



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101319655 B

(45) 授权公告日 2013.03.20

(21) 申请号 200810110374.3

CN 1032835 A, 1989.05.10, 全文.

(22) 申请日 2008.06.04

US 4297076 A, 1981.10.27, 全文.

(30) 优先权数据

审查员 陈翔

07010987.1 2007.06.04 EP

(73) 专利权人 西门子公司

地址 德国慕尼黑

(72) 发明人 珀·埃格达尔

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 谢强

(51) Int. Cl.

F03D 7/04 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 1035547 A, 1989.09.13, 全文.

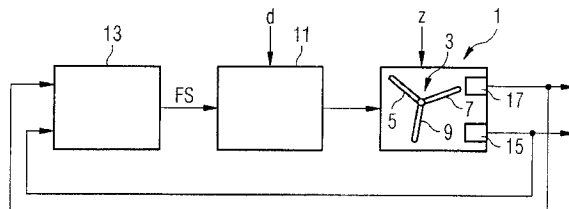
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

(54) 发明名称

用于控制风力涡轮机转子的负载减少的方法和
和设备

(57) 摘要

减少风力涡轮机转子 (3) 负载的方法。检测
转子叶片 (5、7、9) 上的负载;建立修改转子叶片
(5、7、9) 的设置的个别控制信号,每个控制信号
是包含幅度和角度的复数,幅度定义各个设置的
修改的程度,角度定义相对于转子方位角各个设
置的修改的相位,由相位校正因子来校正复数的
角度;以及给空气动力学活动零件提供个别控制
信号。基于PI-控制系统 (47) 建立个别控制信号;
对PI-控制系统 (47) 的输入是复数负载向量;复
数负载向量的复数向量分量的数量对应于转子叶
片 (5、7、9) 的数量;向量分量的幅度定义负载量
值,该向量分量的角度定义负载相位;在负载向
量输入到PI-控制系统 (47) 之前用相位校正因子
乘以负载向量。



1. 一种用于控制具有转子叶片 (5、7、9) 的风力涡轮机转子 (3) 的负载减少的控制方法,其中所述转子叶片 (5、7、9) 包括响应于用于修改其设置的控制信号的至少一个空气动力学活动零件,所述方法包括步骤

- 关于所述转子的方位角检测作用于转子叶片 (5、7、9) 上的负载;

- 建立用于修改所述转子叶片 (5、7、9) 的空气动力学活动零件的设置的个别控制信号,其中,每个个别控制信号是包含幅度和角度的复数,其中该幅度定义相应设置的修改的程度,该角度定义相对于所述转子的方位角的、相应设置的修改的相位,且其中,所述复数的角度被用从负载向量的复数向量分量的幅角中导出的相位校正因子校正;以及

- 给所述空气动力学活动零件提供所述个别控制信号;

其特征在于

- 基于 PI- 控制系统 (47) 建立所述个别控制信号;

- 对所述 PI- 控制系统 (47) 的输入是复数负载向量;

- 所述复数负载向量的复数向量分量的数量对应于转子叶片 (5、7、9) 的数量;

- 向量分量的幅度定义了作用于相应叶片 (5、7、9) 上的负载的量值,且该向量分量的角度定义了该负载相对于所述转子 (3) 的方位角的相位;以及

- 在所述负载向量被输入到所述 PI- 控制系统 (47) 之前用所述相位校正因子乘以所述负载向量。

2. 根据权利要求 1 所述的控制方法,其特征在于

所述相位校正因子是具有统一绝对值和定义相位校正的幅角的至少一个复数。

3. 根据权利要求 2 所述的控制方法,其特征在于

所述相位校正因子包括具有统一绝对值和对于所述负载向量的每个向量分量定义相位校正的幅角的复数。

4. 根据权利要求 3 所述的控制方法,其特征在于

所述相位校正因子是要与所述负载向量相乘的矩阵。

5. 根据权利要求 1 所述的控制方法,其特征在于

所述相位校正因子通过下述操作来得到:相对于时间来微分所述复数向量分量的幅角,随后积分所述复数向量分量的幅角,并形成具有统一绝对值和用虚数单位乘以积分的结果作为幅度的复数。

