

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.009

面向湍流风况的构网型永磁风电机组物理转子转速恢复策略

邹小明, 汪成根, 胡英杰

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 构网型永磁风电机组(简称构网风机)在频率支撑结束后,须及时恢复物理转子转速以使风轮重新运行在最大功率点。但面对随机波动的实际湍流风速,传统基于单一函数形式的转速恢复策略会导致构网风机转速恢复失败。为此,文中首先基于稳定性分析揭示湍流风速下构网风机转速恢复失败的物理机理,再结合实际湍流风速的渐强风和渐弱风交替的变化特性,提出一种基于物理转子转速状态判断的构网风机自适应转速恢复策略。该方法利用实测转速作为渐强风和渐弱风的判定依据,在渐强风时保持参考功率指令,利用渐强的气动功率加速风机物理转子;而渐弱风下则暂时中断转速恢复过程,并将参考功率指令设定为次最优功率曲线以维持风机稳定。最后, PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真结果表明,文中改进策略经过若干次恢复/中断过程的自适应切换,能够实现湍流风速下构网风机转速的可靠恢复。

关键词: 风电机组;虚拟同步机控制;频率支撑;转速恢复;湍流风速;二次跌落

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)05-0100-09

0 引言

在“碳达峰、碳中和”战略目标推动下,以风电为代表的新能源机组装机容量持续增长,正逐步取代常规同步机组的主导地位^[1-2]。传统跟网风电机组(简称风机)通过锁相环与外部电网保持同步,对外表现为电流源,其稳定运行和频率支持功能很大程度上取决于电网强度^[3-6];而电压源型构网风机能够主动构建交流电压频率和幅值,可在弱电网场景下稳定运行,并提供无延时的频率支撑^[7-8],因此成为当前研究焦点。

目前,较常见的风机构网控制策略为虚拟同步机控制^[9-10],也是文中的研究对象。该控制策略模拟同步机组的运行原理,将转子运动方程内嵌到风机变流器的控制环节中,使其具备与同步机组类似的功角特性^[11-12]。因此,当系统发生负荷扰动时,具备功角特性的构网风机能够按照其与扰动点间的同步功率系数及时分担扰动功率^[13],而突增的电磁功率使虚拟转子开始减速,即惯性响应。随着虚拟转子转速改变,下垂环节根据转速偏差调节参考功率指令,从而实现一次调频^[14]。

为兼顾风能的高效捕获,现有虚拟同步机控制通常将参考功率指令设定为最优功率曲线^[15]。此时,构网风机运行于最大功率点处,不具备有功备用容量,即上述惯性响应和一次调频的能量来源于

风机物理转子(主要由风轮和永磁发电机转子构成)动能。为避免物理转子动能过度释放而导致风机失稳,还需要构网风机在退出频率支撑后,通过降低输出电磁功率恢复转速^[16],以重新运行到最大功率点。

为实现构网风机的物理转子转速恢复,文献^[16]将转速恢复阶段的参考功率指令设定为比气动功率更低的恒定值,直至风机重新运行到最优功率曲线上;文献^[17]通过构造参考功率指令与物理转子转速间的线性关系,实现转速恢复阶段风机电磁功率平滑变化,避免了因电磁功率突变造成的电网频率二次跌落;文献^[18-19]分别以线性或二次函数的形式动态调整下垂系数,实现了物理转子转速的渐进式恢复,能够有效避免恒定风速下的电网频率二次跌落。

然而,上述方法在整个转速恢复过程中始终采用单一函数形式的参考功率指令,即恒定或与转速相关的函数。文中研究发现,面对渐弱风与渐强风交替出现的实际湍流风速,仅依靠上述单一函数形式的参考功率指令难以实现物理转子转速恢复以及电网频率二次跌落抑制。尤其面对渐弱风,时变衰减的气动功率容易导致针对恒定风速场景设计的转速恢复策略失效,造成物理转子转速恢复失败。这使得风机无法恢复至最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)状态,风能捕获效率持续下降;若转速持续降低,将触发保护性停机,造成风机输出电磁功率跌落,进而引发比初始频率事件更严重的二次跌落^[16-19],严重威胁电

收稿日期: 2025-04-24; 修回日期: 2025-08-04

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“含多构网型变流器的中远海风电场经柔直并网主动频率支撑关键技术”(5108-202218280A-2-241-XG)

网安全稳定运行。

针对上述问题, 文中在分析湍流风况对物理转子转速恢复影响机理的基础上, 提出一种考虑渐强风和渐弱风交替影响的构网风机转速恢复策略。该策略根据当前风况(渐强风或渐弱风)自适应切换构网风机的参考功率指令, 实现渐强风下的物理转子加速和渐弱风下的风机稳定。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件验证了所提控制策略的有效性。

1 构网永磁风机的数学模型

构网永磁风机的结构如图 1 所示, 其主要由风力机、永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)和交-直-交变流器构成, 其中 v 为风速; ω_{wt} 为风机转子转速; P_{ref} 为虚拟同步机控制的参考功率指令; ω_g 为系统频率; 忽略变流器损耗, P_e 为构网风机的输出电磁功率。考虑到文中主要关注频率支撑结束后的构网风机电动态, 重点介绍风轮气动模型、传动链模型、虚拟同步机控制和转速恢复策略, 构网风机的其余部分模型可参考文献[20-23]。

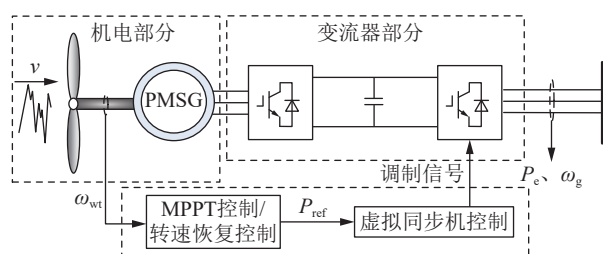


图 1 应用虚拟同步机控制的永磁风电机结构

Fig.1 Structure of a permanent magnet wind turbine system with virtual synchronous generator (VSG) control

