



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109713722 A

(43)申请公布日 2019.05.03

(21)申请号 201910081991.3

(22)申请日 2019.01.28

(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 褚景春 袁凌 许伟 潘磊 张雷

(74)专利代理机构 北京方韬法业专利代理事务所(普通合伙) 11303

代理人 逄俊臣

(51) Int. Cl.

H02J 3/38(2006.01)

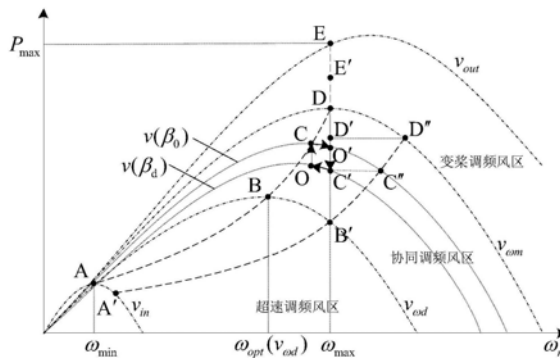
权利要求书2页 说明书7页 附图1页

(54)发明名称

一种风电机组全风速智能调频控制方法及其系统和风电场

(57)摘要

本发明公开了一种风电机组全风速智能调频控制方法及其系统和风电场,属于风电机组领域,对处于最大功率追踪状态下的风电机组通过降载运行提供功率备用,使其具备长期参与系统一次调频的能力;并通过基于超速限值的风速分区控制策略实现风电机组在全风速段内的精细控制,通过优先使用变速调频,当变速调频无法满足降载或增功需求时启动变桨调频。本发明所述方法通过基于超速限值的风速分区控制策略实现风电机组在全风速段内的精细控制,在系统频率正常时提供稳定可靠的功率备用,在系统频率异常时提供快速持续的功率支撑,有助于提升风电机组的电网友好性。



CN 109713722 A

1. 一种风电机组全风速智能调频控制方法,其特征在于,对处于最大功率追踪状态下的风电机组通过降载运行提供功率备用,使其具备长期参与系统一次调频的能力;并通过基于超速限值的风速分区控制策略实现风电机组在全风速段内的精细控制,通过优先使用变速调频,当变速调频无法满足降载或增功需求时启动变桨调频。

2. 根据权利要求1所述的风电机组全风速智能调频控制方法,其特征在于,所述风速分区是将风电机组的全风速段分为变速调频风区 $[v_{in}, v_{wd}]$,协同调频风区 $[v_{wd}, v_{wm}]$ 和变桨调频风区 $[v_{wm}, v_{out}]$,其中, v_{in} 和 v_{out} 分别为风电机组的切入和切出风速; v_{wd} 和 v_{wm} 分别为在风电机组正常运行时仅用变速调频即可实现 $d\%$ 降载的风速上限和进入恒转速区的风速下限;

控制策略为:在变速调频风区 $[v_{in}, v_{wd}]$ 通过主动变速进行降载或增功,在协同调频风区 $[v_{wd}, v_{wm}]$ 通过变桨协同变速进行有序降载或增功,在变桨调频风区 $[v_{wm}, v_{out}]$ 通过主动变桨进行降载或增功。

3. 根据权利要求2所述的风电机组全风速智能调频控制方法,其特征在于, v_{wd} 和 v_{wm} 通过样条插值法绘制最大功率曲线和降载功率曲线及最大超速限值来加以确定。

4. 根据权利要求2或3所述的风电机组全风速智能调频控制方法,其特征在于,正常运行时,风电机组的最大机械功率为:

$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \quad (1)$$

在式(1)中, ρ 为空气密度; R 为叶轮半径; v 为风速; $C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$ 为最优风能利用系数; λ_{opt} 为最优叶尖速比; β_{opt} 为最优桨距角;

所述风能利用系数为:

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2 * \tau - c_3 * \beta - c_4)e^{c_5 * \tau} + c_6 * \lambda \\ \tau = 1/(\lambda + 0.08\beta) - 0.035/(\beta^3 + 1) \\ \lambda = \omega * R / v \end{cases} \quad (2)$$

在式(2)中, c_1 - c_6 为利用系数,取决于具体风机型号; β 为叶片桨距角; τ 为转换系数; λ 为叶尖速比; ω 为叶轮转速;