6. 一种用于控制具有转子叶片 (5、7、9) 的风力涡轮机转子 (3) 的负载减少的控制设备,其中所述转子叶片 (5、7、9) 包括响应于用于修改其设置的控制信号的至少一个空气动力学活动零件,所述设备包括:

- 负载数据输入 (19),用于接收表示作用于转子叶片 (5、7、9) 上的负载的负载数据;

- 转子方位角输入 (21),用于接收表示转子方位角的转子方位角数据;

- 振荡检测单元 (23),被连接于负载数据输入 (19) 和转子方位角输入 (21),用于接收所述负载数据和所述转子方位角数据,其被设计来从所述负载数据和所述转子方位角数据检测作用于转子叶片 (5、7、9) 上的负载的频率分量,且被设计来输出复数负载向量,该复数负载向量的复数向量分量的数量对应于转子叶片 (5、7、9) 的数量,其中向量分量的幅度定义了作用于相应叶片 (5、7、9) 上的负载的量值,且所述向量分量的角度定义了该负载相对于所述转子方位角的相位;以及

- 校正因子计算器单元 (27)

其特征在于

- 所述校正因子计算器单元 (27) 连接于所述振荡检测单元 (23), 用于接收所述负载向量, 且被设计来基于所述负载向量计算和输出相位校正因子;

- 乘法器 (45), 被连接于所述振荡检测单元 (23), 用于接收所述负载向量, 且被连接于所述校正因子计算器单元 (27), 用于接收所述相位校正因子, 且其被设计来用所述相位校正因子来乘以所述负载向量;

- PI- 控制器 (47), 被连接于所述乘法器 (45) 用于接收乘法结果, 且被设计来建立和输出用于修改所述转子叶片 (5、7、9) 的空气动力学活动零件的设置的个别控制信号,

- 解码器 (49), 被用于接收所述 PI- 控制器 (47) 的输出, 其中, 该解码器 (49) 也被连接于方位角数据输入 (21) 以接收由方位角检测器 (17) 提供的方位角数据, 并且基于所述方位角数据, 该解码器 (49) 将由该 PI- 控制器 (47) 提供的控制信号分布在控制信号输出 (29, 31, 33) 上, 从该控制信号输出 (29, 31, 33) 控制信号被输送给叶片的活动翼的致动器 (11)。

7. 根据权利要求 6 所述的控制设备, 其中, 所述校正因子计算器单元 (27) 包括:

- 幅角确定单元 (35), 被连接于所述振荡检测单元 (23) 以接收所述负载向量, 且被设计来确定负载向量的复数向量分量的幅角并输出所述幅角;

- 微分器 (37), 被连接于所述幅角确定单元 (35) 以接收所述幅角, 且被设计来确定所述幅角的时间导数并输出所述时间导数;

积分器 (41), 被连接于所述微分器以接收所述幅角的时间导数, 且被设计来积分所述幅角的时间导数并输出所述积分值; 以及

复数因子建立单元 (43), 被连接于所述积分器 (41) 以接收所述积分值, 且被设计来通过用虚数单位乘以所述积分值和随后的求幂来形成所述相位校正因子。

用于控制风力涡轮机转子的负载减少的方法和设备

技术领域

[0001] 本发明涉及用于控制风力涡轮机 (wind turbine) 转子的负载减少的方法和用于进行该方法的控制设备。

背景技术

[0002] 当风力涡轮机工作在湍流 (turbulent) 风的情况下或在气流畸变 (flow distortion) 例如高风切变 (high wind shear) 的情况下时, 风力涡轮机转子的叶片受到很大的动态负载。因此, 直到现在, 已经成型 (dimension) 风力涡轮机转子的叶片和支撑结构, 以便能够经受住在涡轮机所证实合格的情况下可能发生的动态负载。近年来, 已经清楚, 简单地具有对于可能发生无论何种负载来说足够的结构上的强度的继续实践将导致对于大风力涡轮机的非常繁重的设计。因此, 已经对于工作负载的活动减少 (active reduction) 开发了各种方法。

