



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105863971 A

(43)申请公布日 2016.08.17

(21)申请号 201610483663.2

(22)申请日 2016.06.27

(71)申请人 国电联合动力技术有限公司

地址 100000 北京市海淀区西四环中路16  
号院1号楼8层

(72)发明人 彭超 王小虎 朱世龙

(74)专利代理机构 北京方韬法业专利代理事务  
所 11303

代理人 朱丽华

(51)Int.Cl.

F03D 80/00(2016.01)

F03D 7/00(2006.01)

G06F 17/50(2006.01)

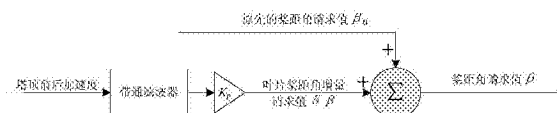
权利要求书1页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

一种适用于风力发电机组塔筒避振的虚拟  
质量控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种适用于风力发电机组塔筒避振的虚拟质量控制方法,通过控制叶片桨距角,改变叶轮推力,实现改变闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率值,使其与叶轮转频一倍频错开,实现风力发电机组塔筒避振。在叶轮转速达到将要发生叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率共振时叶轮转速的0.95~1.05倍之间时启用该控制方法。本发明通过改变叶片桨距角,使得该风力发电机组可以稳定运行于叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率潜在共振的风速区间,避开共振风险,实现塔筒避振。还通过设置带通滤波器,有选择性的提取塔筒前后方向振动加速度一阶固有频率分量,更进一步的加强减振效果。本发明方法简单、运行稳定,避振效果好。



1.一种适用于风力发电机组塔筒避振的虚拟质量控制方法,其特征在于,通过控制叶片桨距角,改变叶轮推力,实现改变闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率值,使其与叶轮转频一倍频错开,实现风力发电机组塔筒避振。

2.根据权利要求1所述的虚拟质量控制方法,其特征在于,所述方法在叶轮转速达到将要发生叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率共振时叶轮转速的0.95~1.05倍之间时启用。

3.根据权利要求2所述的虚拟质量控制方法,其特征在于,所述叶片桨距角的增量 $\delta\beta$ 为:

$$\delta\beta = \frac{-\Delta M}{\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_l}} \ddot{x}$$

其中, $M$ 为塔筒模态质量, $\Delta$ 为比例系数, $v_a$ 为来流风速, $\beta$ 为叶片桨距角, $n_r$ 为叶轮转速, $\ddot{x}$ 为塔顶前后方向振动加速度, $\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_l}$ 为风速 $v_l$ 下的偏微分项数值。

4.根据权利要求3所述的虚拟质量控制方法,其特征在于,所述比例系数 $\Delta$ 应大于0.108。

5.根据权利要求3所述的虚拟质量控制方法,其特征在于,所述塔筒模态质量 $M$ 为: $M = \text{叶轮质量} + \text{机舱质量} + \text{塔筒质量} / 2$ 。

6.根据权利要求1至5任一项所述的虚拟质量控制方法,其特征在于,所述方法还包括在所述风力发电机组的塔顶振动加速度信号前设置一个带通滤波器,通过所述带通滤波器提取塔筒前后方向振动加速度一阶固有频率分量的步骤,所述带通滤波器参数为:

$$G \frac{2\zeta\omega s(1+s\tau)}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

其中: $G$ 为滤波器的增益系数; $\omega$ 为滤波器允许通过的频率,取塔筒前后方向一阶固有频率; $\zeta$ 为阻尼系数; $\tau$ 为时间常数; $s$ 为拉普拉斯变换算子。

## 一种适用于风力发电机组塔筒避振的虚拟质量控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及风力发电机组塔筒避振技术领域,特别是涉及一种适用于风力发电机组塔筒避振的虚拟质量控制方法。

### 背景技术

[0002] 随着风力发电机组容量逐渐增大,并越来越多的应用于低风速区域,塔筒高度也逐渐增加。当塔筒高度大于100米后,综合考虑制造、运输和成本等因素,塔筒固有频率将变小,甚至小于叶轮额定转速下的转频。在风电行业,一般地,将一阶固有频率低于叶轮额定转速下转频的塔筒称为“软塔”。在某个风速和转速下,采用软塔设计的风力发电机组将会发生叶轮转频一倍频(1P)与塔筒前后方向一阶固有频率共振,导致塔筒振动和载荷增大,此时必须改进控制器设计,避免该共振现象发生。