1.1 风机的数学模型

(1) 风轮气动功率方程。依据贝茨理论, 风轮捕获的气动功率 P_m 如式(1)所示^[24]。 P_m 为构网风机的能量来源, 其与风速 v 呈立方关系, 因此仅当风速 v 大于切入风速时, 构网风机才能并网发电。

$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为风轮半径; λ 为叶尖速比, $\lambda = \omega_{wt}R/v$; β 为桨距角, 通常在额定转速下保持 0° 桨距角, 以实现风能高效捕获; C_p 为风能利用系数, 其描述了风轮的风能捕获转化效率, 在 0° 桨距角下, 存在一个最佳叶尖速比 λ_{opt} 使 C_p 取得最大值 C_p^{max} [25]。

(2) 物理转子运动方程。为简化分析, 可忽略风机传动链的弹性和阻尼, 将其简化为式(2)所示的单质量块模型^[26]。

$$J_{wt}\omega_{wt}\frac{d\omega_{wt}}{dt} = P_m - P_e \quad (2)$$

式中: J_{wt} 为构网风机旋转部件的总转动惯量。

1.2 虚拟同步机控制

为实现与同步机组类似的自同步和频率支撑特性, 虚拟同步机控制将同步机组的转子运动方程嵌入风机网侧变流器的控制环节中, 其具体控制结构和数学模型如图 2 和式(3)所示。其中, k_{opt} 为最优功率曲线系数; J_{vsg} 为虚拟转子惯量; ω_{g0} 为系统额定频率; ω_{vsg} 为虚拟转子转速; D 为虚拟阻尼系数; θ_{ref} 为对 ω_{vsg} 积分后得到的虚拟相角。

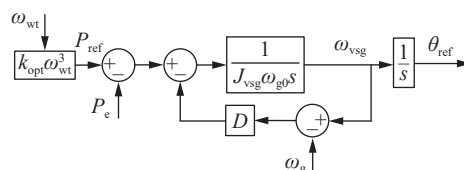


图 2 虚拟同步机控制框图

Fig.2 Block diagram of VSG control

$$P_{ref} - P_e = J_{vsg}\omega_{g0}\frac{d\omega_{vsg}}{dt} + D(\omega_{vsg} - \omega_g) \quad (3)$$

为提高发电效率, 通常将 P_{ref} 设定为式(4)所示的最优功率曲线 P_{MPPT} , 以实现构网风机的 MPPT。

$$P_{ref} = P_{MPPT} = k_{opt}\omega_{wt}^3 \quad (4)$$

$$k_{opt} = \frac{0.5\rho\pi R^5 C_p^{max}}{\lambda_{opt}^3} \quad (5)$$

当检测到电网频率事件发生, P_{ref} 由式(4)切换为式(6), 实现构网风机的一次调频功能。

$$P_{ref} = k_{opt}\omega_{wt}^3 + K(\omega_{g0} - \omega_{vsg}) \quad (6)$$

式中: K 为下垂系数。

1.3 转速恢复策略

当电网发生频率事件时, 构网风机在虚拟同步机的控制下释放转子动能、增发输出电磁功率, 以支撑电力系统有功平衡、缓解电网频率跌落。在频率支撑结束后, 构网风机需要降低输出电磁功率以加速风机转子, 进而恢复运行至 MPPT 模式。如图 3 和式(7)、式(8)所示, 现有研究一般将 P_{ref} 设定为较气动功率曲线更低的恒定值^[16]或与转速相关的函数^[17], 以实现物理转子的转速恢复, 文中简称恒定指令转速恢复策略和斜线指令转速恢复策略。

$$P_{ref} = \alpha P_1 \quad (7)$$

式中: α 为小于 1 的常数; P_1 为频率支撑结束时的气动功率。

$$P_{ref} = k_1\omega_{wt} + k_2 \quad (8)$$

$$\begin{cases} k_1 = \frac{P_1 - P_2}{\omega_{wt,1} - \omega_{wt,2}} \\ k_2 = \frac{\omega_{wt,1}P_2 - \omega_{wt,2}P_1}{\omega_{wt,1} - \omega_{wt,2}} \end{cases} \quad (9)$$

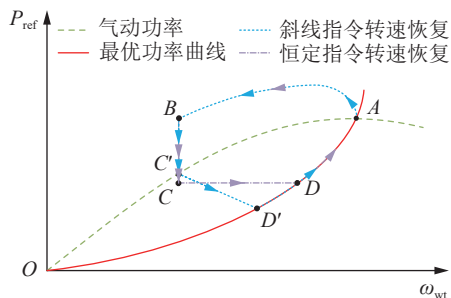


图3 物理转子转速恢复阶段的工作点迁移

Fig.3 Workpoint migration during the physical rotor speed recovery phase

式中: k_1 、 k_2 为斜线指令的系数; $\omega_{wt,1}$ 为频率支撑结束时的风机转子转速; $\omega_{wt,2}$ 、 P_2 分别为斜线指令曲线与最优功率曲线交点(即图3中的D'点)对应的风机转子转速和功率。