[0003] 用于活动地减少工作负载的一个方法是所谓的周期叶片俯仰 (cyclic blade pitch)。例如如在 US 4298313 中描述的, 在周期叶片俯仰中, 在每次旋转期间改变每个转子叶片的俯仰设置。最近, 已经描述了活动的翼调节 (flap regulation), 其中改变叶片外形的空气动力学属性而不改变叶片俯仰。

[0004] 不考虑所选的致动 (actuation) 方法, 任何活动负载减少系统都需要由调节器来控制。例如在 EP 1666723 A1 中描述了用于调节转子叶片的俯仰角 (pitch angle) 的调节器。在 US 2006/0145483 A1 中描述了用于基于比例积分控制策略 (proportional-integral control strategy, PI-控制) 来控制风力涡轮机的转子叶片的俯仰角或转子叶片的空气动力学外形的控制方法和控制设备。

[0005] US 4297076 描述了具有俯仰可变的叶片的尖端部分 (tip portion) 的风力涡轮机, 以及用于控制俯仰以便减轻叶片上的弯矩 (bending moment) 的设备。控制设备包括允许相对于转子方位角来校正控制信号的相位角的单元。

[0006] EP 1719910 A1 描述了用于风力涡轮机生成器的活动振动衰减方法以及用于进行该方法的设备。通过用传输函数过滤叶片俯仰角参考信号, 来提供在叶片俯仰角参考信号中的衰减信号分量, 其中该传输函数包括用于逼近响应于该叶片俯仰角参考信号的俯仰改变机制的滞后 (lag) 的时间常数。在 GB2117934A 中公开了类似的方法。

[0007] Bossanyi, E. A. : Individual Blade Pitch Control for Load Reduction, Wind Energy, Wiley, Chichester, GB Volume 6 (2002-10-08) 119 到 128 页描述了使用被发送给每个叶片的不同的俯仰角需求作为减少负载的手段的可能性。LQG 控制器 (linear, quadratic, Gaussian controller, 线性、二次、高斯控制器) 被用于导出控制信号。

[0008] Caselitz P. et al. : "Reduction of Fatigue Loads on Wind Energy Converters by Advanced Control Methods", European Wind Energy Conference, XX, XX, 1997 年 10 月, 555 到 558 页描述了由各个叶片控制进行的倾斜和偏转力矩补偿。

[0009] 但是, 活动负载减少系统的调节不是容易的任务, 因为需要人们快速地适当调节,

特别是在涉及快速负载波动的情况下。至今为止没有披露用于这种快速调节的真正令人信服的方法。在各种配置中使用比例积分微分调节机制的传统调节方法不具有进行所述快速调节所需要的预测能力。此外, PID 调节机制的响应时间过长。已经通过应用各种类型的学习算法达到了更好的结果。但是, 这种学习算法趋于导致不容易被建模且其中设计者难以在所有情况下评估适当函数的“黑盒子”系统。

