变速变桨距联合控制方法的目标都是控制风电机组转速为额定值,在风电机组的转速参考值超过额定值时,风电机组捕获的气动功率将大于额定功率,变桨距控制无需等到实际转矩超过额定值才进行指令调节,因此变速变桨距控制可以超前进行联合控制,从而有利于稳定机组的转速和输出功率。

附图说明

[0020] 图1为本发明变速恒频风电机组变速变桨距联合控制方法的原理图;

[0021] 图2为气动功率-最优转速估计值曲线示意图;

[0022] 图3为气动功率-转速参考值曲线示意图;

[0023] 图4为仿真的随机风速曲线;

[0024] 图5为仿真的风电机组转速曲线对比。

具体实施方式

[0025] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步说明。

[0026] 本发明的变速恒频风电机组变速变桨距联合控制方法包括气动功率估计步骤1、变桨距控制步骤和转速控制步骤。气动功率估计步骤是进行变桨距控制与转速控制的前提,变桨距控制步骤与转速控制步骤实现变速变桨距的解耦控制。该控制方法的原理图如图1所示。

[0027] 气动功率估计步骤1实现风电机组气动功率的估计,通过最优转速估计2得到最优转速估计值,通过转速参考值计算3得到转速参考值。最优转速估计值经过限幅与实际反馈转速之间的偏差作为转速PID控制器4的输入量,由转速PID控制器4进行转矩指令输出调节;所述的转速参考值与风电机组额定转速的偏差作为变桨距PID控制器5的输入量,由变桨距PID控制器5进行桨距角指令输出调节。

[0028] 本发明的具体实施步骤如下:

[0029] 1、气动功率估计步骤1的目的是得到风电机组吸收的气动功率估计值。由风电机组传感器采集得到转子转速 Ω 与发电机电磁转矩 T_e ,根据风电机组传动链方程,估计此时风电机组吸收的气动功率 P_{mech} 的估计值。

[0030] 风电机组吸收的气动功率主要由风电机组的电功率 P_e 、传动链损耗功率 P_{loss} 和风电机组机械储能的变化率 $J\dot{\Omega}$ 三部分构成。风电机组传动链方程如下式所示:

$$[0031] \quad \begin{cases} P_{mech} = J\dot{\Omega}\Omega + P_e + P_{loss} \\ P_e = n_g \times T_e \times \Omega \\ P_{loss} = k \times \Omega^2 \end{cases}$$

[0032] 式中：风电机组的实时转速 Ω 以及风电机组的电磁转矩 T_e 可以通过风电机组传感器采集获得，风电机组传动链转动惯量 J 为机组固有值， $\dot{\Omega}$ 为风电机组转速微分值， n_g 为机组传动系数， k 为机组损耗系数。气动功率估计值同时作为转速控制与变桨距控制的输入。

[0033] 2、转速控制步骤为：以气动功率估计步骤1得到的气动功率估计值作为输入，通过气动功率-最优转速估计值曲线得到最优转速估计值；以经限幅的最优转速估计值与实际风电机组转速的偏差作为转速PID控制器4的输入，进行转矩指令输出调节。

[0034] 当最优转速估计值 Ω^* 小于额定转速值 Ω_{rated} 时，最优转速估计值 Ω^* 经过限幅处理后值不变，将经过限幅的最优转速估计值 Ω^* 与实际风电机组的转速的偏差作为转速PID控制器4输入，由转速PID控制器4调节输出转矩指令，使风电机组进入最大风能捕获控制状态；当最优转速估计值 Ω^* 大于额定转速值 Ω_{rated} 时，最优转速估计值限制为额定转速值 Ω_{rated} ，将限幅后的最优转速估计值与实际风电机组转速的偏差作为转速PID控制器4的输入，这样调节转速PID控制器输出的转矩指令可以完成风电机组从最大风能捕获控制到恒转速控制的状态切换。当转速PID控制器输出的转矩指令达到额定转矩时，转速PID控制器输出的转矩指令将保持为额定转矩值，风电机组将进入额定风速以上的变桨距恒转矩控制状态。

