



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112352099 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 02

(21) 申请号 201980040409.7

(22) 申请日 2019.05.13

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112352099 A

(43) 申请公布日 2021.02.09

(30) 优先权数据
PA201870298 2018.05.16 DK

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2020.12.16

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/DK2019/050147 2019.05.13

(87) PCT国际申请的公布数据
W02019/219138 EN 2019.11.21

(73) 专利权人 维斯塔斯风力系统集团公司
地址 丹麦奥胡斯

(72) 发明人 S·达尔斯高 J·X·V·内托

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002
专利代理师 王永建

(51) Int.Cl.
F03D 7/02 (2006.01)
F03D 17/00 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 103334876 A, 2013.10.02
CN 103758698 A, 2014.04.30

审查员 崔昊

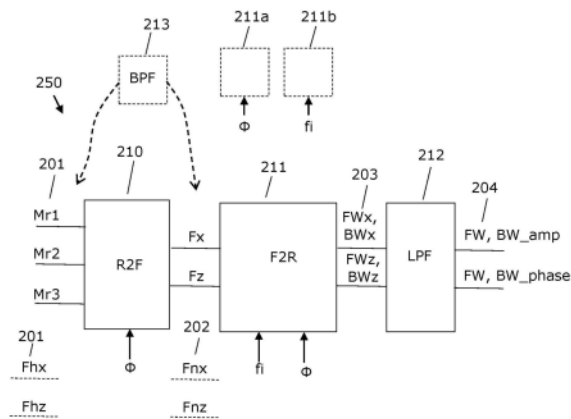
权利要求书2页 说明书9页 附图6页

(54) 发明名称

检测和控制回转振荡的风力涡轮机方法

(57) 摘要

本发明涉及一种用于检测和控制风力涡轮机的叶片的回转振荡的方法。回转振荡的检测基于指示叶片振荡的测量信号,以及基于回转振荡频率将测量信号从测量框架旋转变换到至少一个目标框架。旋转变换包括相对于转子旋转方向的向后旋转变换方向或向前旋转变换方向。该控制基于从旋转变换后的测量信号获得的振荡分量,其中该振荡分量指示在向后旋转方向和/或向前旋转方向上的回转振荡。



1. 一种用于控制风力涡轮机(100)的方法,所述风力涡轮机(100)包括具有两个或更多个叶片(103)的转子(102),所述方法包括:

-获得指示至少一个叶片的叶片振荡的测量信号(201,202),其中所述测量信号在所述风力涡轮机的测量框架中获得,

-基于所述至少一个叶片的关注频率(fi)将所述测量信号(201,202)或其衍生信号从所述测量框架旋转变换(211)到至少一个目标框架,以获得旋转变换后的信号(203),其中所述至少一个目标框架相对于所述转子的旋转频率(f_{hub})以所述关注频率(fi)旋转,并且其中所述旋转变换包括相对于转子旋转方向的向后旋转变换方向或向前旋转变换方向,

-基于所述旋转变换后的信号(203),获得所述叶片振荡作用在相对于所述转子旋转方向的向后旋转方向或向前旋转方向上的至少一个叶片振荡分量(204),以及

-基于所述叶片振荡分量来控制所述风力涡轮机。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述至少一个叶片振荡分量(204)包括所述叶片振荡作用在向前的转子旋转方向上的向前叶片振荡分量(FW_{amp}, FW_{phase})。

3. 根据权利要求1或2所述的方法,其中,所述至少一个叶片振荡分量(204)包括所述叶片振荡作用在向后的转子旋转方向上的向后振荡分量(BW_{amp}, BW_{phase})。

4. 根据权利要求1或2所述的方法,所述方法包括:对所述旋转变换后的信号(203)进行滤波以获得所述至少一个叶片振荡分量(204)。

5. 根据权利要求1或2所述的方法,所述方法包括:在对所述测量信号进行旋转变换之前,基于所述关注频率(fi)对所述测量信号(201,202)进行带通滤波。

6. 根据权利要求1或2所述的方法,其中,所述测量框架是与所述转子一起旋转的转子框架,或者其中,所述测量框架是非旋转框架。

7. 根据权利要求1或2所述的方法,其中,所述关注频率(fi)是所述至少一个叶片的共振频率。

8. 根据权利要求1或2所述的方法,所述方法还包括:基于所述转子(102)的角位置(Φ),将来自所述测量框架的测量信号(201)旋转变换为非旋转框架中的测量信号(F_x, F_z)。

9. 根据权利要求8所述的方法,所述方法还包括:基于根据所述关注频率(fi)和所述转子的旋转频率(f_{hub})确定的叶片振荡频率在所述非旋转框架中的频率,对在所述非旋转框架中获得的测量信号(202)或被变换到所述非旋转框架中的测量信号(F_x, F_z)进行带通滤波。

10. 根据权利要求9所述的方法,所述方法还包括:将所述非旋转框架中的带通滤波后的测量信号(202, F_x, F_z)从所述非旋转框架旋转变换到所述转子框架,以获得处于所述关注频率(fi)的叶片振荡的信号。

11. 根据权利要求1或2所述的方法,其中,所述风力涡轮机的控制包括取决于所述叶片振荡分量(204)来调节所述转子的旋转频率(f_{hub})。

12. 根据权利要求1或2所述的方法,其中,所述风力涡轮机的控制基于所述至少一个叶片振荡分量(204)的振幅和/或相位。

13. 一种用于控制风力涡轮机的控制系统(250),所述风力涡轮机包括具有两个或更多个叶片的转子,其中,所述控制系统被布置为执行根据权利要求1至12中任一项所述的方法

的步骤。

14. 一种计算机程序产品,所述计算机程序产品包括软件代码,所述软件代码在数据处理系统上被执行时适于控制风力涡轮机,所述计算机程序产品适于执行根据权利要求1至12中任一项所述的方法。

15. 一种风力涡轮机(100),其包括具有两个或更多个叶片的转子,所述风力涡轮机还包括根据权利要求13所述的控制系统。

检测和控制回转振荡的风力涡轮机方法

技术领域

[0001] 本发明涉及检测风力涡轮机中的振荡,特别是涉及检测风力涡轮机的叶片中的回转振荡以及基于这种振荡控制风力涡轮机。

背景技术

[0002] 风力涡轮机的叶片可能会被激发而以回转模式振荡。用于检测回转模式的现有方法可能是不足够的,例如不能足够快地检测到振荡,然后调用控制动作来减少振荡。已知的是通过FFT方法来检测振荡。然而,这样的方法可能太慢,以致于不能在振荡增加到不可接受的振幅之前开始控制动作。因此,需要改进用于检测叶片振荡的方法。

[0003] 出于不同的目的(像是减少边缘方向的载荷、风力涡轮机叶片和其他风力涡轮机部件的生产成本),减少用于制造风力涡轮机叶片材料量将是有益的。但是,减少材料量可能会导致叶片刚度降低。降低的叶片刚度可能会促进叶片回转振荡的生成。因此,还需要用于检测叶片振荡的改进方法,以实现用于叶片制造的材料量的减少。