采用上述策略后,物理转子的转速恢复过程具体如图3所示。初始时刻,构网风机运行在最大功率点A处,当系统频率跌落时,构网风机参考功率指令 P_{ref} 切换至式(6),附加项 $K(\omega_{g0} - \omega_{vsg})$ 逐渐增大使得构网风机释放转子动能支撑电网;随着转速逐渐降低,式(6)中的首项 $k_{opt}\omega_{wt}^3$ 按 ω_{wt}^3 的规律变化快速下降。因此,图3中的AB段表现为先上升后下降。假设风机转子减速至B点时启动转速恢复,对于恒定指令转速恢复策略而言,构网风机参考功率指令 P_{ref} 切换为式(7),运行点由B点转移至C点,此时输入气动功率 P_m 大于输出电磁功率 P_e ,转子转速沿水平线CD加速;类似地,对于斜线指令转速恢复策略,其参考指令 P_{ref} 在B点切换为式(8),风机转速沿斜线C'D'加速。当风机转子加速至与最优功率曲线的交点D或D'时, P_{ref} 将切换回最优功率曲线,由于此时 P_m 仍大于 P_e ,构网风机将进一步加速,直至运行到最大功率点A处。

2 湍流风况对物理转子转速恢复的影响分析

上述物理转子转速恢复策略的控制参数整定大多以假设恒定风速为前提^[16-19]。然而,实际的湍流风速具有强随机性和波动性,基于恒定风速设计的转速恢复策略可能不适用于湍流风况。为此,文中针对湍流风况对构网风机物理转子转速恢复的影响展开研究,首先刻画与转速恢复过程同时间尺度的湍流风速波动;在此基础上,进一步揭示渐弱风引起转速恢复失败的物理机理,为第3章的改进转速恢复策略设计奠定基础。

2.1 湍流风速特征

湍流风速的波动具有不同的时间尺度^[27],一般使用长时间尺度的平均风速分量 $\bar{v}$ 和短时间尺度的

湍流风速分量 v_i 构造,即:

$$v = \bar{v} + v_i \quad (10)$$

其中,平均风速分量 $\bar{v}$ 反映了风速的平均强度,在数分钟至数十分钟的时间尺度内保持不变;湍流风速分量 v_i 刻画了风速的随机波动特性,可视作多种频率分量的叠加^[28]。图4给出一段基于专业的风电机组仿真软件 Bladed 生成的湍流风速序列。

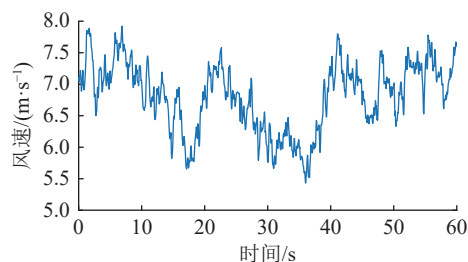


图4 Bladed 生成的湍流风速序列

Fig.4 Turbulent wind speed sequence generated by Bladed

2.2 渐弱风下的转速恢复失败

根据式(1)、式(4)、式(7)和式(8)可以得到不同风速下的气动功率-转速曲线和转速恢复阶段构网风机输出电磁功率曲线,如图5所示。

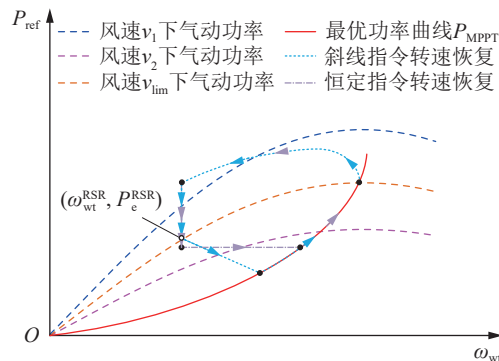


图5 构网风机转速恢复阶段转子稳定性分析

Fig.5 Rotor stability analysis of grid-forming wind turbines during rotor speed recovery

记 $(\omega_{wt}^{RSR}, P_e^{RSR})$ 为转速恢复阶段构网风机的工作点,上标 RSR 表示转子转速恢复 (rotor speed recover, RSR)。为使转子加速恢复,需要气动功率大于其输出电磁功率,即满足 $P_m(v, \omega_{wt}^{RSR}) > P_e^{RSR}$ 。在风速 v_1 下,构网风机的 $P_m(v_1, \omega_{wt}^{RSR})$ 始终大于 P_e^{RSR} ,工作点 $(\omega_{wt}^{RSR}, P_e^{RSR})$ 沿式(7)或式(8)确定的恢复曲线向右加速至最优功率曲线上;若风速降低到 v_2 ,此时不论采取哪种转速恢复策略,都有 $P_m(v_2, \omega_{wt}^{RSR}) < P_e^{RSR}$,风机转子将持续减速,直到触发风机转速下限保护,引发停机动作,这会加剧电网有功缺额,给电网频率造成二次影响。

上述分析表明,风速变化对于构网风机转速恢复的成功与否至关重要。对于恒定指令和斜线指

令两类转速恢复策略, 可通过求解式(11)确定各自的临界稳定风速 v_{lim} 。只有当 v 始终大于 v_{lim} 时, 才能确保构网风机的转速恢复; 当 v 小于 v_{lim} 时, 构网风机则进入失稳区间, 若 v 不能及时升高, 转子将出现持续而深度的减速, 进而可能导致风机停机。因此, 现有构网风机转速恢复策略在湍流风况下的有效性完全取决于风速这一不可控因素。

$$0.5\rho\pi R^2 v_{\text{lim}}^3 C_p \left(\frac{\omega_{\text{wt}}^{\text{RSR}} R}{v_{\text{lim}}}, 0 \right) = P_e^{\text{RSR}} \quad (11)$$

3 面向湍流风况的物理转子转速恢复策略

为实现湍流风况下物理转子转速的可靠恢复, 文中提出一种考虑湍流风况影响的改进转速恢复策略。

3.1 湍流风况下的转速恢复思路

区别于现有基于单一参考功率指令设定的转速恢复策略, 文中针对渐强风和渐弱风交替出现的特点及其对风机机电动态的不同影响, 提出了考虑湍流风况影响的改进转速恢复策略, 其主要设计思路包括如下两方面。