根据式(1)、(2)绘制 $P-\omega_r$ 曲线;

风电机组的降载通过降低风能利用系数来实现,在风电机组降载 $d\%$ 的情况下,降载风能利用系数记为:

$$C_{pd}(\omega_{ref}, \beta_{ref}) = (1-d\%) C_p(\omega_{opt}, \beta_{opt}) \quad (3)$$

在式(3)右侧已知情况,只需通过确定 ω_{ref} 和 β_{ref} 两者之一来求解另一参数,获得最终的降载转速和变桨指令。

5. 根据权利要求4所述的风电机组全风速智能调频控制方法,其特征在于,当监测到风速位于变速调频风区时,在该风区范围内的不同风速下 $\beta_{opt}=0$ 且 ω_{opt} 已知,则:

当风电机组处于降载备用执行阶段,变桨系统不动作,在降载 $d\%$ 运行时的风能利用系数为 $(1-d\%) C_{pm}(\omega_{opt}, \beta_{opt})$;风电机组从正常运行的最优运行点仅通过变速调频控制沿 $P-\omega_r$ 曲线增大叶轮转速并使其稳定运行在降载运行点,以预留 $d\%$ 的功率备用;此时稳定降载运行时 $\beta_{ref}=\beta_{opt}=0$,则通过公式(2)反算出该风区范围内的不同风速下 ω_{ref} ;

当风电机组处于调频增功执行阶段,变桨系统不动作,风电机组从功率备用的降载运行点仅通过变速调频控制沿 $P-\omega_r$ 曲线降低叶轮转速并使其快速运行至最优运行点,实现

风电机组的协同调频。

6. 根据权利要求4或5所述的风电机组全风速智能调频控制方法,其特征在于,当监测到风速位于协同调频风区时,该风区范围内的不同风速下 $\beta_{opt}=0$ 且 ω_{opt} 已知,则:

当风电机组处于降载备容执行阶段,在降载d%运行时的风能利用系数为 $(1-d\%)C_{pm}(\omega_{opt},\beta_{opt})$;风电机组从正常运行的最优运行点优先通过变速调频控制沿P- ω_r 曲线增大叶轮转速,然后通过变桨调频控制在保持最大转速不变的情况下增大桨距角并使其稳定运行在降载运行点,以预留d%的功率备用;此时稳定降载运行时 $\omega_{ref}=\omega_{max}$,则可以通过公式(2)反算出该风区范围内的不同风速下 β_{ref} ;

当风电机组处于调频增功执行阶段,风电机组从功率备用的降载运行点优先通过变速调频控制沿P- ω_r 曲线增大叶轮转速至最优转速 ω_{opt} ,然后通过变桨控制在保持最优转速不变的情况下减小桨距角并使其稳定运行至最优运行点,实现风电机组的协同调频。

7. 根据权利要求4至6任一所述的风电机组全风速智能调频控制方法,其特征在于,当监测到风速位于变桨调频风区时,该风区范围内的不同风速下 $\beta_{opt}=\beta_0(v_w)$ 且 $\omega_{opt}=\omega_{max}$ 已知,则:

当风电机组处于降载备容执行阶段,在降载d%运行时的风能利用系数为 $(1-d\%)C_{pm}(\omega_{opt},\beta_{opt})$;风电机组从正常运行的最优运行点通过变桨调频控制在保持最大转速不变的情况下增大桨距角并使其稳定运行在降载运行点,以预留d%的功率备用;此时稳定降载运行时 $\omega_{ref}=\omega_{max}$,则可以通过公式(2)反算出该风区范围内的不同风速下 β_{ref} ;

若风电机组根据风电机组处于调频增功执行阶段,风电机组从功率备用的降载运行点通过变桨控制在保持最优转速不变的情况下减小桨距角并使其稳定运行至最优运行点,实现风电机组的有效调频。

8. 根据权利要求1至7任一所述的风电机组全风速智能调频控制方法,其特征在于,所述调频控制方法依据:在风电机组在确定型号的情况下,在某一固定风速下,叶尖速比正比于叶轮转速,其风能利用系数表现为叶轮转速和桨距角的函数。