[0003] 目前,常用的技术方案是:在将要发生共振的风速、转速点附近,修改发电机转矩的控制算法,先快速提升发电机转矩、后快速下降,使得叶轮转速先得到抑制、后快速上升,实现快速通过共振点的目的。但该技术方案存在如下不足:当来流为湍流风,且平均风速处于将要发生塔筒共振的风速区间内时,风力发电机组将频繁穿越塔筒共振点运行,导致减振效果不佳。

[0004] 由此可见,上述现有的塔筒避振方法仍存在有不便与缺陷,而亟待加以进一步改进。如何创设一种方法简单、运行稳定的新的适用于风力发电机组塔筒避振的控制方法,成为当前业界极需改进的目标。

### 发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题是提供一种适用于风力发电机组塔筒避振的虚拟质量控制方法,使其简单方便的实现风力发电机组塔筒避振,从而克服现有的塔筒避振方法的不足。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明提供一种适用于风力发电机组塔筒避振的虚拟质量控制方法,其特征在于,通过控制叶片桨距角,改变叶轮推力,实现改变闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率值,使其与叶轮转频一倍频错开,实现风力发电机组塔筒避振。

[0007] 作为本发明的一种改进,所述方法在叶轮转速达到将要发生叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率共振时叶轮转速的0.95~1.05倍之间时启用。

[0008] 进一步改进,所述叶片桨距角的增量 $\delta\beta$ 为:

$$\delta\beta = \frac{-\Delta M}{\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_1}} \ddot{x}$$

[0009] 其中, $M$ 为塔筒模态质量, $\Delta$ 为比例系数, $v_a$ 为来流风速, $\beta$ 为叶片桨距角, $n_r$ 为叶轮转速, $\ddot{x}$ 为塔顶前后方向振动加速度, $\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_1}$ 为风速 $v_1$ 下的偏微分项数值。

[0010] 进一步改进,所述比例系数 $\Delta$ 应大于0.108。

[0011] 进一步改进,所述塔筒模态质量M为: $M = \text{叶轮质量} + \text{机舱质量} + \text{塔筒质量} / 2$ 。

[0012] 进一步改进,所述方法还包括在所述风力发电机组的塔顶振动加速度信号前设置一个带通滤波器,通过所述带通滤波器提取塔筒前后方向振动加速度一阶固有频率分量的

步骤,所述带通滤波器参数为: $G \frac{2\zeta\omega s(1+s\tau)}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$ , 其中: $G$ 为滤波器的增益系数; $\omega$ 为滤波器

允许通过的频率,取塔筒前后方向一阶固有频率; $\zeta$ 为阻尼系数; $\tau$ 为时间常数; $s$ 为拉普拉斯变换算子。

[0013] 采用上述的技术方案,本发明至少具有以下优点:

[0014] 本发明通过改变叶片桨距角,减小叶轮推力,叶轮推力减小的幅值与塔顶振动加速度成正比,由此改变闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率,使得该风力发电机组可以稳定运行于叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率潜在共振的风速区间,避开共振风险,实现风力发电机组的塔筒避振。

[0015] 本发明通过设置带通滤波器,有选择性的提取塔筒前后方向振动加速度一阶固有频率分量,能更进一步的加强减振效果。

[0016] 本发明方法简单、运行稳定,避振效果极佳。

## 附图说明

[0017] 上述仅是本发明技术方案的概述,为了能够更清楚了解本发明的技术手段,以下结合附图与具体实施方式对本发明作进一步的详细说明。

[0018] 图1是本发明虚拟质量控制方法的原理示意图。

[0019] 图2是本发明实施例中基于GH Bladed软件的Campbell图分析示意图。

## 具体实施方式

[0020] 本发明虚拟质量避振控制方法是通过在将要发生叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率共振的风速区间内,临时启用叶片桨距角控制,通过改变叶片桨距角,减小叶轮推力,叶轮推力减小的幅值与塔顶振动加速度成正比,由此改变闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率,避开共振风险,实现避振。

[0021] 本发明虚拟质量避振控制方法的基本原理如下:

[0022] 首先,塔筒前后方向的振动响应可用下式(1)的单自由度动力学方程简化描述:

$$[0023] \quad M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_a \quad \text{式(1)}$$