(1) 根据实时风况采用不同的参考功率指令设定策略。具体地, 渐强阵风时, 由于高风速使得风机不易失稳, 参考功率指令设定应利用高风速提供的渐强气动功率加速风轮; 渐弱阵风时, 由于气动功率不足, 参考功率指令设定应以保持风机稳定为主, 直到渐强风来临时恢复转速。

(2) 基于实测转速的湍流风况判断与参考功率指令切换。根据风况变化将转速恢复划分为渐强风时的风轮加速状态和渐弱风时的恢复中断状态, 利用实测转速替代风速以判断转速恢复状态并选择相应的参考功率指令。

3.2 转速恢复策略的实现

基于上述改进思路, 文中提出图6所示构网风机改进转速恢复策略。其中, $\omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$ 为恢复状态判断的基准转速; k_{sub} 为次最优功率系数; k_{sub}^* 为转速恢复策略切换时刻的次最优功率系数; P_{ref}^* 为转速恢复策略切换时刻的参考功率指令; t_{sup} 为频率支撑开始时刻; ΔT 为频率支撑持续时间, 参考现有工程实践^[29], 文中取 15 s。

3.2.1 基于物理转子转速的恢复状态判断

根据实测风速判断湍流风况是最为直接的方法, 但考虑实际工程中难以准确测量实时风速, 文中采用与风速变化强相关的风机转子转速信号作为判断恢复状态的依据。

同时, 为避免对风轮加速度的估计, 并简化判

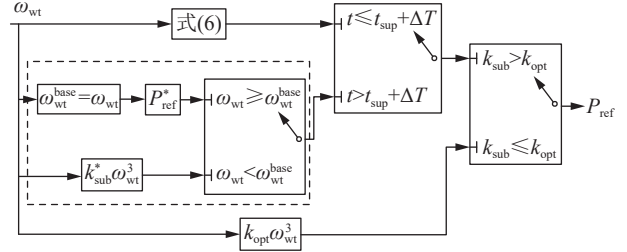


图6 文中所提改进惯性响应控制策略实现框图

Fig.6 Block diagram of the proposed improved inertia response control strategy

断条件, 文中将恢复过程中风轮曾达到的最大转速作为恢复状态判断的基准转速 $\omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$ 。为此, 在整个恢复阶段的每个控制周期需要更新 $\omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$, 即如果当前转速 $\omega_{\text{wt}} > \omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$, 则更新 $\omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$ 为当前转速 ω_{wt} ; 否则, 保持 $\omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$ 不变。可见, 在风机转子加速恢复过程中, $\omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$ 在不断更新中逐渐增大; 若物理转子转速恢复中断, $\omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$ 则保持不变。

根据上述基准转速 $\omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$ 可知, 恢复状态的判断条件如下:

- (1) 若 $\omega_{\text{wt}} > \omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$, 则判定进入加速恢复状态;
- (2) 若 $\omega_{\text{wt}} \leq \omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$, 则判定进入恢复中断状态。

3.2.2 自适应变化风况的转速恢复策略

根据基准转速 $\omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$, 构网风机将自适应地切换转速恢复的参考功率指令 P_{ref} , 以适应不同湍流风况, 具体如式(12)、式(13)所示。当 $\omega_{\text{wt}} > \omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$, P_{ref} 保持切换时刻的参考功率指令 P_{ref}^* 不变, 次最优功率系数 k_{sub} 则按 $P_{\text{ref}}^*/\omega_{\text{wt}}^3$ 更新; 当 $\omega_{\text{wt}} \leq \omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$, k_{sub} 保持切换时刻的次最优功率系数 k_{sub}^* 不变, P_{ref} 则切换为 $k_{\text{sub}}^* \omega_{\text{wt}}^3$ 。

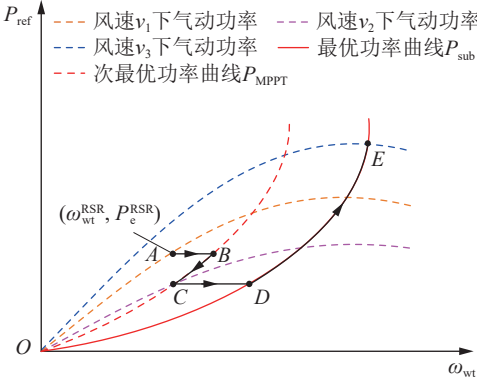
$$P_{\text{ref}} = k_{\text{sub}} \omega_{\text{wt}}^3 \quad (12)$$

$$k_{\text{sub}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{ref}}^*}{\omega_{\text{wt}}^3} & \omega_{\text{wt}} > \omega_{\text{wt}}^{\text{base}} \\ k_{\text{sub}}^* & \omega_{\text{wt}} \leq \omega_{\text{wt}}^{\text{base}} \end{cases} \quad (13)$$

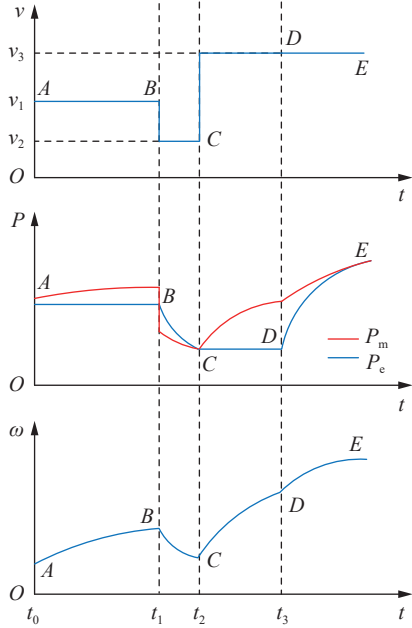
为便于理解, 结合图7(a)、(b)说明所提转速恢复策略的控制原理。

(1) 假设构网风机在 t_0 时刻启动转速恢复, 此时风速为 v_1 。如图7(b)所示, 由于气动功率 P_m 大于输出电磁功率 P_e , 构网风机转子将进入加速恢复状态, 满足 $\omega_{\text{wt}} > \omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$, 构网风机的参考功率指令 P_{ref} 保持不变, 而次最优功率系数 k_{sub} 按照式(13)不断更新, 工作点 $(\omega_{\text{wt}}^{\text{RSR}}, P_e^{\text{RSR}})$ 向右水平移动 (AB段)。