发明内容

[0004] 本发明的目的是改进对风力涡轮机中的叶片振荡的检测。本发明的另一目的是改进风力涡轮机的控制方法,特别是提高风力涡轮机的寿命和/或生产能力的控制方法。本发明的又一目的是使得能够以降低的材料消耗来进行风力涡轮机叶片的叶片制造。

[0005] 在本发明的第一方面,提供了一种用于控制风力涡轮机的方法,所述风力涡轮机包括具有两个或更多个叶片的转子,所述方法包括:

[0006] -获得指示至少一个叶片的叶片振荡的测量信号,其中所述测量信号在所述风力涡轮机的测量框架(frame)中获得,

[0007] -基于所述至少一个叶片的关注频率,将所述测量信号或其衍生信号从所述测量框架旋转变换到至少一个目标框架,以获得旋转变换后的信号,其中所述至少一个目标框架相对于所述转子的旋转频率以所述关注频率旋转,并且其中所述旋转变换包括相对于转子旋转方向的向后旋转变换方向或向前旋转变换方向,

[0008] -基于所述旋转变换后的信号,获得所述叶片振荡作用在相对于所述转子旋转方向的向后旋转方向或向前旋转方向上的至少一个叶片振荡分量,以及

[0009] -基于所述叶片振荡分量来控制所述风力涡轮机。

[0010] 从测量框架到目标框架的旋转变换基于关注频率(例如叶片的预期振荡频率)。因此,关注频率被用于确定不同时刻的角度,使得测量结果(例如叶片力)可以被变换到与叶片振荡相同的频率旋转的目标框架。在目标框架中,可以将变换后的信号处理为可用于控制风力涡轮机的信号分量。

[0011] 有利地,该方法并不基于计算上需要的FFT方法,而是基于旋转变换和滤波,从而可以非常快速地检测到可能的叶片振荡。

[0012] 此外,该方法使得能够检测到叶片振荡在向前旋转方向或向后旋转方向或可能地

在这两个方向上的特定旋转方向。

[0013] 基于叶片振荡分量控制风力涡轮机可以是可选功能,因为所述至少一个叶片振荡分量本身可以用于控制风力涡轮机以外的其他目的(例如用于累积的叶片疲劳评估)。

[0014] 该方法可以用于不同的关注频率,使得可以获得针对不同频率的叶片振荡分量。

[0015] 根据一个实施例,所述至少一个叶片振荡分量包括所述叶片振荡作用在向前的转子旋转方向上的向前叶片振荡分量。根据另一个实施例,所述至少一个叶片振荡分量包括所述叶片振荡作用在向后的转子旋转方向上的向后振荡分量。有利地,该方法可以用于确定针对向后方向或向前方向的叶片振荡分量。显然,该方法还可用于确定针对向后方向和向前方向的叶片振荡分量。取决于风力涡轮机的当前运行状况,该方法可以用于检测针对振荡方向的振荡分量,该振荡分量可以是鉴于风力涡轮机的运行状况的最相关的振荡分量。例如,如果风力涡轮机的旋转速度具有特定值,则可能存在转子旋转的3P频率可能会激发向后回转振荡共振的风险。因此,该方法可以集中于检测可能由3P频率激发的在向后方向上以及处于关注频率的叶片振荡。

[0016] 根据一个实施例,该方法包括:对所述旋转变换后的信号进行滤波以获得所述至少一个叶片振荡分量。由于处于关注频率的叶片振荡被变换为低频频谱,因此叶片振荡分量可以有利地通过简单的滤波(例如低通滤波)来获得。

[0017] 根据一个实施例,该方法包括:在对所述测量信号进行旋转变换之前,基于所述关注频率对所述测量信号进行带通滤波。可以基于关注频率对测量信号进行初始滤波,以便可以去除无关或干扰频率。该初始滤波可以有利地实现对旋转变换后的信号的更简单的滤波。

[0018] 根据一个实施例,所述测量框架是与转子一起旋转的转子框架,或者所述测量框架是非旋转框架。有利地,测量信号可以从位于风力涡轮机的旋转部件中的传感器或从位于非旋转部件中的传感器(诸如位于机舱中的加速度、负载或应变传感器)获得。

[0019] 根据一个实施例,关注频率是所述至少一个叶片的共振频率。由于叶片共振频率下的振荡可能是最关键的,因为它们可能被激发成大振幅,因此该方法可以有利地用于监测这种共振频率下的振荡的振幅。

[0020] 根据一个实施例,该方法还包括:基于转子的角位置 Φ 将来自所述测量框架的测量信号旋转变换为非旋转框架中的测量信号。作为第一步,可以将位于旋转部件中的传感器获得的测量信号旋转变换到非旋转框架。由于该变换,向前振荡分量和向后振荡分量在非旋转框架中被变换为不同的频率。

[0021] 根据一个实施例,该方法还包括:基于根据所述关注频率和所述转子的旋转频率确定的所述叶片振荡频率在所述非旋转框架中的频率,对在所述非旋转框架中获得的测量信号或被变换到所述非旋转框架中的测量信号进行带通滤波。由于向前振荡分量和向后振荡分量在非旋转框架中被变换为不同的频率,因此可以根据它们在非旋转框架中的频率提取不同的向前振荡和向后振荡。

[0022] 根据一个实施例,该方法还包括:将所述非旋转框架中的带通滤波后的测量信号从所述非旋转框架旋转变换到所述转子框架,以获得处于所述关注频率的叶片振荡的信号。通过将带通滤波后的测量信号旋转变换回转子框架,可以获得针对向后振荡和针对向前振荡的信号。这些信号中的一个或两个进一步被变换到以关注频率旋转的目标框架。

[0023] 根据一个实施例,风力涡轮机的控制包括取决于所述叶片振荡分量来调节所述转子的旋转频率。有利地,由于叶片振荡可由于转子旋转而被激发,因此可以通过降低转子速度或者可能地通过增大转子速度来减小检测到的叶片振荡。

[0024] 根据一个实施例,风力涡轮机的控制基于所述至少一个叶片振荡分量的振幅和/或相位。有利地,通过使用相位,可以控制风力涡轮机的叶片的桨距以抵消叶片振荡。

[0025] 本发明的第二方面涉及一种用于控制风力涡轮机的控制系统,所述风力涡轮机包括具有两个或更多个叶片的转子,其中所述控制系统被布置为执行根据第一方面的方法的步骤。

[0026] 本发明的第三方面涉及一种计算机程序产品,所述计算机程序产品包括软件代码,所述软件代码在数据处理系统上被执行时适于控制风力涡轮机,所述计算机程序产品适于执行第一方面中任一项所述的方法。

[0027] 本发明的第四方面涉及一种风力涡轮机,所述风力涡轮机包括具有两个或更多个叶片的转子,其中所述风力涡轮机还包括根据第二方面所述的控制系统。

[0028] 通常,可以在本发明的范围内以任何可能的方式来组合和耦合本发明的各个方面和实施例。参考下文描述的实施例,本发明的这些和其他方面、特征和/或优点将变得显而易见并得到阐明。

附图说明

[0029] 将参考附图仅以示例的方式描述本发明的实施例,其中:

[0030] 图1A图示了风力涡轮机,

[0031] 图1B图示了转子的转子框架和坐标系,以及叶片振荡的目标框架和坐标系,

[0032] 图2A图示了用于检测向前回转振荡和向后回转振荡的方法以及用于检测振荡和控制风力涡轮机的控制系统,

[0033] 图2B图示了在非旋转框架中处于它们的相应频率下的向后回转振荡信号和向前回转振荡信号的频谱,

[0034] 图3A图示了控制系统的替代实施例,

[0035] 图3B图示了目标框架中的旋转变换后的信号的频谱,以及

[0036] 图4示出了被配置为多转子风力涡轮机的风力涡轮机。

具体实施方式

[0037] 图1A示出了包括塔架101和具有至少一个转子叶片103(诸如三个叶片)的转子102的风力涡轮机100(WTG)。叶片103与轮毂105连接,轮毂105被布置为与叶片一起旋转。转子102连接到机舱104,该机舱104安装在塔架101的顶部上,并适于经由传动系来驱动位于机舱内部的发电机。转子102可在风的作用下旋转。转子叶片103的由风引起的旋转能经由轴传递至发电机。因此,风力涡轮机100能够借助于转子叶片将风的动能转换为机械能,并且随后借助于发电机将机械能转换为电力。发电机与功率转换器连接,该功率转换器包括发电机侧转换器和电网侧转换器。发电机侧转换器将发电机交流电转换为直流电,并且电网侧转换器将直流电转换为交流电,以经由风力涡轮机100的输出电感器注入公用电网。

[0038] 图4示出了被配置为多转子风力涡轮机的替代风力涡轮机100。多转子风力涡轮机

包括多个机舱104。如在上面的图中所示,机舱104可以经由塔架101和从塔架101向外延伸的支撑臂来支撑,使得机舱被放置在远离塔架的位置并且被放置在塔架的两侧。替代地,如在下面的图中所示,机舱104可以由从基部130(例如地基基部或浮动基部)延伸的成角度的塔架101支撑,使得两个或更多个机舱104在给定的高度彼此分开得足够远。本发明的实施例可以与多转子风力涡轮机或单转子风力涡轮机一起使用。

[0039] 叶片可能会被激发成按照振荡110所指示的那样振荡。振荡可以引起叶片尖端的线性运动、椭圆运动或叶片尖端的其他运动轨迹。从转子角度总地观察时,叶片的这种振荡被称为回转振荡。回转振荡可以是共振或非共振振荡。

[0040] 转子102和轮毂105在轮毂方向120上旋转。转子102和轮毂102的角位置由方位角 Φ 给出。因此,转子和轮毂的旋转频率为 $f_{hub} = d\Phi/dt$ 。

[0041] 叶片回转振荡可以是向前回转振荡(FW)、向后回转振荡(BW),或者回转振荡可以包括向前回转振荡(FW)和向后回转振荡(BW)两者。向前回转振荡FW作用在转子旋转方向120的向前方向上,而向后回转振荡BW作用在转子旋转方向120的向后方向上。

[0042] 回转振荡可以具有一个以上的回转频率,所述一个以上的回转频率包括一阶、二阶和更高阶共振频率和非共振频率中的一个或多个。共振振荡包括叶片的挥舞方向(flap-wise)和边缘方向(edge-wise)的振荡。本发明的实施例涉及检测回转振荡的至少一个关注频率 f_i ,所述至少一个关注频率 f_i 可以是一个或多个所提及的回转频率中的任何一个。

[0043] 图1B示出了轮毂105和转子102的坐标系 X_h, Z_h ,其以旋转频率 f_{hub} 沿逆时针方向旋转。替代地且通常地,当从前面观察转子时,转子沿顺时针方向旋转。

[0044] 在左边的图示中,坐标系 X_w, Z_w 表示具有振荡频率 f_i 的向前回转振荡FW。由于向前回转振荡FW以轮毂的旋转方向旋转,因此相对于地面或非旋转框架的向前回转频率由 $f_i + f_{hub}$ 给出。

[0045] 在右边的图示中,坐标系 X_w, Z_w 表示具有振荡频率 f_i 的向后回转振荡BW。由于向后回转振荡BW在轮毂旋转的相反旋转方向上旋转,因此相对于地面或非旋转框架的向后回转频率由 $f_i - f_{hub}$ 给出。

[0046] 轮毂105的旋转频率 f_{hub} 的示例包括在0.2-1Hz范围内的频率。叶片回转振荡的关注频率 f_i 的示例包括在0.5-3Hz范围内的频率。但是,例如取决于叶片103的尺寸、材料和设计,其他频率也是可能的,。

[0047] 图2A图示了用于检测叶片的向前回转振荡和向后回转振荡110以及基于从检测到的振荡110获得的向前振荡分量和/或向后振荡分量204来控制风力涡轮机的方法,以及用于执行该检测和控制的控制系统250。

[0048] 回转振荡的检测基于测量信号201,该测量信号201可以包含叶片103的叶片振荡的信息,其中该信息与叶片振荡110直接或间接相关。

[0049] 可以从位于风力涡轮机的旋转或非旋转部件上的各种传感器获得测量信号201。测量信号201源自表示风力涡轮机的实际旋转或非旋转分量的测量框架。

[0050] 可以从叶片传感器获得测量信号201,该叶片传感器被布置为测量一个或多个单独的叶片的叶片偏转、叶片应变、叶片加速度或其他叶片特征。这样的传感器(例如光学应变传感器)可以附接到叶片上。测量信号可以直接包含关于振荡振幅的信息(例如为测量的叶片偏转的形式,或者间接地为测量的叶片加速度的形式)。源自这种叶片传感器的测量信

号201的测量框架被称为转子框架。转子框架与坐标系Xh, Zh一起旋转。转子框架与转子102和轮毂105一起旋转。叶片传感器提供一个或多个信号Mr1-Mr3。对于三叶片转子102, 测量信号可以由信号Mr1, Mr2, Mr3构成。信号Mr1-Mr3可以为叶片偏转信号、叶片应变信号、叶片力矩信号或其他叶片信号Mr1-Mr3的形式。

[0051] 替代地或附加地, 还可以从布置在旋转轮毂105中的轮毂传感器获得测量信号201。例如, 轮毂传感器可以是加速度传感器, 其提供关于叶片加速度的信息以及由此提供关于叶片振荡的信息。例如, 轮毂传感器可以布置为提供沿图1B中所示的坐标轴Xh, Zh的信号分量(例如, 力分量)或其他轮毂信号Fhx, Fhz。源自这种轮毂传感器的测量信号201的测量框架被称为转子框架。

[0052] 如图2A所示, 测量信号201为叶片信号Mr1-Mr3的形式, 或者为轮毂信号Fhx, Fhz的形式。替代地, 测量信号201可以构成叶片信号和轮毂信号的组合。