9. 一种风电机组全风速智能调频控制系统,其特征在于,包括:

一个或多个处理器;

存储装置,用于存储一个或多个程序,

当所述一个或多个程序被所述一个或多个处理器执行,使得所述一个或多个处理器实现权利要求1至8任一项所述的风电机组全风速智能调频控制方法。

10. 一种风电场,包括权利要求9所述的风电机组全风速智能调频控制系统。

一种风电机组全风速智能调频控制方法及其系统和风电场

技术领域

[0001] 本发明涉及风电机组领域,特别是涉及一种风电机组全风速智能调频控制方法及其系统和风电场。

背景技术

[0002] 随着风力发电的大规模开发应用,其在电力系统中的渗透率不断升高,但由于风电机组的独特结构和运行方式,尤其是风机转速与系统频率的解耦控制方式的广泛应用,使得风电机组无法主动响应系统频率的变化;同时,为了追求风能的最大化利用,风电机组通常采用最大功率追踪控制方式,不提供额外的有功备用,从而导致无法在系统频率下降时提供类似传统同步机组的辅助调频服务。因此,大规模风电并网必然导致电力系统的惯量支撑能力和一次调频能力不断下降,给系统在大功率缺额冲击下的频率稳定性与恢复能力带来风险。

[0003] 为了有效应对上述风险,现有研究主要通过风电机组的并网控制器中引入模拟同步机转子运动方程和一次调频等环节,使其具有同步发电机组的惯量、阻尼、调频和调压等并网运行外特性,从而提高风电机组的电网友好性。具体而言,目前研究主要集中于风电机组的惯量控制、超速控制、变桨控制及其组合控制。其中,惯量控制是风电机组运行过程中,通过改变机组转子侧变流器的电流给定,控制转子速度发生临时性变化情况下短时释放/吸收风电机组旋转质体所存储的部分动能,以快速响应系统频率的暂态变化,提供类似于传统机组的转动惯量,但持续时间非常短暂,无法提供持久的调频支持。超速控制是控制转子超速运行,使风机运行于非最大功率捕获状态的次优点,保留一部分的有功功率备用,用于一次频率调节,但仅适用于额定风速以下的运行工况。变桨距控制是通过控制风机的桨距角,改变桨叶的迎风角度与输入的机械能量,使其处于最大功率点之下的某一运行点,从而留出一定的备用容量,风况一定的情况下,桨距角越大,机组留有的有功备用也就越大,但受机械特性限制,响应速度较慢,并且频繁动作会影响机组寿命。

[0004] 为了克服上述控制方法各自的应用缺陷,现有研究已开始关注多种控制方法的组合使用,以期形成优势互补,但主要集中于理论上的协调控制,并未对全风速段内的风电机组调频给出具体明确的说明。

发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题是提供一种风电机组全风速智能调频控制方法及其系统和风电场,该控制方法在降载备用运行和增功调频运行时充分考虑了变速调频和变桨调频的优势互补,通过有效的风速分区实现变速优先于变桨的有功调频控制,有助于提升风电机组的电网支撑能力,从而克服现有技术存在的不足。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明提供的技术方案如下:

[0007] 一方面,本发明提供一种风电机组全风速智能调频控制方法,对处于最大功率追踪状态下的风电机组通过降载运行提供功率备用,使其具备长期参与系统一次调频的能

力;并通过基于超速限值的风速分区控制策略实现风电机组在全风速段内的精细控制,通过优先使用变速调频,当变速调频无法满足降载或增功需求时启动变桨调频。

[0008] 进一步地,所述风速分区是将风电机组的全风速段分为变速调频风区 $[v_{in}, v_{wd}]$,协同调频风区 $[v_{wd}, v_{wm}]$ 和变桨调频风区 $[v_{wm}, v_{out}]$,其中, v_{in} 和 v_{out} 分别为风电机组的切入和切出风速; v_{wd} 和 v_{wm} 分别为在风电机组正常运行时仅用变速调频即可实现d%降载的风速上限和进入恒转速区的风速下限;