[0035] 最优转速估计值根据气动功率-最优转速估计值曲线得到。如图2所示，由曲线ABB1计算出对应的最优转速估计值，该曲线为风电机组的转速-最大功率曲线，由不同风速下风电机组捕获最大气动功率的转速曲线构成。当风电机组的气动功率估计值为 P_1 时，采用气动功率-最优转速估计值曲线估计出的风电机组转速为 Ω_1^* ，小于额定转速 Ω_{rated} ，而此时对应风电机组实际转速为 Ω_1 ，转速PID控制器4将调节转矩指令使实际风电机组转速为采用气动功率-最优转速估计值曲线估计出的风电机组转速 Ω_1^* ；当风电机组的气动功率估计值为 P_2 时，采用气动功率-最优转速估计值曲线估计出的风电机组转速为 Ω_2^* ，大于额定转速 Ω_{rated} ，此时对应风电机组实际转速为 Ω_2 ，转速PID控制器4将调节转矩指令使实际风电机组转速为额定转速 Ω_{rated} 。

[0036] 3、变桨距控制步骤为：将气动功率估计步骤1得到的气动功率估计值作为转速参考值计算的输入，通过气动功率-转速参考值曲线得到转速参考值，转速参考值与风电机组设定的额定转速值的偏差作为变桨距PID控制器5的输入，调节输出桨距角指令。

[0037] 通过气动功率-转速参考值曲线得到转速参考值 Ω_x ，当转速参考值 Ω_x 小于风电机组的额定转速值 Ω_{rated} 时，转速参考值 Ω_x 与额定转速值 Ω_{rated} 的偏差为正偏差，此正偏差作为变桨距PID控制器5的输入，由变桨距PID控制器5调节输出的桨距角指令，增大风电机组吸收的气动功率，使风电机组的转速参考值 Ω_x 控制在额定转速值 Ω_{rated} 附近；当转速参考值 Ω_x 高于额定转速值 Ω_{rated} 时，转速参考值与额定转速值的偏差为负偏差，变桨距PID控制器5将调节输出桨距角指令，减小风电机组吸收的气动功率，使风电机组的转速参考值 Ω_x 控制在额定转速值 Ω_{rated} 附近。

[0038] 转速参考值 Ω_x 根据气动功率-转速参考值曲线计算,如图3所示的ABCE曲线。计算出当前风电机组捕获的气动功率所对应的机组转速参考值 Ω_x ,该曲线的AB段为机组的变速运行区域,转速 Ω_{\min} 和 Ω_{rated} 分别为风电机组的最小转速和额定转速,此时转速参考值为捕获最大气动功率时风电机组的转速。该曲线的BC段为风电机组的恒转速运行区域,该区域的转速参考值保持为额定转速不变。该曲线的CE段为变桨距控制区域,转速参考值为直线 L_1 上的点,直线 L_1 上的点对应的气动功率与转速参考值成正比关系。转速参考值 Ω_x 的大小体现了风电机组捕获的气动功率偏离额定功率的程度,当风电机组捕获的气动功率大于额定功率时,风电机组的转速参考值 Ω_x 将大于额定转速 Ω_{rated} ,当风电机组捕获的气动功率小于额定功率时,风电机组的转速参考值 Ω_x 将小于额定转速 Ω_{rated} 。