[0053] 通过旋转变换210, R2F将测量信号201从转子框架旋转变换到非旋转框架(即固定框架)。非旋转框架中的测量信号201表示为Fx, Fz。

[0054] 旋转变换210基于转子的方位角 Φ , 其根据诸如Colemann变换、DQ0变换或一般旋转矩阵的已知旋转变换方法。

[0055] 由于叶片103的方向与Xh, Zh轴不一致, 因此叶片信号Mr1-Mr3不是定义在轮毂坐标系Xh, Zh中。因此, 叶片信号Mr1-Mr3需要被投影(例如使用投影矩阵P)到轮毂坐标系Xh, Zh上, 然后再通过旋转变换210进行旋转变换。叶片轮毂信号Fhx, Fhz的形式的测量信号可能已经与Xh, Zh轴一致。

[0056] 因此, 非旋转框架中的测量信号201(其被表示为Fx, Fz)可以按如下求出:

[0057] $[F_x, F_z] = R(\Phi)P[Mr_1, Mr_2, Mr_3]$, 或

[0058] $[F_x, F_z] = R(\Phi)[F_{hx}, F_{hz}]$,

[0059] 其中P是投影矩阵, $R(\Phi)$ 是旋转变换210。投影矩阵未在图2A中明确示出, 但可以被示出为位于输入201和旋转变换210之间的旋转元件。

[0060] 处于关注频率fi的向后回转振荡和向前回转振荡将通过旋转变换210以 $f_{BW} = f_i - f_{hub}$ 和 $f_{FW} = f_i + f_{hub}$ 变换为非旋转框架中的相应的向后频率 f_{BW} 和向前频率 f_{FW} 。

[0061] 作为从转子框架获得测量信号201的替代, 可以从布置在非旋转框架中的传感器获得测量信号202, 以提供关于叶片加速度的信息以及由此提供关于叶片回转振荡的信息。例如, 位于机舱104中的机舱传感器提供机舱信号Fnx, Fnz。源自这种机舱传感器的测量信号202的测量框架被称为机舱框架或非旋转框架。

[0062] 从非旋转框架获得的测量信号202等同于变换到非旋转框架的测量信号201。因此, 机舱信号Fnx, Fnz的形式的测量信号202等同于从测量信号201获得的信号Fx, Fz。

[0063] 包含在来自非旋转框架的测量信号202(替代地旋转变换后的信号Fx, Fz)中的处于关注频率fi的回转振荡将具有针对相应的向后旋转回转振荡和向前旋转回转振荡的频率 $f_{BW} = f_i - f_{hub}$ 和 $f_{FW} = f_i + f_{hub}$ 。

[0064] 由于测量信号201, 202可以在转子框架或在非旋转框架中获得, 因此, 取决于测量信号的来源, 被布置为将测量信号210从测量框架变换到非旋转框架的旋转变换元件210是可选的。

[0065] 旋转变换211, F2R被应用于从测量信号201获得的信号Fx, Fz或被应用于机舱信号

F_{nx}, F_{nz} 的形式的测量信号202。

[0066] 因此,通过旋转变换211对测量信号202或测量信号201的衍生信号进行旋转变换。测量信号201的衍生信号是例如借助于投影-旋转变换 $R(\Phi)P$ 、旋转变换 $R(\Phi)$ 或其他变换或推导从测量信号201推导出的信号。

[0067] 附加地或替代地,在应用旋转变换211之前,可以对测量信号201,202中的任何一个进行其他变换或推导(诸如滤波)。

[0068] 旋转变换211的目的是将测量信号201,202从测量框架(即从转子框架或非旋转框架中的任何一个)带到目标框架,该目标框架相对于转子的旋转频率 f_{hub} 以关注频率 f_i 旋转并且在相应的至少一个叶片振荡分量的旋转方向旋转。

[0069] 由于机舱信号 F_{nx}, F_{nz} 和从测量信号201获得的信号 F_x, F_z 可以包含针对向后回转振荡BW的频率分量 $f_i - f_{hub}$ 和针对向前回转振荡FW的频率分量 $f_i + f_{hub}$,因此旋转变换可以包括两个旋转变换,一个针对向后回转振荡BW,一个针对向前回转振荡FW。因此,旋转变换211包括目标框架相对于转子旋转方向的向后旋转方向或向前旋转方向。

[0070] 针对向后回转振荡BW的旋转变换211基于关注频率 f_i 和转子角 Φ ,并且可以被描述为如下:

$$[0071] \quad [BW_x, BW_z] = R(\Phi - \theta f_i) [F_x, F_z]$$

[0072] 类似地,针对向前回转振荡BW的旋转变换211可以被描述为如下:

$$[0073] \quad [FW_x, FW_z] = R(\Phi + \theta f_i) [F_x, F_z]$$

[0074] 其中 $R(\Phi - \theta f_i)$ 和 $R(\Phi + \theta f_i)$ 是相应的旋转变换211,并且其中 θf_i 是回转振荡的角位置。 θf_i 可以通过将关注频率 f_i 在时间上积分获得或简单地以 $\theta f_i = f_i \times t$ 的形式获得。

[0075] 旋转变换 $R(\Phi - \theta f_i)$ 和 $R(\Phi + \theta f_i)$ 中的每一个可以等效地表示为两个旋转变换的乘积,即分别为 $R(\Phi - \theta f_i) = R_1(\Phi)R(-\theta f_i)$ 和 $R(\Phi + \theta f_i) = R_1(\Phi)R(\theta f_i)$ 。

[0076] 因此,如图所示,旋转变换211可以被配置为两个连续的旋转变换211a,211b,以用于基于方位角 Φ 从非旋转框架旋转变换到转子框架,以及随后基于关注频率 f_i 从转子框架旋转变换到目标框架。旋转变换211a,211b也能够以相反的顺序应用。

[0077] 因此,可以将旋转变换211分成两个旋转变换,使得旋转变换211包括测量信号201,202或其衍生信号从非旋转框架到转子框架的旋转变换211a。

[0078] 图2B在左侧的坐标系中图示了从测量信号201,202中的一个在它们相应的频率 $f_i - f_{hub}$ 和 $f_i + f_{hub}$ 处获得的向后回转振荡信号和向前回转振荡信号 F_x, F_z 的频谱。图2B在右侧的坐标系中示出了由测量信号202或测量信号201,202中的任一个的衍生信号的变换211生成的旋转变换后的信号203。旋转变换211可以包括:在向前方向上的旋转变换,其用于将非旋转框架中的向前回转振荡变换为目标框架中的零频率或低频率范围;和/或在向后方向上的旋转变换,其用于将非旋转框架中的向后回转振荡变换为目标框架中的零频率或低频率范围。如图所示,测量信号201,202通过向前旋转变换被变换为信号203。该信号203包括在低频区域中的向前回转信号 FW_x, FW_z 和被变换为处于频率 $2 \cdot f_i$ (即频率是关注频率的两倍)的信号 BW_x, BW_z 的向后回转振荡。以这种方式,可以通过例如借助于例如低通或陷波滤波对旋转变换后的信号203进行滤波来获得针对向后振荡和/或向前振荡的叶片振荡分量204。为了方便起见,仅针对旋转变换211的向前旋转变换 $F2R_{FW}$ 图示旋转变换后的信号203。

[0079] 因此,旋转变换211将测量信号201,202或其衍生信号的频谱变换为目标框架中包括零频率的频谱。

[0080] 旋转变换后的信号203可以在处理元件212中被处理(例如如上所提及的那样通过低通滤波)。因此,处理元件212可以是配置有合适的截止频率的低通滤波器,以提取旋转变换后的信号203的相关DC分量。