[0009] 控制策略为:在变速调频风区 $[v_{in}, v_{wd}]$ 通过主动变速进行降载或增功,在协同调频风区 $[v_{wd}, v_{wm}]$ 通过变桨协同变速进行有序降载或增功,在变桨调频风区 $[v_{wm}, v_{out}]$ 通过主动变桨进行降载或增功。

[0010] 进一步地, v_{wd} 和 v_{wm} 通过样条插值法绘制最大功率曲线和降载功率曲线及最大超速限值来加以确定。

[0011] 进一步地,正常运行时,风电机组的最大机械功率为:

$$[0012] \quad P_m = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \quad (1)$$

[0013] 在式(1)中, ρ 为空气密度; R 为叶轮半径; v 为风速; $C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$ 为最优风能利用系数; λ_{opt} 为最优叶尖速比; β_{opt} 为最优桨距角;

[0014] 所述风能利用系数为:

$$[0015] \quad \begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2 * \tau - c_3 * \beta - c_4)e^{c_5 * \tau} + c_6 * \lambda \\ \tau = 1/(\lambda + 0.08\beta) - 0.035/(\beta^3 + 1) \\ \lambda = \omega * R / v \end{cases} \quad (2)$$

[0016] 在式(2)中, c_1-c_6 为利用系数,取决于具体风机型号; β 为叶片桨距角; τ 为转换系数; λ 为叶尖速比; ω 为叶轮转速;

[0017] 根据式(1)、(2)绘制 $P-\omega_r$ 曲线;

[0018] 当风电机组处于最大功率追踪运行状态下的风电机组无法在系统频率下降时持续提升其有功输出,为了使其具备长期参与系统一次调频的能力,必须预留一定的功率备用,使其降载运行。

[0019] 通过上述公式(1)和(2)可知,风电机组的降载运行只能通过降低风能利用系数来实现。在某一固定风速下,由于叶尖速比正比于叶轮转速,对于确定型号的风电机组,其风能利用系数表现为叶轮转速和桨距角的函数。

[0020] 风电机组的降载通过降低风能利用系数来实现,在风电机组降载d%的情况下,降载风能利用系数记为:

$$[0021] \quad C_{pd}(\omega_{ref}, \beta_{ref}) = (1-d\%) C_p(\omega_{opt}, \beta_{opt}) \quad (3)$$

[0022] 在式(3)右侧已知的情况,只需通过确定 ω_{ref} 和 β_{ref} 两者之一来求解另一参数,获得最终的降载转速和变桨指令。

[0023] 进一步地,当监测到风速位于变速调频风区时,在该风区范围内的不同风速下 $\beta_{opt} = 0$ 且 ω_{opt} 已知,则:

[0024] 当风电机组处于降载备用执行阶段,变桨系统不动作,在降载d%运行时的风能利用系数为 $(1-d\%) C_{pm}(\omega_{opt}, \beta_{opt})$;风电机组从正常运行的最优运行点仅通过变速调频控制沿 $P-\omega_r$ 曲线增大叶轮转速并使其稳定运行在降载运行点,以预留d%的功率备用;此时稳

定降载运行时 $\beta_{\text{ref}}=\beta_{\text{opt}}=0$,则通过公式(2)反算出该风区范围内的不同风速下 ω_{ref} ;

[0025] 当风电机组处于调频增功执行阶段,变桨系统不动作,风电机组从功率备用的降载运行点仅通过变速调频控制沿 $P-\omega_r$ 曲线降低叶轮转速并使其快速运行至最优运行点,实现风电机组的协同调频。

[0026] 进一步地,当监测到风速位于协同调频风区时,该风区范围内的不同风速下 $\beta_{\text{opt}}=0$ 且 ω_{opt} 已知,则:

[0027] 当风电机组处于降载备容执行阶段,在降载 $d\%$ 运行时的风能利用系数为 $(1-d\%)C_{\text{pm}}(\omega_{\text{opt}},\beta_{\text{opt}})$;风电机组从正常运行的最优运行点优先通过变速调频控制沿 $P-\omega_r$ 曲线增大叶轮转速,然后通过变桨调频控制在保持最大转速不变的情况下增大桨距角并使其稳定运行在降载运行点,以预留 $d\%$ 的功率备用;此时稳定降载运行时 $\omega_{\text{ref}}=\omega_{\text{max}}$,则可以通过公式(2)反算出该风区范围内的不同风速下 β_{ref} ;