[0039] 本发明变速变桨距联合控制过程为:如图3所示,ABCE曲线的AB段为风电机组的变速运行区域,转速 Ω_{\min} 和 Ω_{rated} 分别为风电机组的最小转速和额定转速。对处于该变速运行区域的风电机组的控制以变速控制为主导,根据最优转速估计值来进行风电机组转速的调节控制,实现机组最大气动功率捕获。ABCE曲线的BC段为风电机组的恒转速运行区域,该区域为对风电机组进行变速控制与变桨距联合控制区,此时最优转速估计值保持在额定转速,转速控制进入恒转速变转矩控制状态,如果气动功率估计值对应的转速参考值大于额定转速则变桨距控制起作用,变桨距PID控制器5调节桨距角指令,控制风电机组吸收的气动功率,变桨距控制可以与转速控制联合实现对风电机组的控制。ABCE曲线的CE段为变桨距控制区域,对处于此区域风电机组的控制以变桨距控制为主导,根据转速参考值进行风电机组变桨距控制,以限制风电机组捕获的气动功率,防止风电机组超速,风电机组将进入额定风速以上的变桨距恒转矩控制状态。

[0040] 为验证本发明所提出的变速恒频风电机组变速变桨距联合控制方法的有效性,采用bladed软件在随机风速下对变速变桨距联合控制方法和常规状态切换控制方法进行了对比仿真研究。风电机组的额定风速为11m/s,风速模型中平均风速为11m/s,纵向湍流强度为10.18%,侧向湍流强度为12.5465%,垂直湍流强度为8.92472%,空气密度为1.225kg/m³。图4为仿真的随机风速波形,图5是风电机组转速的波形对比,与采用常规状态切换控制方法的风电机组相比,当风速在额定值附近随机变化时,风电机组采用变速变桨距联合控制方法时变速变桨距控制平滑切换,转速波动及超调量小,风电机组的转速得到了很好的控制。