[0081] 处理元件212可以被配置为确定旋转变换后的信号203的振幅和/或相位。因此,如图所示,处理元件212可以确定叶片振荡分量204,使得其包括一个或多个量:信号FW_x,FW_z的振幅FW_amp;信号FB_x,FB_z的振幅BW_amp;信号FW_x,FW_z的相位FW_phase以及信号FB_x,FB_z的相位BW_phase。

[0082] 为了确定旋转变换后的信号203的振幅和/或相位而对来自处理元件212的滤波后的信号的可选处理可以通过位于处理元件212之后的相位和振幅元件(未示出)来执行。信号FW_x,FW_z(即估计的向前回转分量)可以被描述为具有x和z坐标的矢量。因此,可以将相位和振幅元素配置为处理该矢量信号,以便确定该矢量的长度和角度,或者等效地,确定振幅和相位信号FW_amp,FW_phase。上述也同样适用于估计的向后回转分量。

[0083] 显然,可以以其他方式配置处理元件212,并且可以从旋转变换后的信号203确定振荡分量204,该振荡分量204包括振幅和相位之外的其他特征。

[0084] 例如,代替执行低通滤波,处理元件212可以被配置为陷波或带阻滤波器,以去除旋转变换后的信号203的特定频谱。因此,处理元件212通常可以被配置为滤波器,使得振荡分量信号204主要包含BW振荡分量和/或FW振荡分量的频谱。

[0085] 控制器220用于基于叶片振荡分量204来控制风力涡轮机100。控制信号y_ctrl可以根据用于控制例如如下所解释的桨距角或电力生产的已知方法来确定。

[0086] 例如,振荡分量204可用于确定需要控制动作以减小振荡的回转振荡情况。特别地,向后回转振荡模式BW可能通过由三叶片转子102和塔架101的相互作用引起的3P频率振荡而被激发。因此,当例如 $f_{BW} = f_i - f_{hub}$ 接近3P频率时,可能激发共振的向后回转振荡。即使没有确定回转振荡的频率(例如 f_{BW}),仅存在回转振荡的振幅(诸如BW_amp)也可用于设置需要进行控制的回转振荡情况。例如,当由于共振的回转共振和转子频率(诸如3P频率)的收敛而激发回转振荡时,降低转子速度 $f_{hub} = d\Phi/dt$ 的控制动作可以减小振荡振幅。

[0087] 振荡分量204(例如为振幅FW_amp或BW_amp的形式)可以与预定阈值进行比较,以确定存在需要控制动作的回转振荡,该控制动作使用确定的振荡分量204作为输入。

[0088] 可能会通过风力涡轮机的其他结构性振荡激发其他共振或非共振回转振荡(诸如由风引起的振荡以及与转子102的旋转相关联的其他激发)。这种其他的振荡可以同样地通过控制转子速度(例如通过降低转子速度)来减小。

[0089] 因此,通常,风力涡轮机的控制可以包括:取决于叶片振荡分量204来调节转子速度,以便减小回转振荡振幅。

[0090] 转子速度的调节可以包括调节桨距角和/或调节风力涡轮机的发电机的扭矩或功率参考,例如以降低转子速度。例如,控制信号y_ctrl可以包含用于功率转换器的功率参考或功率调节,或者控制信号y_ctrl可以包含用于风力涡轮机的桨距控制器的桨距参考或桨距调节。

[0091] 替代地或附加地,可以通过彼此独立地(即基于单独的叶片的单独的桨距参考)控制叶片103的桨距来减小回转振荡,其中桨距参考基于振荡分量204的相位信号FW_phase, BW_phase来确定,振荡分量204的相位信号FW_phase, BW_phase包含旋转变换后的振荡信号203的相位信息。振荡分量204的相位信号可以包括向前信号和向后信号中的一个或两个。附加地,桨距参考的确定可以包括向前信号和向后信号中的一个或两个的振幅信号FW_amp, BW_amp。因此,通过使用相位以及可选的振幅信号,可以控制叶片的桨距以抵消叶片回旋振荡。

[0092] 通过对叶片103执行单独的变桨,可以在不降低转子102的旋转速度的情况下衰减回转振荡。

[0093] 可以通过控制器220或风力涡轮机100的其他控制器部件来确定控制信号y_ctrl, 该控制信号y_ctrl用于控制桨距角或扭矩或功率参考以控制转子速度,用于控制单独的桨距角,或者用于其他控制目的(诸如关闭风力涡轮机)。

[0094] 可选地,控制系统250可以配置有附加的滤波器元件213(诸如带通滤波器),这些滤波器元件213被布置为在通过变换211执行旋转变换之前,基于关注频率fi对测量信号201, 202进行滤波。例如,带通滤波器213可以被布置为在通过旋转变换210对测量信号201进行变换之前对测量信号201进行滤波。在这种情况下,带通滤波器213被配置为使位于关注频率fi附近的频率通过。替代地,带通滤波器213可以被布置为对测量信号202或通过变换210先前旋转变换后的信号Fx, Fz进行滤波。在这种情况下,关注频率fi位于非旋转框架中的频率 $fi \pm f_{hub}$ 处,因此,带通滤波器213可以被配置为对频率 $fi \pm f_{hub}$ 中的一个或两个进行带通滤波。可能地,测量信号201, 202可以在旋转变换210之前通过fi处的带通滤波器213进行滤波,以及在旋转变换210之后通过 $fi \pm f_{hub}$ 处的另外的带通滤波器进行滤波。由于去除了其他无关或干扰频率,因此可以使处理元件212的滤波功能更简单,或者可以省略处理元件212。

[0095] 因此,可选的滤波器元件213可以被布置为将测量信号201, 202或其衍生信号(即,旋转变换后的信号Fx, Fz)滤波为叶片振荡的带通滤波后的信号分量,其中,在相对于测量信号或其衍生信号的测量框架定义的叶片振荡的频率处(即在频率fi处或在频率 $fi \pm f_{hub}$ 处)执行滤波。

[0096] 图3A图示了图2A的方法和控制系统250的替代实施例。图3A的方法类似地基于将测量信号201, 202或其衍生信号从测量框架旋转变换到至少一个目标框架(所述变换基于关注频率fi),以获得旋转变换后的信号301。旋转变换由旋转变换元件311执行,其中旋转变换包括目标框架相对于转子旋转方向的向后旋转方向或向前旋转方向。基于通过低通滤波器312的滤波,从旋转变换后的信号301生成所述至少一个叶片振荡分量204。

[0097] 在第一示例中,在转子框架中获得叶片信号Mr1-Mr3或轮毂信号Fhz, Fhz的形式的测量信号201。在转子框架中,关注的振荡具有关注频率fi。关注的振荡相对于转子旋转120在向前方向或向后方向上旋转。旋转变换元件311基于关注频率fi,并且被布置为将测量框架或转子框架旋转到非旋转框架。

[0098] 旋转变换元件311可以体现为相对于转子旋转方向作用在向后旋转方向BW上的旋转变换Rhub2BW,以将测量框架中的向后回转振荡变换为目标框架中的零频率。Rhub2BW变换是按上述获得的回转振荡的角度 θ_{fi} 的函数。