[0028] 当风电机组处于调频增功执行阶段,风电机组从功率备用的降载运行点优先通过变速调频控制沿 $P-\omega_r$ 曲线增大叶轮转速至最优转速 ω_{opt} ,然后通过变桨控制在保持最优转速不变的情况下减小桨距角并使其稳定运行至最优运行点,实现风电机组的协同调频。

[0029] 进一步地,当监测到风速位于变桨调频风区时,该风区范围内的不同风速下 $\beta_{\text{opt}}=\beta_0(v_w)$ 且 $\omega_{\text{opt}}=\omega_{\text{max}}$ 已知,则:

[0030] 当风电机组处于降载备容执行阶段,在降载 $d\%$ 运行时的风能利用系数为 $(1-d\%)C_{\text{pm}}(\omega_{\text{opt}},\beta_{\text{opt}})$;风电机组从正常运行的最优运行点通过变桨调频控制在保持最大转速不变的情况下增大桨距角并使其稳定运行在降载运行点,以预留 $d\%$ 的功率备用;此时稳定降载运行时 $\omega_{\text{ref}}=\omega_{\text{max}}$,则可以通过公式(2)反算出该风区范围内的不同风速下 β_{ref} ;

[0031] 若风电机组根据风电机组处于调频增功执行阶段,风电机组从功率备用的降载运行点通过变桨控制在保持最优转速不变的情况下减小桨距角并使其稳定运行至最优运行点,实现风电机组的有效调频。

[0032] 通过上述风速分区方法即可在全风速段内实现从正常运行到稳定降载运行的降载备容控制,以及从稳定降载运行到正常运行的调频增功控制。

[0033] 另一方面,提供一种风电机组全风速智能调频控制系统,包括:

[0034] 一个或多个处理器;

[0035] 存储装置,用于存储一个或多个程序,

[0036] 当所述一个或多个程序被所述一个或多个处理器执行,使得所述一个或多个处理器实现权利要求1至8任一项所述的风电机组全风速智能调频控制方法。

[0037] 再一方面,提供一种风电场,包括所述的风电机组全风速智能调频控制系统。

[0038] 采用这样的设计后,本发明至少具有以下优点:

[0039] (1) 本发明所述方法通过基于超速限值的风速分区控制策略实现风电机组在全风速段内的精细控制,在变速调频风区通过主动变速进行降载或增功,在协同调频风区通过变桨协同变速进行有序降载或增功,在变桨调频风区通过主动变桨进行降载或增功,从而在系统频率正常时提供稳定可靠的功率备用,在系统频率异常时提供快速持续的功率支撑,有助于提升风电机组的电网友好性。

[0040] (2) 本发明所述方法充分利用变速调频的响应快速性同时规避其控制盲区,充分利用变桨调频的持续可靠性同时减少其机械磨损,在全风速段范围内实现变速和变桨调频

的统一协调控制,有助于提升风电机组的综合调频效率。

附图说明

[0041] 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。

[0042] 图1是本发明的全风速段分区 $P-\omega_r$ 曲线及调频控制示意图。

具体实施方式

[0043] 下面将参照附图更详细地描述本发明的示例性实施例。虽然附图中显示了本发明的示例性实施例,然而应当理解,可以以各种形式实现本发明而不应被这里阐述的实施例所限制。相反,提供这些实施例是为了能够更透彻地理解本发明,并且能够将本发明的范围完整的传达给本领域技术人员。

[0044] 本技术领域技术人员可以理解,除非特意声明,这里使用的单数形式“一”、“一个”、“所述”和“该”也可包括复数形式。应该进一步理解的是,本发明的说明书中使用的措辞“包括”是指存在所述特征、整数、步骤、操作、元件和/或组件,但是并不排除存在或添加一个或多个其他特征、整数、步骤、操作、元件、组件和/或它们的组。

[0045] 本技术领域技术人员可以理解,除非另外定义,这里使用的所有术语(包括技术术语和科学术语),具有与本发明所属领域中的普通技术人员的一般理解相同的意义。还应该理解的是,诸如通用字典中定义的那些术语,应该被理解为具有与现有技术的上下文中的意义一致的意义,并且除非被特定定义,否则不会用理想化或过于正式的含义来解释。