(2) 在 t_1 时刻风速由 v_1 突降为 v_2 , 物理转子中断转速恢复, 即 $\omega_{\text{wt}} \leq \omega_{\text{wt}}^{\text{base}}$, 此时次最优功率系数 k_{sub} 锁定为 k_{sub}^* 不变, 参考功率指令 P_{ref} 则切换为图7(a)所示的次最优功率曲线 P_{sub} , 风机转子将沿该次最优



(a) 改进转速恢复策略的工作点迁移



(b) 改进转速恢复策略时域过程示意

图 7 改进转速恢复策略的控制原理示意

Fig.7 Control schematic diagram of the improved rotor speed recovery strategy

功率曲线减速(BC段), 稳定在 C 点, 而不会发生 2.2 节所述的转速恢复失败现象。

(3) 在 t_2 时刻风速增强至 v_3 后, 构网风机重新进入加速恢复阶段, 工作点 $(\omega_{wt}^{RSR}, P_e^{RSR})$ 沿 CD 段加速运行。

(4) t_3 时刻工作点 $(\omega_{wt}^{RSR}, P_e^{RSR})$ 加速至 D 点, 此时参考功率指令 P_{ref} 切换回最优功率曲线 P_{MPPT} , 构网风机进一步沿 DE 段加速运行至最大功率点 E, 重新恢复至 MPPT 状态。

需要强调的是, 为维持转子转速稳定, 在渐弱风下构网风机的转速恢复过程将被中断, 如图 7(a) 的 BC 段所示, 直到下次风速升高时才重新启动, 如图 7(a) 的 CD 段所示, 因此整体的恢复时间会被延长。但相对于转速恢复失败造成的二次频率跌落, 适当延长构网风机转速恢复时间在工程上是可接受的。

3.2.3 转速恢复开始/结束的判断标识

由于的湍流风况下风速不断变化, 随机波动的构网风机转速信号和功率信号不再适合作为转速恢复阶段的标识。因此, 文中将支撑时间作为构网风机转速恢复开始的判断依据。当满足式(14)时, 即可认为构网风机结束频率支撑, 进入转速恢复阶段。

$$t > t_{sup} + \Delta T \tag{14}$$

经过若干次式(12)、式(13)所示的加速恢复和恢复中断过程后, 如图 7 所示, 次最优系数 k_{sub} 将逐渐趋向于最优功率系数 k_{opt} 。因此, 当满足式(15)时, 次最优功率曲线与最优功率曲线重合, 可判定转速恢复阶段结束。

$$k_{sub} \leq k_{opt} \tag{15}$$

4 仿真实验

4.1 仿真算例

在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中构建图 8 所示仿真模型。模型主要由 1 台 45 MW 的同步机组和 1 台 5 MW 的构网风机组成, 其中同步机组具备一次调频功能, 初始系统负荷为 6.7 MW。仿真中通过投入 2 MW 的额外负荷来模拟电网频率扰动事件。对比方法的控制参数设计参照文献 [16-17], 其余仿真模型参数见表 1。

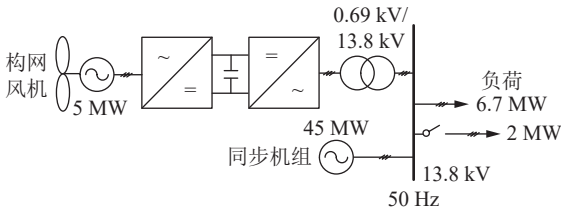


图 8 含风电接入的单母线电力系统

Fig.8 Single-bus power system with wind turbine integration

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

机组类型	参数	数值
同步机组	额定容量/MW	45
	额定频率/Hz	50
	额定电压/kV	13.8
	惯性时间常数/s	4
	调差系数	0.05
构网风机	额定容量/MW	5
	额定转速/(rad·s ⁻¹)	1.267 1
	额定电压/kV	0.69
	J_{wt}/s	6.5
	J_{vsg}/s	1
	K	20
	k_{opt}	2.315 3

4.2 正弦风速的仿真结果

为说明文中所提方法对于渐强风和渐弱风交替变化的风况的适应性, 首先构造式(16)所示的正弦风速进行仿真验证。基于 4.1 节所述的仿真算例, 在 85 s 时系统发生负荷扰动, 15 s 后构网风机进入转速恢复阶段, 仿真结果如图 9 所示。