[0099] 替代地或附加地,旋转变换元件311可以体现为相对于转子旋转方向作用在向前旋转方向FW上的旋转变换Rhub2FW,以将测量框架中的向前回转振荡变换为目标框架中的零频率。Rhub2FW变换也是回转振荡的角度 θ_{fi} 的函数。

[0100] 在测量信号201包括叶片信号Mr1-Mr3的情况下,叶片信号必须如上所述地被投影到轮毂坐标系Xh,Zh上。

[0101] 在测量信号202包括机舱信号Fnx,Fnz的情况下,机舱信号在通过旋转元件311进行旋转变换之前首先需要例如通过旋转变换元件211a从非旋转框架旋转变换到转子框架。

[0102] 图3B示出了来自旋转变换元件311的旋转变换后的信号301的频谱。上面的曲线图示出了Rhub2FW旋转变换的效果,其将转子框架中的向前回转振荡变换为零频率或低频率范围。通过Rhub2FW旋转变换,转子框架中的向后回转振荡将被变换为频率 $2 \cdot f_i$,即被变换为关注频率的两倍。通过使用被配置为不影响向前回转振荡的低频分量的低通滤波器或者替代的陷波滤波器,可以容易地去除向后回转振荡的高频分量。低通或陷波滤波器在滤波器部件312中实现。因此,通过使用Rhub2FW旋转变换和滤波器312,可以确定针对向前回转振荡的振幅和/或相位的形式的叶片振荡分量204。

[0103] 类似地,下面的曲线图示出了Rhub2BW旋转变换的效果,其将转子框架中的向后回转振荡变换为零频率或低频率范围。通过Rhub2BW旋转变换,转子框架中的向前回转振荡将被变换为频率 $2 \cdot f_i$ 。通过使用相同的滤波器312来去除向前回转振荡的高频分量。因此,通过使用Rhub2BW旋转变换和滤波器312,可以确定针对向后回转振荡的振幅和/或相位的形式的叶片振荡分量204。

[0104] 尽管已经结合特定实施例描述了本发明,但是不应以任何方式将其解释为限于所呈现的示例。本发明的范围将根据所附的权利要求书来解释。在权利要求的上下文中,术语“包括”或“包含”不排除其他可能的元件或步骤。而且,提及诸如“一”或“一个”等的引用不应被解释为排除多个。权利要求中关于附图中指示的元件的参考标记的使用也不应被解释为限制本发明的范围。此外,可以将不同权利要求中提到的单个特征有利地组合,并且在不同权利要求中提及这些特征并不排除特征的组合是不可能和有利的。