发明内容

[0010] 因此, 本发明的目的是提供用于控制风力涡轮机转子的负载减少的改进的控制方法和改进的控制设备。

[0011] 本发明控制方法被用于控制风力涡轮机转子的负载减少, 该风力涡轮机转子的转子叶片包括响应于用于修改其设置的控制信号的至少一个空气动力学活动零件。在这一点上, 广义上, 空气动力学活动零件应该被理解为能够活动地改变转子叶片的空气动力学属性的任何零件, 诸如翼 (flap)、用于设置转子叶片的俯仰角的设备或允许修改叶片的螺旋桨 (airfoil) 的空气动力学外形的设备。该方法包括步骤: 相对于转子的方位角、即从在空间上固定的转子轴心测量的径向, 检测作用于转子叶片上的负载。该径向可以例如从转子轴心垂直向上延展。基于 PI- 控制系统来建立用于修改和设置转子叶片的空气动力学活动零件的个别控制信号, 且向空气动力学活动零件提供个别控制信号。个别控制信号的每个是包含幅度和角度的复数 (complex), 其中该幅度定义各个设置的修改的程度, 且该角度定义相对于转子的方位角的各个设置的修改的相位。由相位角校正因子来校正该复数。对于 PI- 控制系统的输入是复数负载向量。复数负载向量分量的数量对应于转子叶片的数量, 即复数负载向量将具有对于三个叶片的转子的三个复向量分量。但是, 应该提到, 本发明的控制方法适用于具有任何数量的转子叶片的转子, 即使目前仅存在一个转子叶片。如果在极面表述方式中给出向量分量, 负载向量的向量分量的幅度定义作用于各个叶片上的负载的量值, 且该向量分量的角度定义负载相对于转子的方位角的相位。为了校正表示个别控制信号的复数的角度, 在将负载向量输入到 PI- 控制系统之前, 用相位校正因子乘以该负载向量。

[0012] 本发明基于下列考虑:

[0013] 在空气动力学活动设备或零件的传感器和设置系统中的延迟对得到的调节响应具有很大的影响。通过使用用于校正表示控制信号的复数的相位校正因子, 这种延迟可以被调整 (adapt) 且被考虑, 以便可以优化定义相对于转子的方位角的、修改的相位的角度。相比于传统的 PID- 调节方法, 由于在传感器和设置系统中的延迟通过相位校正因子被考虑了, 本发明方法提供对所检测的负载波动的快速响应。相比于学习算法, 本发明的控制方法不趋于导致具有所述困难的“黑盒子”系统。可以通过任何适当的传感器装置、例如加速计或应变测量器 (strain gauge) 来测量负载波动。

[0014] 如所述, 在表示个别控制信号的复数与在各个转子叶片上的响应负载之间的相位角取决于诸如在用于启动空气动力学活动零件的启动系统中的延迟之类的因子, 例如来自伺服控制器的闭环响应的相位影响。这种延迟将引入在负载向量的复数分量的幅角 (argument) 中的人为时间依赖 (artificial time dependency)。当积分该负载向量时, 该时间依赖将导致在复数平面中的分量的人为旋转。因此, 在个别控制信号中的复数的角度

将不准确。但是,通过在将负载向量输入 PI- 控制系统之前用相位校正因子乘以该负载向量,可以抵消该旋转,以便控制信号包含在其复数中的正确的角度。

[0015] 如果以极面表示方法来表示该复数,相位校正因子可以被写成具有统一绝对值和定义相位校正的幅角的至少一个复数。具体地,相位校正因子可以包括具有统一绝对值和定义对于负载向量的每个向量分量的相位校正的幅角的复数。在这种情况下,相位因子可以被表示为要与负载向量相乘的对角矩阵。另一方面,如果相位校正因子仅包含具有统一绝对值和定义对于负载向量的所有向量分量来说共同的相位校正的幅角的单一复数,用相位校正因子乘以负载向量将导致用标量 (scalar) 因子乘以负载向量。

[0016] 可以从负载向量的复向量分量的幅角导出相位校正因子。具体地,可以通过相对于时间来微分复向量分量的幅角、然后在确定时间间隔上积分复向量分量的幅角、并形成具有统一绝对值和作为幅角的由虚单位乘以该积分的结果的复数,来导出相位校正因子。