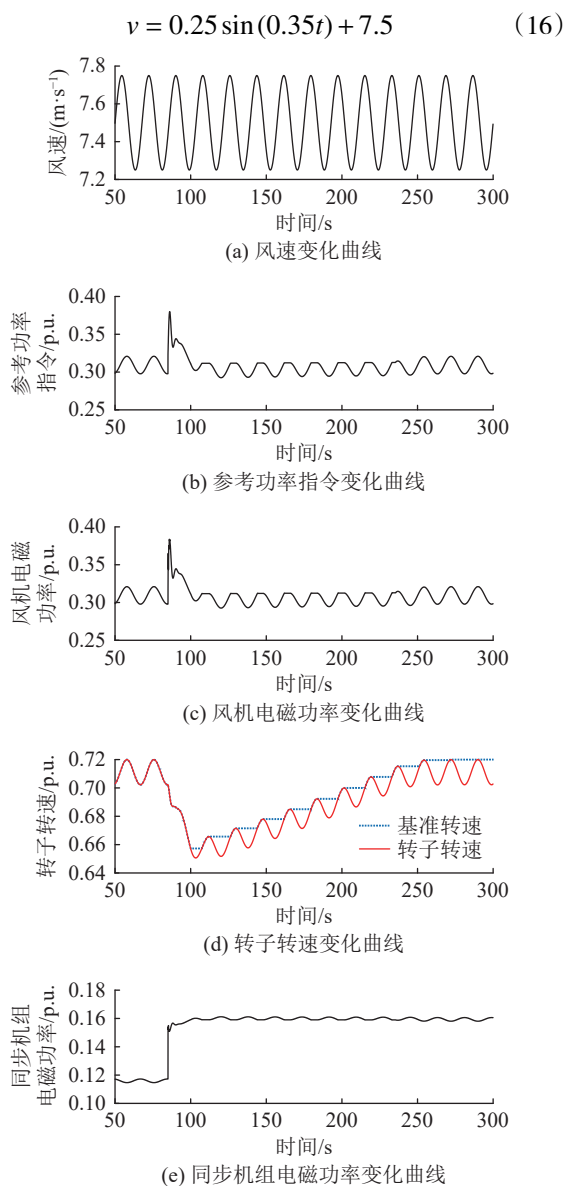


图 9 正弦风速的仿真结果

Fig.9 Simulation results of sinusoidal wind speed

由图 9(c)、(d)可知, 文中所提改进转速恢复策略在渐强风下保持构网风机输出电磁功率恒定, 且可以利用渐强的气动功率加速转子恢复; 而当遇到渐弱风, 风机气动功率减弱, 此时将参考功率指令切换为次最优功率曲线以保证转子稳定。尽管渐弱风时风机转子转速由于次最优功率曲线的设定会发生小幅下降, 但仍可有效保证机组稳定运行。此外, 经过若干次加速和中断过程, 风机转速总体上仍保持加速趋势, 最终能平滑恢复至 MPPT 状态。

4.3 湍流风速的仿真结果

进一步地, 在湍流风况下进行仿真, 以验证文中改进转速恢复策略较传统方法^[16-17]在湍流风场景下的优越性。湍流风速实验采用 Bladed 软件生成的一段 600 s 湍流风速序列, 平均风速 $\bar{v}$ 为 7.5 m/s, 湍流强度 I 为 C 级, 积分尺度 L 为 350。仿真结果如图 10 所示, 在 85 s 时系统发生负荷扰动, 构网风机在虚拟同步机控制下增发电磁功率以支撑系统频率, 15 s 后支撑结束进入转速恢复阶段。

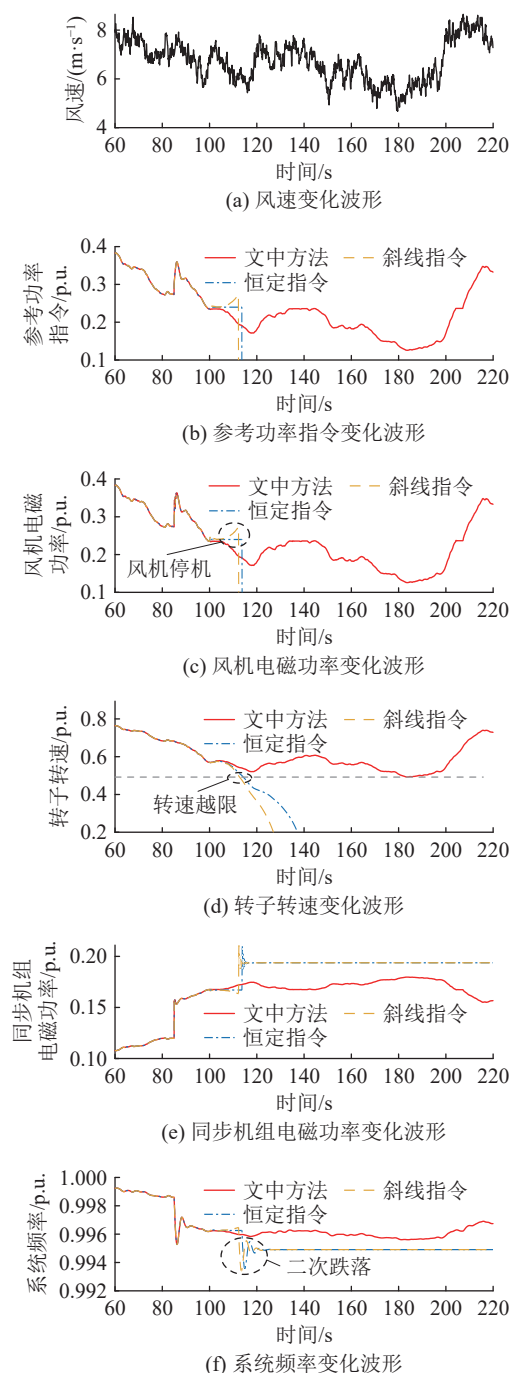


图 10 湍流风速的仿真结果

Fig.10 Simulation results of turbulent wind speed

比较不同策略下的构网风机转速轨迹,可以看出,单一形式的恒定指令转速恢复策略和斜线指令转速恢复策略难以适应时变的湍流风况,渐弱风使得风机气动功率不断衰减,甚至低于转速恢复的参考功率指令,最终导致风机转子不断减速直至停机,引发更加严重的频率二次跌落,这与第2章的分析相符合;而文中所提改进转速恢复策略引入次最优功率曲线的转速恢复中断环节,有效保障了渐弱风下的机组稳定,同时也能在渐强风时段加速转子,最终实现构网风机转速的可靠恢复。