[0046] 本发明提供一种风电机组全风速智能调频控制方法的实施例,如图1所示,对处于最大功率追踪状态下的风电机组通过降载运行提供功率备用,使其具备长期参与系统一次调频的能力;并通过基于超速限值的风速分区控制策略实现风电机组在全风速段内的精细控制,通过优先使用变速调频,当变速调频无法满足降载或增功需求时启动变桨调频。

[0047] 为了获得更快的调频响应速度,同时尽量减少变桨系统的动作频率,本发明优先使用变速调频,当变速调频无法满足降载或增功需求时启动变桨调频。为此,不同于传统基于最大功率跟踪区、恒转速区和恒功率区的风速分区方式,所述方法将风电机组的全风速段分为变速调频风区 $[v_{in}, v_{wd}]$,协同调频风区 $[v_{wd}, v_{wm}]$ 和变桨调频风区 $[v_{wm}, v_{out}]$,其中 v_{in} 和 v_{out} 分别为风电机组的切入和切出风速,一般由风电机组供应商提供; v_{wd} 和 v_{wm} 分别为在风电机组正常运行时仅用变速调频即可实现 $d\%$ 降载的风速上限和进入恒转速区的风速下限,一般通过样条插值法绘制最大功率曲线和降载功率曲线及最大超速限值来加以确定。

[0048] 结合图1以某风电机组的智能调频控制方法的实施例进行说明:

[0049] 正常运行时,风电机组的最大机械功率为

$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \quad (1)$$

[0051] 其中, ρ 为空气密度; R 为叶轮半径; v 为风速; $C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$ 为最优风能利用系数; λ_{opt} 为最优叶尖速比; β_{opt} 为最优桨距角。

[0052] 进一步,风能利用系数为

$$[0053] \quad \begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2 * \tau - c_3 * \beta - c_4)e^{c_5 * \tau} + c_6 * \lambda \\ \tau = 1 / (\lambda + 0.08\beta) - 0.035 / (\beta^3 + 1) \\ \lambda = \omega * R / v \end{cases} \quad (2)$$

[0054] 其中, c_1 - c_6 为利用系数,取决于具体风机型号; β 为叶片桨距角; τ 为转换系数; λ 为叶尖速比; ω 为叶轮转速。

[0055] 进一步,在风电机组降载 $d\%$ 的情况下,记降载风能利用系数为

$$[0056] \quad C_{pd}(\omega_{ref}, \beta_{ref}) = (1-d\%) C_p(\omega_{opt}, \beta_{opt}) \quad (3)$$

[0057] 在上式右侧已知的情况,只需通过确定 ω_{ref} 和 β_{ref} 两者之一来求解另一参数,即可获得最终的降载转速和变桨指令。

[0058] 进一步,为了实现全风况下的有效降载运行,所述方法提出基于超速限值的风速分区方法,如图1所示:

[0059] 为了获得更快的调频响应速度,同时尽量减少变桨系统的动作频率,所述方法优先使用变速调频,当变速调频无法满足降载或增功需求时启动变桨调频。为此,不同于传统基于最大功率跟踪区、恒转速区和恒功率区的风速分区方式,所述方法将风电机组的全风速段分为变速调频风区 $[v_{in}, v_{wd}]$,协同调频风区 $[v_{wd}, v_{wm}]$ 和变桨调频风区 $[v_{wm}, v_{out}]$,其中 v_{in} 和 v_{out} 分别为风电机组的切入和切出风速,一般由风电机组供应商提供; v_{wd} 和 v_{wm} 分别为在风电机组正常运行时仅用变速调频即可实现 $d\%$ 降载的风速上限和进入恒转速区的风速下限,一般通过样条插值法绘制最大功率曲线和降载功率曲线及最大超速限值来加以确定,分别为最优运行点B和最优运行点D所属 $P-\omega_r$ 曲线的对应风速。

[0060] 进一步,ABCDE为正常运行曲线,A'B'C'D'E'为对应 $d\%$ 备容的降载运行曲线,则ABB'A'区域属于变速调频风区,BDB'区域属于协同调频风区和DE区域属于变桨调频风区。