[0017] 用于控制具有包括响应于用于修改其设置的控制信号的至少一个空气动力学活动零件的转子叶片的风力涡轮机转子的负载减少的本发明的控制设备包括负载输入输入、转子方位角输入、振荡检测单元、校正因子计算器单元、乘法器和 PI- 控制器。通过负载数据输入,控制设备可以接收表示作用于转子叶片上的负载的负载数据。可以通过适合于测量作用于转子叶片上的负载的任何传感器装置、诸如加速计或应变测量器来提供负载数据。通过转子方位角输入,由方位角检测器提供的转子方位角数据被输入到控制设备。振荡检测单元被连接于负载数据输入以及被连接于转子方位角输入用于接收负载数据和转子方位角数据。设计以从负载数据和转子方位角数据检测作用于转子叶片上的负载的频率分量。另外,设计以输出复数负载向量,该复数负载向量的复向量分量的数量对应于转子叶片的数量。在极面表示方式中,复向量分量的幅度定义作用于各个叶片上的负载的量值,且在复数平面中的向量分量的角度定义相对于转子的方位角的、负载的相位。校正因子计算器单元被连接于振荡检测单元用于接收负载向量。设计以基于负载向量来计算且输出相位校正因子。乘法器还被连接于振荡检测单元用于接收负载向量。另外,其被连接于校正因子计算器单元用于接收相位校正因子。设计以用相位校正因子乘以负载向量。PI- 控制器被连接于乘法器用于接收乘法结果。设计以建立和输出用于修改转子叶片的空气动力学活动零件的设置的个别控制信号。本发明的控制设备具体地适用于进行本发明的控制方法。因此,其提供已经相对于该控制方法而描述的属性和优点。

[0018] 在本发明的控制设备的具体实施方式中,控制因子计算器单元包括幅角确定单元、微分器、积分器和复数因子建立单元。在该实施方式中,幅角确定单元被连接于振荡检测单元以接收负载向量,并被设计以确定负载向量的复数分量的幅角且以输出该幅角。微分器被连接于幅角确定单元,用于接收幅角。设计以确定幅角的时间导并输出时间导数。积分器被连接于微分器,用于接收幅角的时间导数。设计以在确定时间间隔上积分幅角的时间导数,并输出积分值。最后,复数因子建立单元被连接于积分器,用于接收积分值。设计以通过用虚数单位乘以积分值和随后的求幂来形成相位校正因子。通过微分该幅角,可以从幅角中消除幅角的非时间依赖 (non-time dependent) 的项。然后,通过计算定积分,可以导出常数幅角,这表示来自在积分时段上相加 (summarise) 的幅角中的人为时间依赖的相位错误。然后,通过用虚数单位 i 乘以积分结果并建立项 $\exp(i\alpha)$, 其中 α 表示积分结果,提供了考虑在传感器和启动系统中的延迟的适当的相位校正因子。

附图说明

[0019] 结合附图,从本发明的实施例的下列描述中将清楚本发明的进一步特征、属性和优点。

[0020] 图 1 以方块图的形式示出具有本发明的控制设备的风力涡轮机。

[0021] 图 2 在详细的方块图中示出控制设备。

具体实施方式

[0022] 现在将参考图 1 和 2 描述本发明的控制方法和本发明的控制设备。

[0023] 图 1 示出了包括具有三个转子叶片 5、7、9 的转子 3 的风力涡轮机 1。每个转子叶片被装配有活动翼,作为在用于活动负载减少的本实施例中使用的空气动力学活动零件。对于活动翼,附加地,或作为替换,可以在作为空气动力学活动零件的转子叶片 5、7、9 处存在俯仰控制机制。本实施例的活动翼被装配有在图 1 中的方块 11 示意地描述的、且响应于由控制设备 13 提供的至少一个控制信号 FS 的致动器 (actuator)。因此,控制设备 13 被连接于致动器 11,用于输出定义活动翼的设置的控制信号。

[0024] 转子叶片 5、7、9 被装配有测量作用于翼上的负载的应变 (strain) 测量器 (gauge)。以方块 15 在图 1 中示意地示出了这些应变测量器。但是,可以使用用于测量负载的不同的传感器装置,例如加速计。另外,风力涡轮机 1 装配有方位角检测器 17,用于检测转子 3 关于给定方向、在本实施例中关于从转子轴心垂直向上的方向的方位角。应变测量器 15 和方位角检测器 17 被连接于控制设备 13,用于分别输送负载数据和方位角数据。该连接形成了反馈环,以便实现反馈控制,即基于由应变测量器 15 提供的负载数据和由方位角检测器 17 提供的方位角数据来确定用于修改活动翼的设置以便最小化由应变测量器 15 测量的负载的控制信号。