需要说明的是,构网风机转速恢复本质上是通过降低输出电磁功率实现风机物理转子加速的过程。虽然将功率参考指令 P_{ref} 设定为恒小于气动功率 P_m (例如 $P_{ref} = 0.9P_m$)也可以实现湍流风况下构网风机的转速恢复,但文中不采用该方式的原因主要有两点:(1)实际工程中,由于风速测量误差、盘面风和叶片弹性形变等多方面因素,往往难以准确测量风机的气动功率 P_m ;(2)如图11所示,由于气动功率 P_m 与 v^3 成正比,在频繁波动的湍流风况下,构网风机输出的电磁功率剧烈波动,增加风机的疲劳载荷。同时,当风速渐弱时,风机出力随风速大幅、快速降低,常规同步发电机组调速器难以及时响应该变化,从而可能引发系统频率再次跌落。

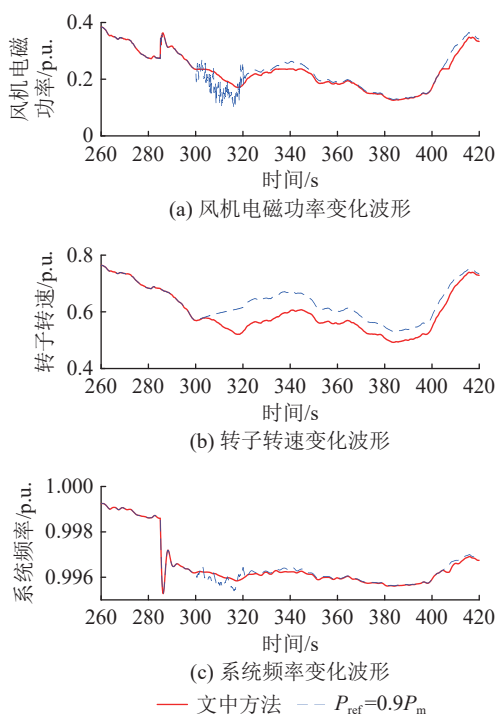


图11 文中方法与基于 P_m 的转速恢复策略比较

Fig.11 Comparison between the proposed method and the P_m -based rotor speed recovery strategy

5 结论

文中针对实际湍流风速的波动特性,提出面向

湍流风况的构网型永磁风机转子转速恢复策略,得出主要结论如下:

(1) 实际湍流风速呈现渐强风与渐弱风交替的变化特性,研究发现在渐弱风条件下,传统基于单一函数形式的转速恢复策略会使构网型风机转速恢复失败。

(2) 结合实际湍流风速的变化特性,提出改进转速恢复策略,其主要改进在于,转速恢复阶段能够根据渐强风和渐弱风自适应切换参考功率指令,从而在保证风电机组稳定的前提下,兼顾风机转速恢复和系统频率稳定。

(3) 基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件搭建仿真模型,验证文中提出的改进转速恢复策略的优越性。仿真结果表明,该策略能够实现湍流风况下风机物理转子转速的可靠恢复,有效避免转速恢复失败导致的系统频率二次跌落。

后续研究可进一步优化渐强风时的转速恢复参考功率指令,以实现更加迅速的构网风机转速恢复。

参考文献:

- [1] 朱介北,罗贺予,俞露杰,等.新型电力系统惯量-频率“云-网-端”感知与控制技术展望[J].高电压技术,2024,50(7):3090-3104.
ZHU Jiebei, LUO Heyu, YU Lujie, et al. Modern power system inertia-frequency sensing and control technology outlook across "cloud-grid-terminal"[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3090-3104.
- [2] 马骏超,陆承宇,王晨旭,等.新型电力系统惯量特性及其实时感知技术[J].浙江电力,2024,43(2):1-12.
MA Junchao, LU Chengyu, WANG Chenxu, et al. Inertia characteristics and the real-time sensing technology of new-type power systems[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 1-12.
- [3] 詹长江,吴恒,王雄飞,等.构网型变流器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(6):2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [4] 伍双喜,过亮,刘洋,等.构网型风电机组的惯量阻尼特性分析[J].浙江电力,2024,43(7):56-63.
WU Shuangxi, GUO Liang, LIU Yang, et al. Analysis of inertia damping characteristics of GFM wind turbines[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 56-63.
- [5] 李建林,丁子洋,游洪灏,等.构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J].高压电器,2023,59(7):1-11.
LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.