[0024] 其中: $M$ 为塔筒模态质量, $C$ 为塔筒模态阻尼, $K$ 为塔筒模态刚度, $x$ 为塔顶前后方向位移, $\dot{x}$ 为塔顶前后方向速度, $\ddot{x}$ 为塔顶前后方向加速度, $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 分别为 $x$ 的一阶导数和二阶导数, $F_a$ 为塔顶气动力推力荷载。

[0025] 塔筒前后方向一阶固有频率 $\omega_1$ 用式(2)表示:

$$[0026] \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \text{式(2)}$$

[0027] 其次,气动力推力荷载 $F_a$ 为来流风速、叶片桨距角、叶轮转速的函数,如式(3):

$$[0028] \quad F_a = F(v_a, \beta, n_r) \quad \text{式(3)}$$

[0029] 其中： $v_a$ 为来流风速， $\beta$ 为叶片桨距角， $n_r$ 为叶轮转速。

[0030] 本发明通过改变叶片桨距角 $\beta$ ，可以减小气动力推力 $F_a$ ，并控制推力减小量 $\delta F_a$ 与塔顶前后方向振动加速度 $\ddot{x}$ 成正比，如下式(4)：

$$[0031] \quad \delta F_a = \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \delta \beta = -\Delta M \ddot{x} \quad \text{式(4)}$$

[0032] 其中： $\Delta$ 为比例系数。

[0033] 再次，在闭环系统下，塔筒动力学方程如下式(5)：

$$[0034] \quad M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = F_a - \Delta M \ddot{x} \quad \text{式(5)}$$

[0035] 整理得式(6)：

$$[0036] \quad (1 + \Delta) M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = F_a \quad \text{式(6)}$$

[0037] 此时闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率变化为下式(7)：

$$[0038] \quad \omega_1^H = \sqrt{\frac{K}{(1 + \Delta)M}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta}} \omega_1 \quad \text{式(7)}$$

[0039] 风力发电机组在额定以下功率稳态运行时，来流风速 $v_a$ 与叶轮转速 $n_r$ 存在对应关系。设当叶轮转速为 $n_{r1}$ (单位rpm)时，其叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率共振，即如下式(8)：

$$[0040] \quad \frac{n_{r1}}{60} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \text{式(8)}$$

[0041] 本发明技术方案通过设计合理的比例系数 $\Delta$ ，可实现在某个风速区间叶轮转频一倍频( $n_{r1}/60$ )与闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率 $\omega_1^H$ 错开，达到避开共振的目的，减小塔筒的振动和载荷。

[0042] 那么为了实现避振，需要满足下式(9)：

$$[0043] \quad \sigma = \frac{|\omega_1^H - \omega_1|}{\omega_1} > 0.05 \quad \text{式(9)}$$

[0044] 整理即的式(10)：

$$[0045] \quad 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \Delta}} > 0.05 \quad \text{式(10)}$$

[0046] 解得比例系数 $\Delta$ 需满足： $\Delta > 0.108$

[0047] 当叶轮转速在 $n_{r1}$ 的0.95~1.05倍之间时，在叶片桨距角上施加一个变桨指令，使得叶轮上的气动力推力减小，其减小的幅值与塔顶振动加速度成正比。叶片桨距角的增量 $\delta\beta$ 为下式(11)：

$$[0048] \quad \delta\beta = \frac{-\Delta M}{\partial F(v_a, \beta, n_r)/\partial \beta} \ddot{x} \quad \text{式(11)}$$

[0049] 也可写成式(12)：

$$[0050] \quad \delta\beta = K_p \ddot{x} \quad \text{式(12)}$$

[0051] 其中： $K_p$ 为比例增益系数，则 $K_p$ 如下式(13)：

$$[0052] \quad K_p = \frac{-\Delta M}{\partial F(v_a, \beta, n_r) / \partial \beta} \quad \text{式 (13)}$$

[0053] 为了加强减振效果,本发明可在塔顶振动加速度信号前设置一个带通滤波器,用于提取其中的塔筒前后方向振动加速度一阶固有频率分量,该带通滤波器形式如下式(14):

$$[0054] \quad G \frac{2\zeta\omega s(1+s\tau)}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad \text{式 (14)}$$

[0055] 其中:G为滤波器的增益系数, $\omega$ 为滤波器允许通过的频率,取塔筒前后方向一阶固有频率, $\zeta$ 为阻尼系数,影响滤波器通过频率的带宽, $\tau$ 为时间常数,补偿变桨系统的时间延迟,s为拉普拉斯变换算子。

[0056] 本发明具体设计流程如下:

[0057] 1)首先基于GH Bladed软件,进行Campbell图分析,得到塔筒前后方向一阶固有频率 $f_1$ ( $\omega_1 = 2\pi f_1$ )、叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率相交时对应的叶轮转速 $n_{r1}$ 。

[0058] 2)通过稳态功率曲线计算,得到叶轮转速与风速的对应关系,进而得到叶轮转速 $n_{r1}$ 对应的风速 $v_1$ 。

[0059] 3)通过稳态运行载荷计算,得到叶轮推力对桨距角的偏微分项 $\frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta}$ 与风速的对应关系。通过插值得到风速 $v^1$ 下的偏微分项数值 $\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_1}$ 。

[0060] 4)塔筒模态质量M可取为“叶轮质量+机舱质量+塔筒质量/2”。指定一个合适的比例系数 $\Delta$ (必须满足 $\Delta > 0.108$ ),可得到桨距角增量为:

$$[0061] \quad \delta\beta = \frac{-\Delta M}{\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_1}} \ddot{x}$$

[0062] 比例增益系数为:

$$[0063] \quad K_p = \frac{-\Delta M}{\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_1}}$$

[0064] 此时,闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率变为:

$$[0065] \quad \omega_1^H = \frac{1}{\sqrt{1+\Delta}} \omega_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{1+\Delta}} f_1$$

[0066] 当叶轮转速进入 $n_{r1}$ 的0.95~1.05倍区间时,启用上述算法,得到桨距角增量 $\delta\beta$ ,根据该桨距角增量 $\delta\beta$ 改变叶片桨距角请求值,实现在该风速区间叶轮转频一倍频( $n_{r1}/60$ )与闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率 $\omega_1^H$ 错开,达到避开共振的目的,减小塔筒的振动和载荷。

[0067] 5)同时合理设计塔顶振动加速度信号前的带通滤波器的参数:

$$[0068] \quad G \frac{2\zeta\omega s(1+s\tau)}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

[0069] 本发明控制方法的控制策略如附图1所示,一般情况下,本技术方案在额定风速以下时采用,图1中“原先的桨距角请求值 $\beta_0$ ”等于0,但不排除 $\beta_0 \neq 0$ 的可能。

[0070] 本发明的具体实施例如下:

[0071] 以某4MW机组为例,介绍技术方案设计流程中的具体取值:

[0072] 1)基于GH Bladed软件,进行Campbell图分析,如附图2所示,由Campbell图可知,塔筒前后方向一阶固有频率为 $f_1=0.21\text{Hz}$ ;叶轮转频一倍频(1P)与塔筒前后方向一阶固有频率相交时发生共振,此时叶轮转速为 $n_{r1}=10\text{rpm}$ 。

[0073] 2)通过稳态功率曲线计算,得到叶轮转速与风速的对应关系,叶轮转速 $n_{r1}=10\text{rpm}$ 对应的风速 $v_1=7\text{m/s}$ 。

[0074] 3)通过稳态运行载荷计算,得到叶轮推力对桨距角的偏微分项 $\frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta}$ 与风速

的对应关系。通过插值得到风速 $v_1=7\text{m/s}$ 下的偏微分项数值 $\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_1} = -1.5 \times 10^6 \text{N/rad}$ 。

[0075] 4)塔筒模态质量 $M$ 取“叶轮质量+机舱质量+塔筒质量/2”,为 $M=2 \times 10^5 \text{kg}$ 。指定一个合适的比例系数 $\Delta=0.12$ ,可得到桨距角增量为:

$$[0076] \quad \delta\beta = \frac{-\Delta M}{\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_1}} \ddot{x} = 0.016 \ddot{x}$$

[0077] 比例增益系数为:

$$[0078] \quad K_p = \frac{-\Delta M}{\left. \frac{\partial F(v_a, \beta, n_r)}{\partial \beta} \right|_{v_a=v_1}} = 0.016 \text{rad}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$$

[0079] 此时闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率(圆频率)变为:

$$[0080] \quad \omega_1^H = \frac{2\pi}{\sqrt{1+\Delta}} f_1 = 1.24678 \text{rad/s}$$