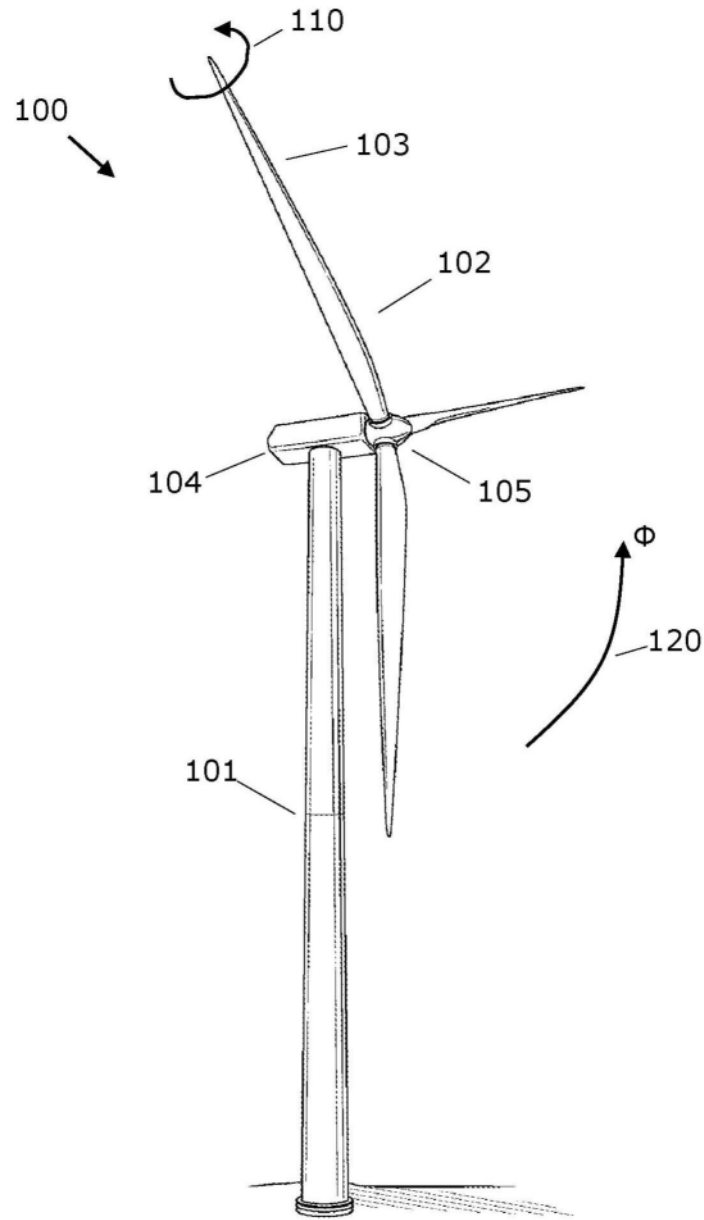


图1A

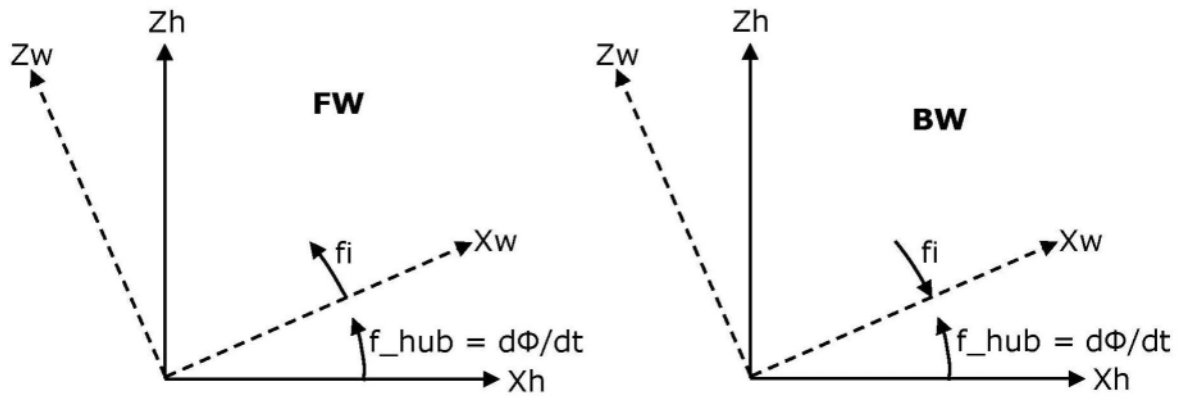


图1B

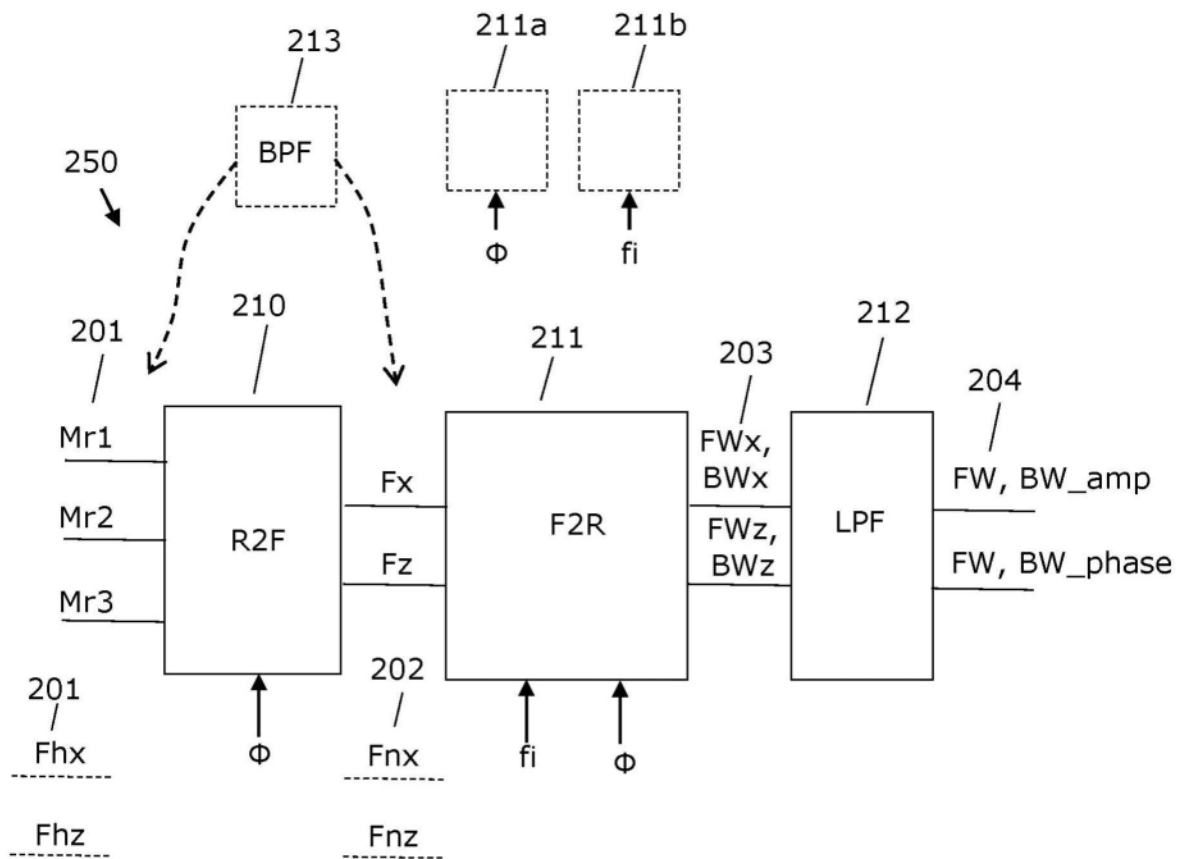


图2A

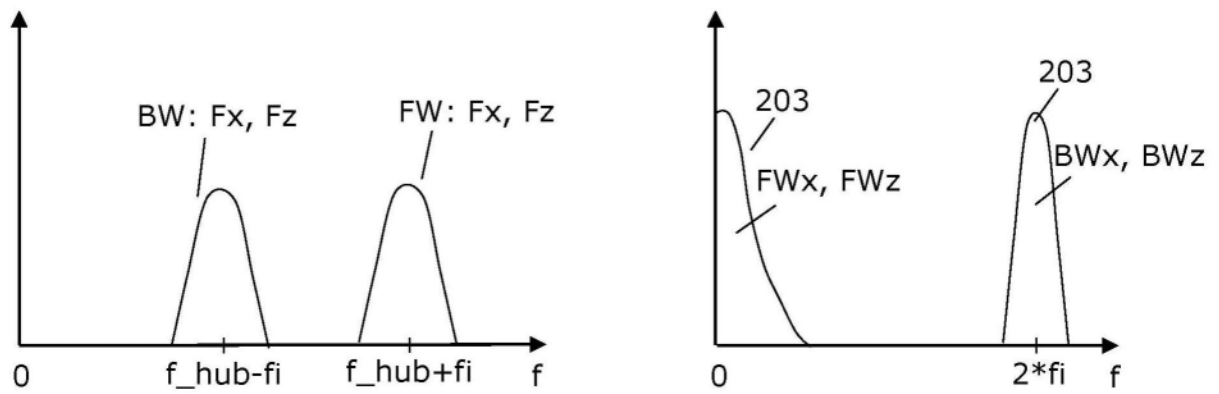
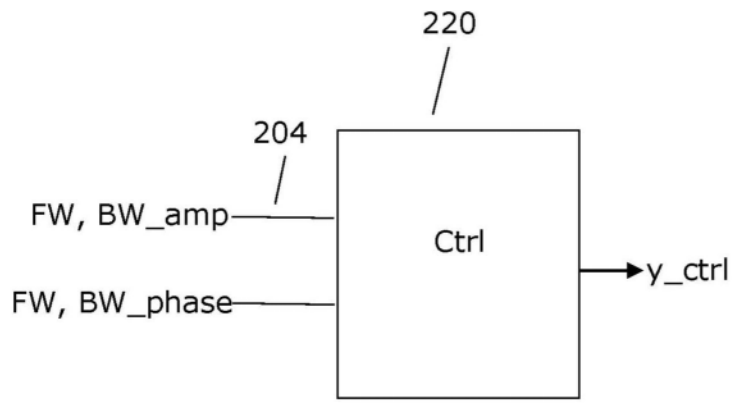