[0025] 现在将参考图 2 更详细地描述控制设备 13。控制设备包括:负载数据输入 19,从应变测量器 15 接收负载数据;以及转子方位角输入 21,用于从方位角检测器 17 接收转子方位角数据。其进一步包括傅立叶分析器 23、控制信号计算器 25、校正因子计算器 27 和在本实施例中的用于向致动器 11 输出三个控制信号的控制信号输出 29、21、33。

[0026] 傅立叶分析器 23 相对于方位角数据分析负载数据,以便连续导出作用于转子叶片 5、7、9 的翼上的负载的傅立叶频谱系数。傅立叶分析器的输出是复数负载向量,即具有三个复数向量分量 L1、L2、L3 的向量 L,其中每个向量分量表示由单个转子叶片的应变测量器测量的负载。本领域技术人员很清楚,如果转子包括多于或少于三个的转子叶片,则向量分量的数量可以多于或少于三个。换句话说,复数向量分量的数量与转子叶片数量相关。如果以极面 (polar) 表示方式来表示复数向量分量,则由在复数平面中的各个向量分量的幅度和相对于复数平面的实数轴的角度来给出每个向量分量。该角度被称为复数的幅角 (argument)。由于在应变测量器 15 和 / 或方位角检测器 17 和 / 或致动器 11 中的延迟,可能出现在复数向量分量 L1、L2、L3 的幅角中的、将在本发明的控制设备中被校正的人为时间依赖。

[0027] 校正因子计算器 27 被连接于傅立叶分析器 23,以接收负载向量 L。它基于所接收的负载向量来计算并输出相位校正因子。当计算对于致动器 11 的控制信号时,所计算的相

位校正因子将抵消负载向量的向量分量的幅角中的人为时间依赖。控制信号计算器被如此连接于傅立叶分析器 23 以接收负载向量,并被如此连接于校正因子计算器 27 以接收相位校正因子。另外,控制信号计算器 25 被连接于转子方位角输入以接收用作触发器的转子方位角信号,用于解码对于转子叶片 5、7、9 个别控制信号的分布。控制信号计算器 25 被进一步连接于用于输出被解码的控制信号的三个控制信号输出 29、31、33,用于修改活动翼的设置以便最小化作用于翼上的负载。

[0028] 复数负载向量分量 L_1 、 L_2 、 L_3 每个由复数 $Z_1=R_1\exp(i\phi_1)$ 、 $Z_2=R_2\exp(i\phi_2)$ 和 $Z_3=R_3\exp(i\phi_3)$ 表示,其中 R 表示各个复数的幅度, ϕ 表示幅角。如上所述,幅角 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 可以包括由于在传感器中或在致动器中的延迟而导致的人为时间依赖。这些人为时间依赖被在相位校正计算器 27 中计算的相位校正因子考虑。

[0029] 相位校正计算器 27 包括:幅角提取单元 35,用于提取复数向量分量 L_1 、 L_2 、 L_3 的幅角 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 ;微分器 37,连接于幅角提取单元 35 用于接收所提取的幅角,且被设计来计算幅角的时间导数;放大器 39,连接于微分器用于接收微分后的幅角,且被设计来放大微分后的幅角并输出被放大的微分后的幅角;积分器 41,被连接于放大器 39 用于接收被放大的微分后的幅角,且被设计以在给定采样时段上积分被放大的微分后的幅角,并输出每个被放大的微分后的幅角的积分值;以及复数校正因子建立单元 43,其形成具有幅度为 1 和积分结果乘以虚数单位 i 作为每个积分结果的幅角的复数。因此,以如下形式的矩阵来表示复数相位校正因子:

$$[0030] \begin{pmatrix} \exp(i\alpha_1) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(i\alpha_2) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(i\alpha_3) \end{pmatrix}$$