[0061] 1) 变速调频风区 $[v_{in}, v_{wd}]$

[0062] 该风区范围内正常运行和降载运行时各风速下的桨距角均保持 $\beta=0$ 不变,通过绘制 $[v_{in}, v_{wd}]$ 范围内的正常运行曲线AB获取各风速下的最优转速 ω_{opt} 和最优功率 P_{opt} ,则可在各风速的 $P-\omega_r$ 曲线上分别找到 $d\%$ 备容的降载运行点,然后绘制出该风区的变速降载运行曲线A'B',从而通过公式(2)反算出该风区范围内各风速下的降载运行转速 ω_{ref} ,为降载备容运行提供转速和变桨指令。

[0063] 在降载备容执行阶段,变桨系统不动作,保持桨距角为 $\beta=0$,风电机组从正常运行的最优运行点B仅通过变速调频控制沿BB'曲线增大叶轮转速并使其稳定运行在降载运行点B',即实现风电机组的降载运行以预留 $d\%$ 的功率备用;

[0064] 在调频增功执行阶段,变桨系统不动作,保持桨距角为 $\beta=0$,风电机组从降载运行点B'仅通过变速调频控制沿B'B曲线降低叶轮转速并使其快速运行至最优运行点B,即实现风电机组的快速调频。

[0065] 2) 协同调频风区 $[v_{wd}, v_{wm}]$

[0066] 该风区范围内正常运行时各风速下的桨距角为 $\beta=0$ 不变,通过绘制 $[v_{wd}, v_{wm}]$ 范围内的正常运行曲线BD获取各风速下的最优转速 ω_{opt} 和最优功率 P_{opt} ,则可在各风速的 $P-\omega_r$ 曲线上分别找到 $d\%$ 备容的降载运行点,然后绘制出该风区的变速降载运行曲线B'D'',但受到 $\omega_r \leq \omega_{max}$ 风电机组最大转速的限制,则降载运行点的转速 $\omega_{ref} = \omega_{max}$,通过公式(2)反

算出该风区范围内各风速下的降载运行桨距角 β_{ref} ,为降载备容运行提供转速和变桨指令。

[0067] 在降载备容执行阶段,风电机组从正常运行的最优运行点C优先通过变速调频控制沿C0'曲线增大叶轮转速,然后通过变桨调频控制在保持最大转速不变的情况下使桨距角从 $\beta=\beta_0$ 增大至 $\beta=\beta_d$,则风电机组 $P-\omega_r$ 曲线从 $v(\beta_0)$ 曲线变为 $v(\beta_d)$ 曲线,并稳定运行于该曲线的降载运行点C',即实现风电机组的降载运行以预留d%的功率备用;

[0068] 在调频增功执行阶段,风电机组从降载运行点C'优先通过变速调频控制沿C'0曲线降低叶轮转速至最优转速 ω_{opt} ,然后通过变桨控制在保持最优转速不变的情况下使桨距角从 $\beta=\beta_d$ 减小至 $\beta=\beta_0$,则风电机组 $P-\omega_r$ 曲线从 $v(\beta_d)$ 曲线变为 $v(\beta_0)$ 曲线,并稳定运行于该曲线的最优运行点C,即实现风电机组的协同调频。

[0069] 3) 变桨调频风区 $[v_{wm}, v_{out}]$

[0070] 该风区范围内正常运行和降载运行时各风速下的叶轮转速均为 $\omega = \omega_{max}$,通过绘制 $[v_{wm}, v_{out}]$ 范围内的正常运行时各风速下的桨距角 $\beta_{opt} = \beta_0(v)$ 和运行功率 P_{opt} ,由此可绘制d%降载运行时各风速下的运行功率,同时结合公式(1)和(2)反算出该风区范围内各风速下的降载运行桨距角 β_{ref} ,为降载备容运行提供转速和变桨指令。

[0071] 在降载备容执行阶段,风电机组从正常运行的最优运行点D通过变桨调频控制在保持最大转速不变的情况下沿DD'方向增大桨叶角并使风电机组稳定运行在降载运行点D',即实现风电机组的降载运行以预留d%的功率备用;