图2B

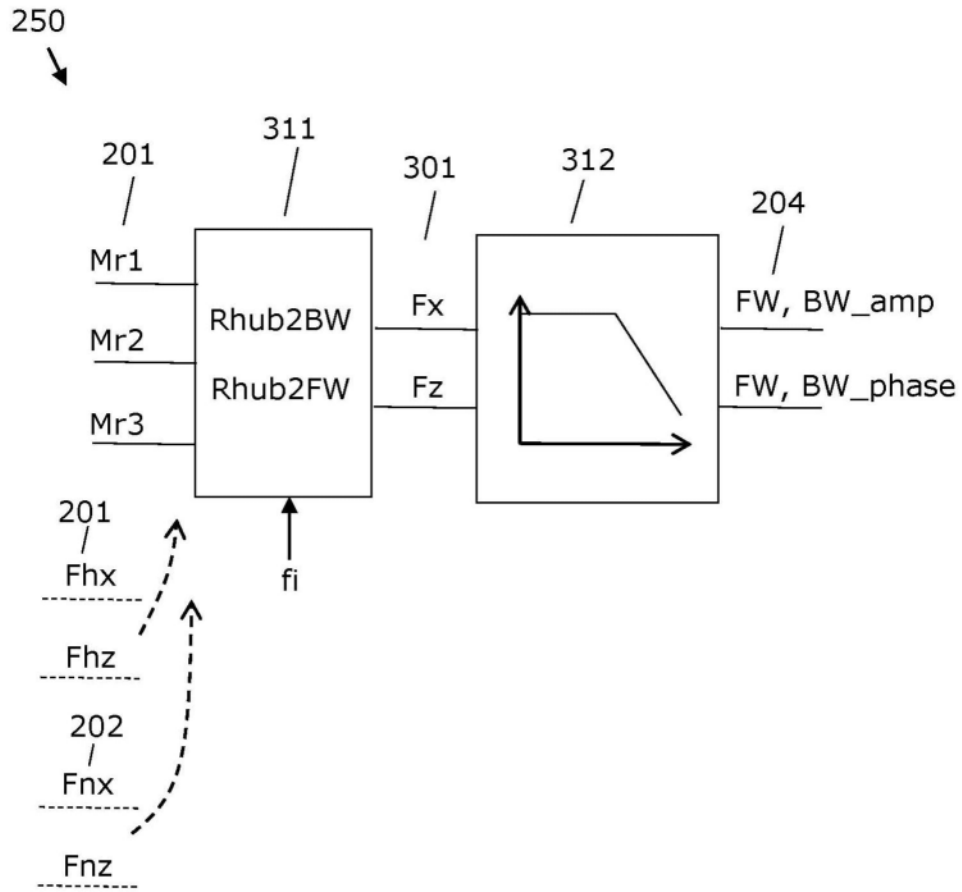


图3A

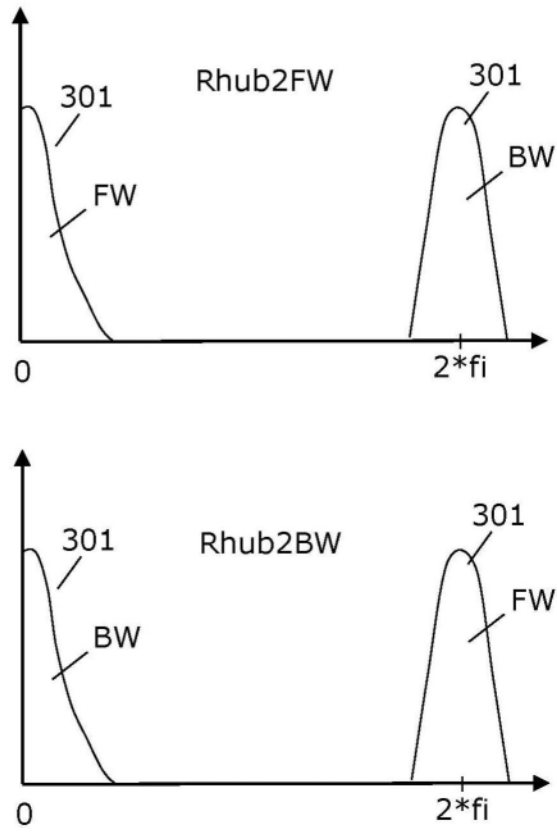


图3B

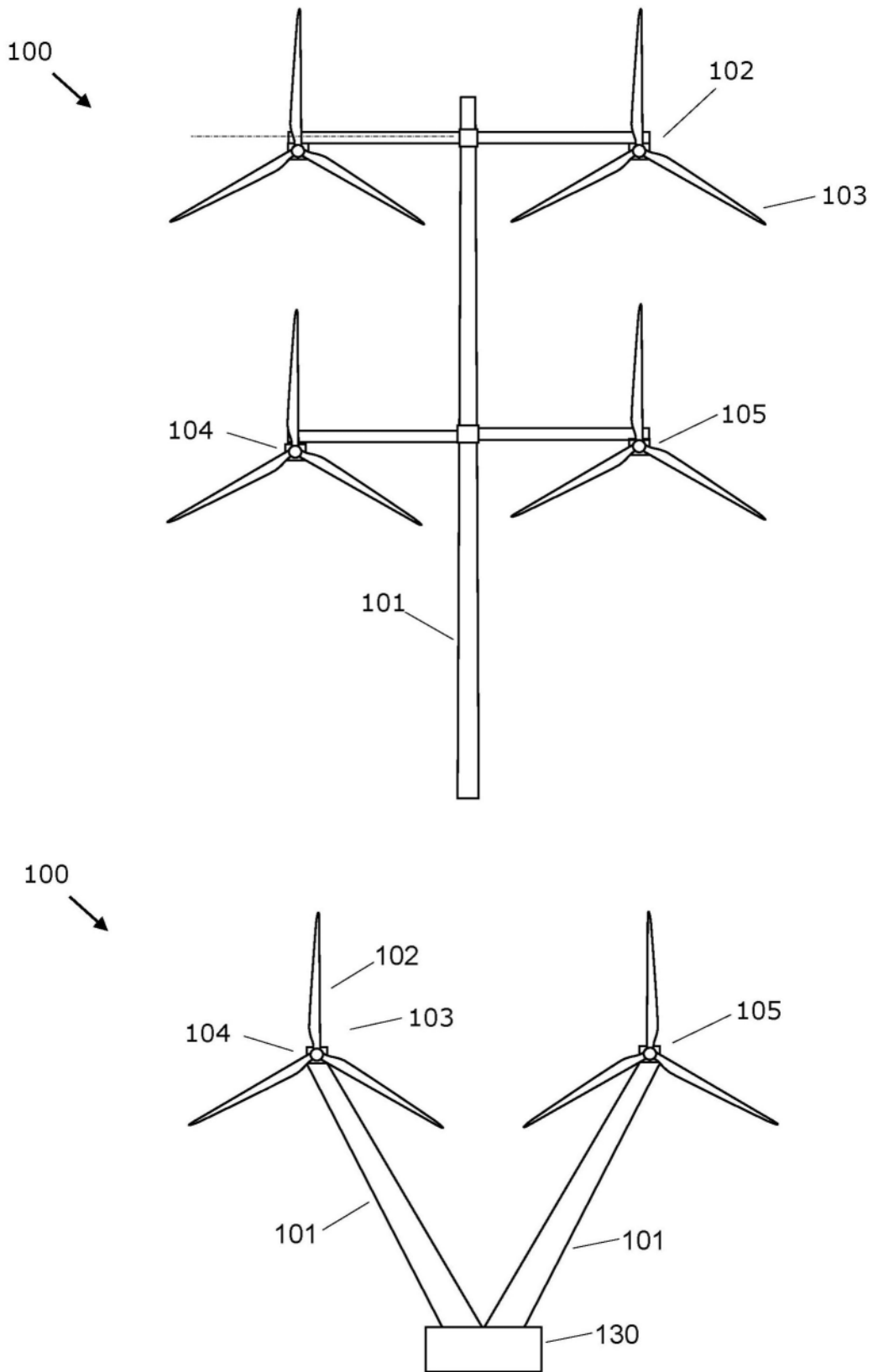


图4