[0031] 其中, α_1 、 α_2 、 α_3 表示积分结果。通过相对于时间来微分复数负载向量分量的幅角 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 ,对于幅角的非时间依赖的贡献 (contribution) 不参与进一步的处理。这些非时间依赖的贡献将表示负载相对于转子的方位角的实际相位,且因此不应该被校正。然后,通过再次在例如采样时段上积分微分后的幅角,在该采样时段内的人为时间依赖的影响被计算,且被用于形成用于在该采样时段上校正负载向量 L 的相位校正因子。

[0032] 控制信号计算器 25 包括:乘法器,其被连接于傅立叶分析器 23 以接收负载向量 L ,并被连接于校正因子计算器 27 以接收复数校正因子。PI-控制器 47 被连接于乘法器 45 以接收乘法结果,并计算用于适当地修改转子叶片 5、7、9 的翼的设置以便最小化作用于翼上的负载的控制信号。PI-控制器包括并行的比例控制器即放大器 51 和积分控制器即放大器 53 和积分器 55。通过相加器 57 来结合比例控制器和积分控制器的输出,以形成 PI-控制器的输出。由解码器 49 接收该输出,其中解码器 49 也被连接于方位角数据输入 21 以接收由方位角检测器 17 提供的方位角数据。基于方位角数据,解码器将由 PI-控制器提供的控制信号分布在控制信号输出 29、31、33 上,从该控制信号输出 29、31、33,控制信号被输送给叶片的活动翼的致动器 11。

[0033] 虽然,在本实施例中,对于每个复数负载向量 L_1 、 L_2 、 L_3 分量计算了各个相位校正因子,但是可以仅计算对于复数负载向量分量 L_1 、 L_2 、 L_3 来说共用 (common) 的单个复数相位校正因子。但是,各个相位校正因子是否必需或共用的相位校正因子是否足够取决于在

致动器和传感器中出现的延迟。

[0034] 相位校正因子减少复数负载向量分量在复数平面中的圆周移动,并强迫负载向量具有朝向 0 的方向。

[0035] 本发明提供一种方法,其中用在传统的、确定性的调节算法上叠加预测功能的调节方法来替代传统调节方法和增强学习算法。本发明的优点在于,它不需要依靠“真的”学习算法,而保留了容易建模的、传统的调节的益处,同时消除了这种传统调节的调节延迟的缺点。