[0072] 在调频增功执行阶段,风电机组从降载运行点D'通过变桨控制在保持最优转速不变的情况下沿D'D方向减小桨距角并使其稳定运行至最优运行点D,即实现风电机组的有效调频。

[0073] 通过上述风速分区方法即可在全风速段内实现从正常运行到稳定降载运行的降载备容控制,以及从稳定降载运行到正常运行的调频增功控制。

[0074] 本发明提供了一种风电机组全风速段调频控制方法,提出将风电机组的全风速段分为变速调频风区 $[v_{in}, v_{wd}]$,协同调频风区 $[v_{wd}, v_{wm}]$ 和变桨调频风区 $[v_{wm}, v_{out}]$,其中 v_{in} 和 v_{out} 分别为风电机组的切入和切出风速; v_{wd} 和 v_{wm} 分别为在风电机组正常运行时仅用变速调频即可实现d%降载的风速上限和进入恒转速区的风速下限。在风电机组的变速调频风区仅使用变速调频控制,在协同调频风区优先使用变速调频控制并以变桨调频控制为补充,在变桨调频风区仅使用变桨调频控制,从而在全风速段内实现从正常运行到降载运行的降载备容控制,以及从降载运行到正常运行的调频增功控制。本发明在系统频率正常时提供稳定可靠的功率备用,在系统频率异常时提供快速持续的功率支撑,有助于提升风电机组的电网友好性;充分利用变速调频的响应快速性同时规避其控制盲区,充分利用变桨调频的持续可靠性同时减少其机械磨损,在全风速段范围内实现变速和变桨调频的统一协调控制,有助于提升风电机组的综合调频效率。

[0075] 本发明公开的风电机组全风速段调频控制方法,采用风速分区调频的控制方法,充分利用变速调频的响应快速性同时规避其控制盲区,充分利用变桨调频的持续可靠性同时减少其机械磨损,在全风速段范围内实现变速和变桨调频的统一协调控制,有效结合变速调频的快速性与变桨调频的稳定性,可以有效实现风电机组的全风速段主动调频,提升风电机组的电网友好性。有助于提升风电机组的综合调频效率。

[0076] 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。

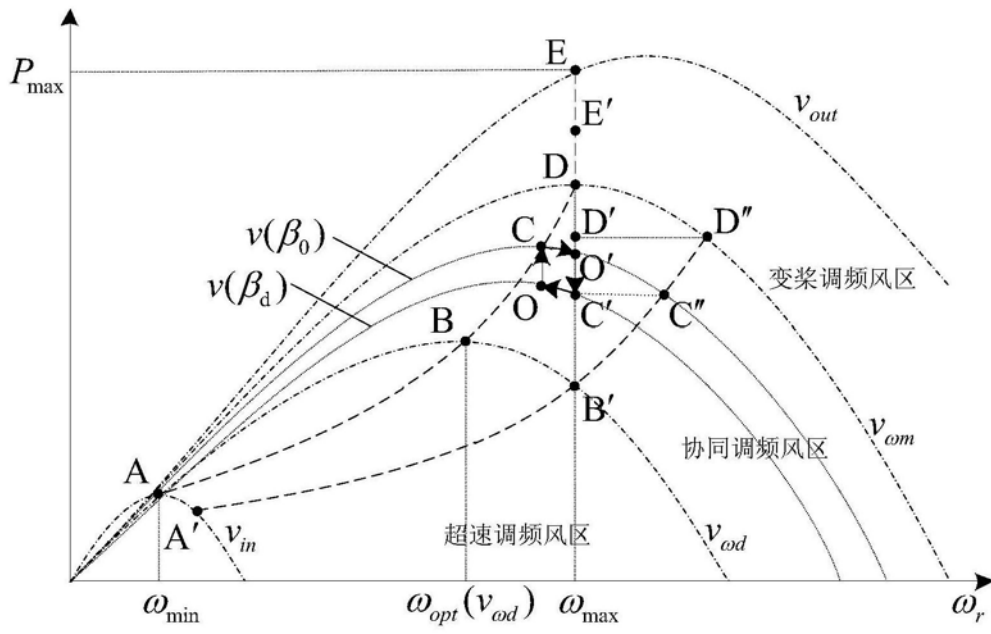


图1