[0081] 单位转换为Hz,闭环系统下塔筒前后方向一阶固有频率为:

$$[0082] \quad f_1^H = \frac{\omega_1^H}{2\pi} = 0.1984 \text{Hz}$$

[0083] 与原先的固有频率的差值为:

$$[0084] \quad \sigma = (0.21 - 0.1984) / 0.21 = 5.5\%$$

[0085] 可得出差值大于5%,实现了避开共振。

[0086] 当叶轮转速进入 $n_{r1}=10\text{rpm}$ 的0.95~1.05倍区间时,即叶轮转速为9.5~10.5rpm时,启用本技术方案的算法,叶片开始变桨动作。

[0087] 5)带通滤波器参数如下: $G \frac{2\zeta\omega s(1+s\tau)}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$ , 其中: $G$ 为结合闭环系统频率特性曲线

和时域仿真结果调试,取 $G=0.11$ ;  $\omega$ 为滤波器允许通过的频率,取塔筒前后方向一阶固有频率 $\omega=2\pi f_1=1.31957\text{rad/s}$ ;  $\zeta$ 为阻尼系数,影响滤波器通过频率的带宽,取 $\zeta=0.5$ ;  $\tau$ 为时间常数,补偿变桨系统的时间延迟,取 $\tau=0.1\text{s}$ 。

[0088] 当在某个风速、叶轮转速下,叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率发生共振风险时,本发明通过改变叶片桨距角使得该风力发电机组可以稳定运行于叶轮转频一倍频与塔筒前后方向一阶固有频率潜在共振的风速区间,完全避开共振。

[0089] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例而已,并非对本发明作任何形式上的限制,本领域技术人员利用上述揭示的技术内容做出些许简单修改、等同变化或修饰,均落在本发明的保护范围内。



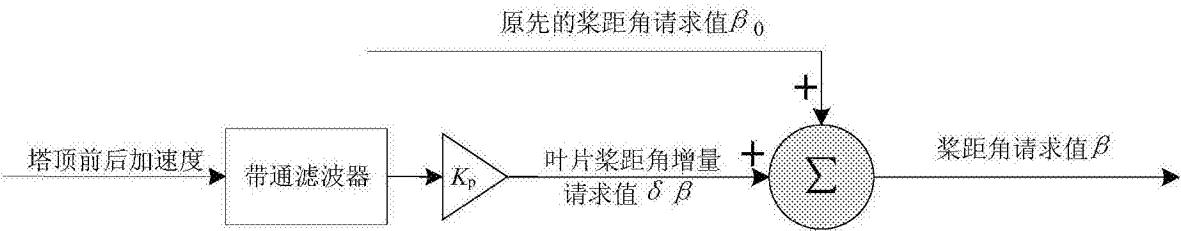


图1

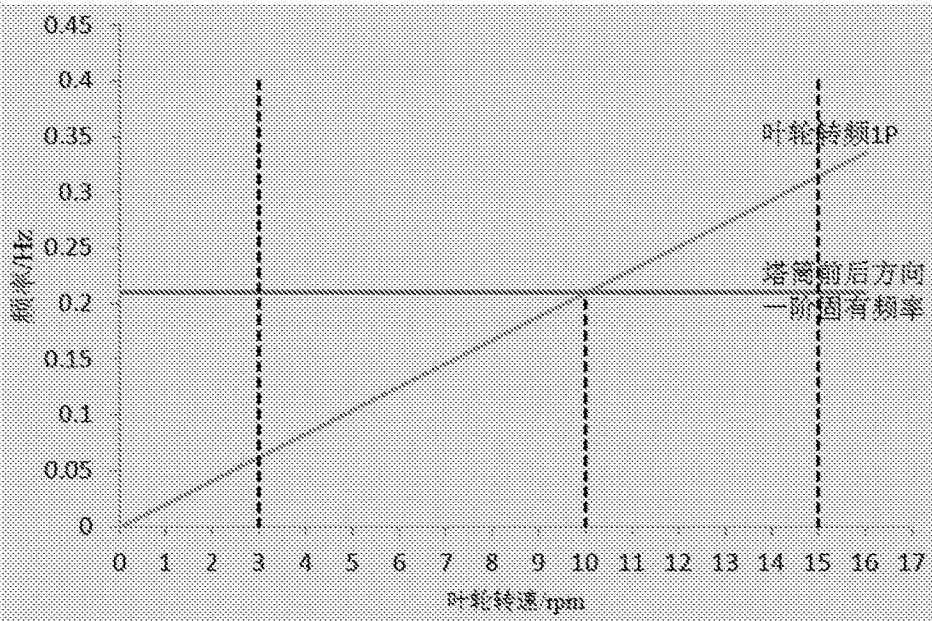


图2