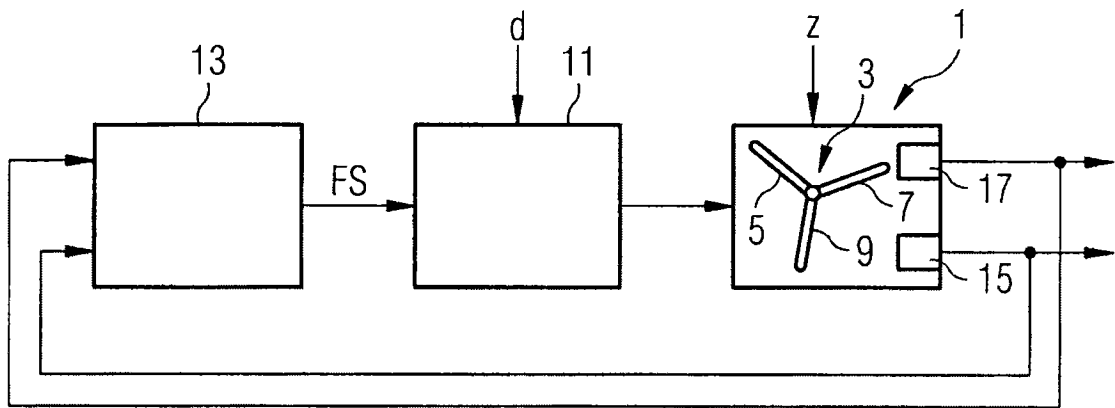


图 1

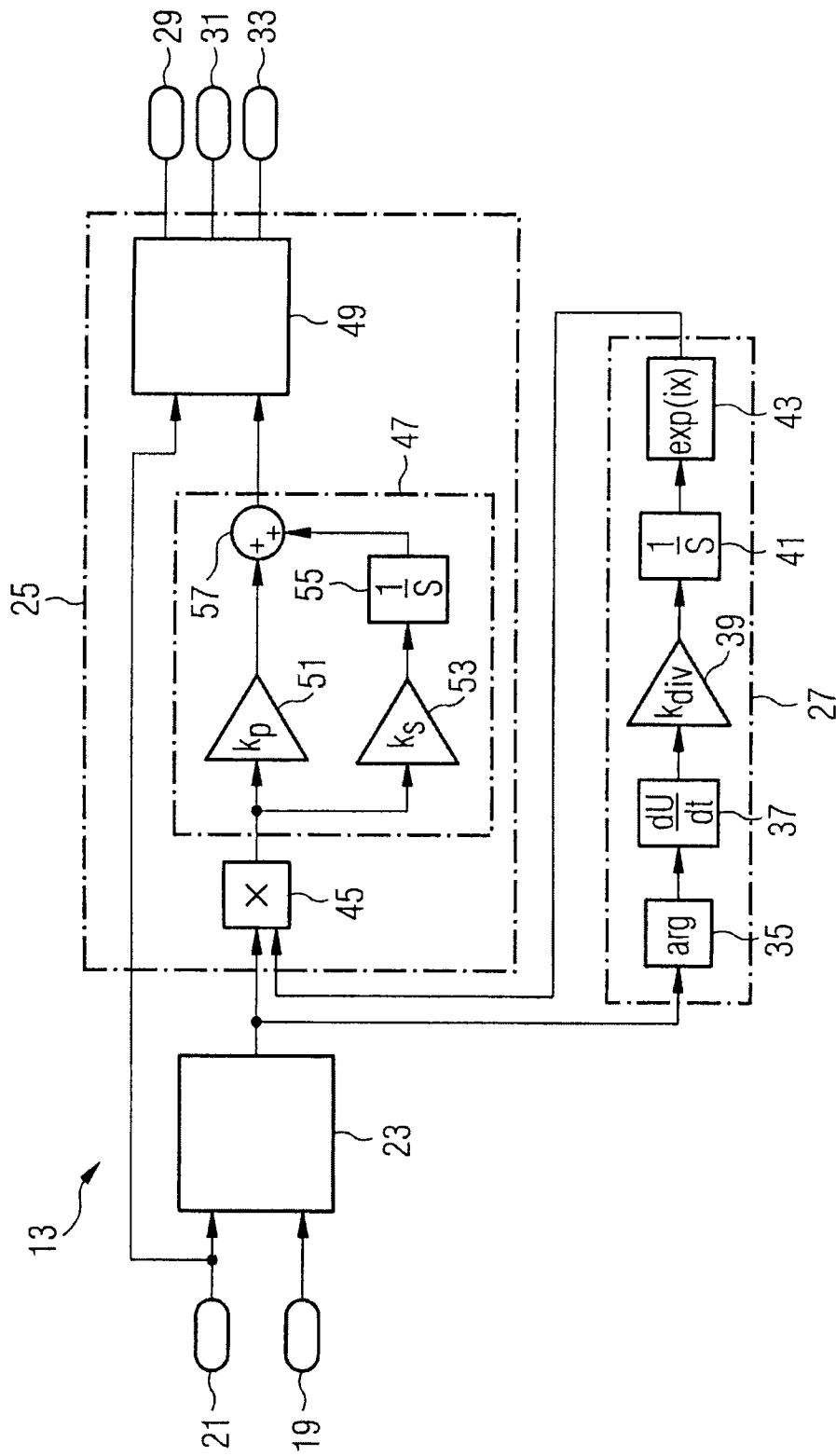


图 2