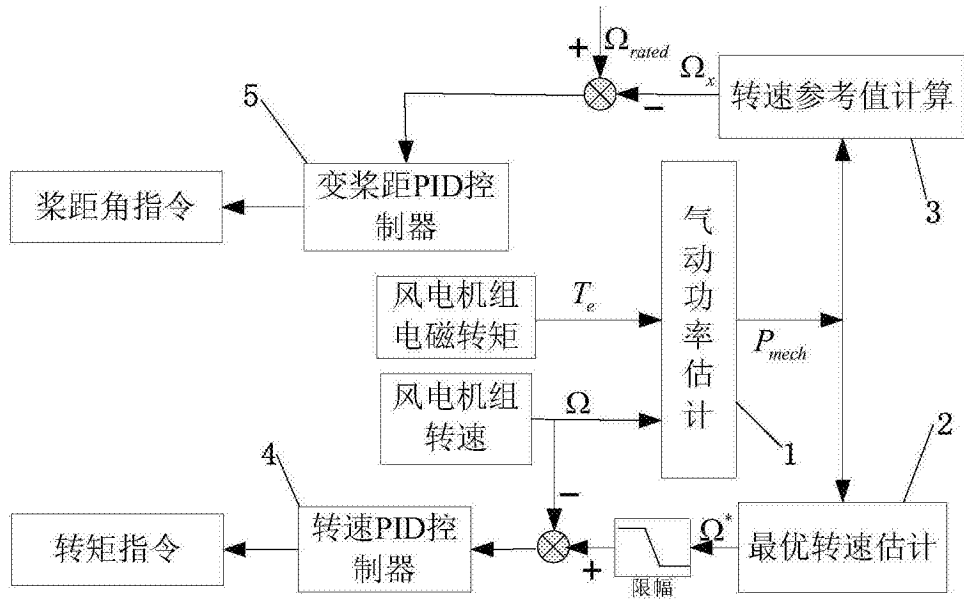


图1

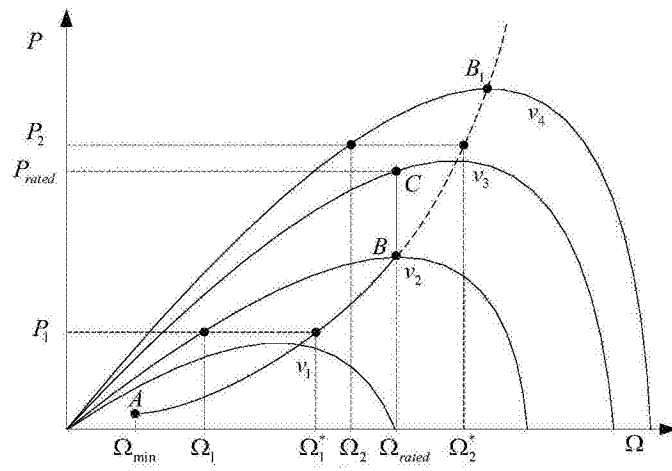


图2

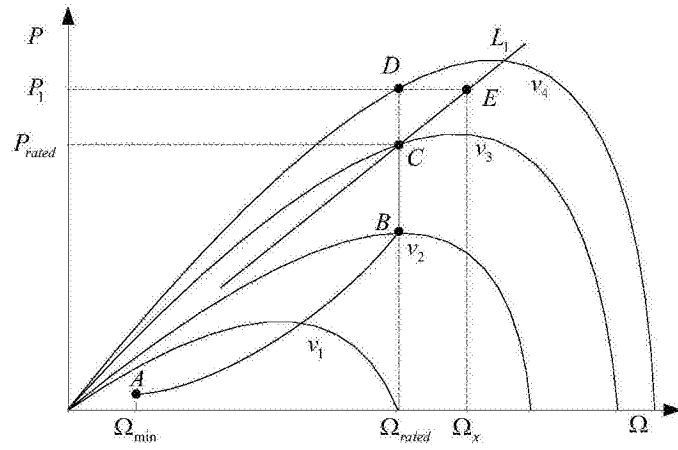


图3

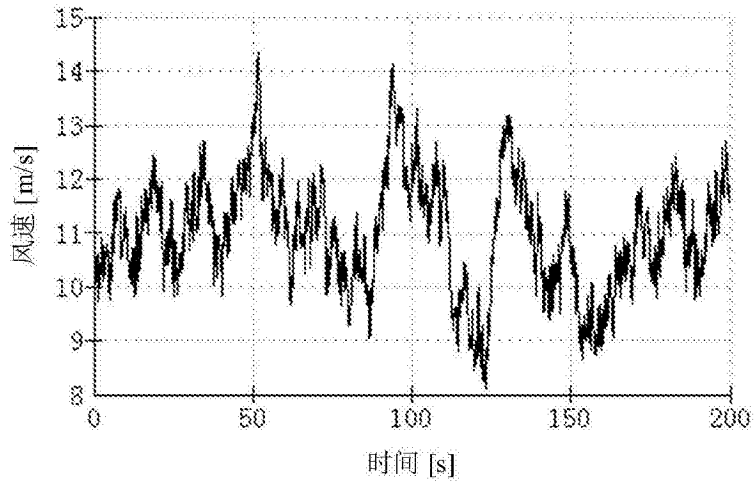


图4

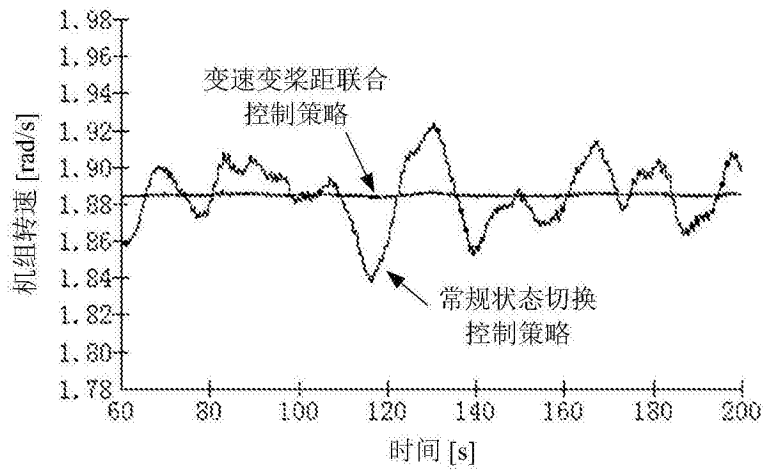


图5