- [6] 刘延龙, 陈晓光, 姚爽爽, 等. 基于构网型 SVG 控制优化的双馈风场高频谐振抑制分析[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 125-136.
- LIU Yanlong, CHEN Xiaoguang, YAO Shuangshuang, et al. Analysis of high-frequency resonance suppression in doubly-fed wind farms based on grid-forming SVG control optimization[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 125-136.
- [7] 王东泽, 孙海顺, 黄碧月, 等. 基于虚拟同步控制的电压源型直驱风电机组并网稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3282-3294.
- WANG Dongze, SUN Haishun, HUANG Biyue, et al. Analysis of grid-connected stability of voltage-source-type PMSG-based wind turbine based on virtual synchronous control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3282-3294.
- [8] 王耀函, 张扬帆, 蔡光, 等. 计及电流限幅的构网型双馈风机暂态模型建模及适用性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 92-102.
- WANG Yaohan, ZHANG Yangfan, CAI Guang, et al. Transient modeling and applicability analysis of a grid-forming doubly-fed induction generator taking into account current limitation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 92-102.
- [9] XU Y Y, NIAN H, HU B, et al. Impedance modeling and stability analysis of VSG controlled type-IV wind turbine system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3438-3448.
- [10] 张澳, 王鑫达, 张学广. 弱电网下 VSG-DFIG 暂态功角稳定性分析及优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 73-81.
- ZHANG Ao, WANG Xinda, ZHANG Xueguang. Transient power angle stability analysis and optimization strategy of a VSG-DFIG in a weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 73-81.
- [11] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1334.
- QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1334.
- [12] 张子星, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于 RBF 的 VSG 虚拟惯量和动态阻尼补偿自适应控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 155-164.
- ZHANG Zixing, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. VSG virtual inertia and dynamic damping compensation adaptive control based on RBF[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 155-164.
- [13] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
- SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [14] 许洁翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3595.
- XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [15] 陆秋瑜, 赵仕兴, 杨银国, 等. 考虑风轮机动态特性的虚拟同步永磁直驱风机阻尼转矩系数分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3838-3847.
- LU Qiuyu, ZHAO Shixing, YANG Yinguo, et al. Damping torque coefficient analysis of virtual synchronous direct-driven permanent magnetic synchronous generator considering wind turbine dynamics[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3838-3847.
- [16] XI J B, GENG H, ZOU X. Decoupling scheme for virtual synchronous generator controlled wind farms participating in inertial response[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 347-355.
- [17] 袁泉添, 杜正春, 李宇骏, 等. 基于直流电压同步的构网型直驱风机两阶段主动阻尼支撑控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4995-5007.
- YUAN Xiaotian, DU Zhengchun, LI Yujun, et al. Two-stage control of DC voltage-synchronized directly-driven wind turbine for active damping support[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4995-5007.
- [18] 胡同宇, 杨德健, 钱敏慧, 等. 基于惯量同步的构网型永磁直驱风电机组频率支撑及转速恢复策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 72-79.
- HUTONG Yu, YANG Dejian, QIAN Minhui, et al. Frequency support and speed recovery strategy of grid-forming PMSGs based on inertia synchronization[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 72-79.
- [19] 闻章, 姚良忠, 程帆, 等. 考虑转子稳定性约束的直驱风机虚拟同步发电机构网频率支撑控制[J]. 电网技术, 2025, 49(5): 1869-1877.
- WEN Zhang, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. VSG-based grid-forming frequency support control of type-IV wind turbine considering the rotor stability constraint[J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 1869-1877.
- [20] ZHONG Q C, MA Z Y, MING W L, et al. Grid-friendly wind power systems based on the synchronverter technology[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 719-726.
- [21] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348.
- ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348.
- [22] 刘尊祝, 程志江, 王维庆, 等. 构网型直驱风机的主动频率支撑控制策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 23-33.
- LIU Zunzhu, CHENG Zhijiang, WANG Weiqing, et al. Active frequency support control strategy for grid-forming direct-drive wind turbines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 23-33.
- [23] 林宇轩, 李威, 朱玲, 等. 电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略综述[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 55-68.

- LIN Yuxuan, LI Wei, ZHU Ling, et al. Review of transient control strategies for grid-forming converters under grid voltage sag conditions[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(2): 55-68.
- [24] NISHIKATA S, TATSUTA F. Study on output power of wind farm composed of current-source series-connected wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2025, 16(3): 1827-1836.
- [25] CHEN J, MENG W C, GONG Y J, et al. Dynamic event-triggered networked adaptive tracking control of wind turbine systems[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, 22: 14371-14382.
- [26] 李群, 殷明慧, 刘昆龙, 等. 面向构网永磁风电机组惯量支撑的物理转子绑定方法[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(11): 91-101.
- LI Qun, YIN Minghui, LIU Kunlong, et al. Physical rotor binding method for inertia support of grid-forming permanent magnet wind turbines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(11): 91-101.
- [27] 周连俊, 殷明慧, 杨炯明, 等. 考虑变化湍流风速条件的风电机组改进自适应转矩控制[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(1): 184-191.
- ZHOU Lianjun, YIN Minghui, YANG Jiongming, et al. Improved adaptive torque control for wind turbine considering varying turbulence conditions[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(1): 184-191.
- [28] ZHOU L J, ZHANG Z Y, YIN M H, et al. Indirect effects of turbulence frequency on maximum power point tracking of wind turbine[C]//10th International Conference on Advances in Power System Control, Operation & Management (APSCOM 2015). Hong Kong, China. Institution of Engineering and Technology, 2015: 79 (6.)-79 (6.).
- [29] BRISEBOIS J, AUBUT N. Wind farm inertia emulation to fulfill Hydro-Québec's specific need[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA. IEEE, 2011: 1-7.

作者简介:



邹小明

邹小明(1992),男,博士,高级工程师,从事新能源建模分析、并网控制工作(E-mail: zouxming@126.com);

汪成根(1981),男,博士,研究员级高级工程师,从事新能源并网运行与控制工作;

胡英杰(1994),男,博士,从事新能源发电及并网控制技术工作。

Physical rotor speed recovery strategy for grid-forming permanent magnet synchronous generator-based wind turbines under turbulent wind conditions

ZOU Xiaoming, WANG Chenggen, HU Yingjie

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: After the frequency support of grid-forming permanent magnet synchronous generator-based wind turbines (GFWTs) is completed, it is necessary to promptly restore the physical rotor speed to enable the GFWTs to re-operate at the maximum power point. However, in the face of actual turbulent wind speeds with random fluctuations, traditional speed recovery strategies based on a single function form may lead to the failure to recover speed in GFWTs. To address this issue, the physical mechanism behind the failure of GFWT speed recovery under turbulent wind speeds is first revealed through stability analysis. Then, combined with the alternating characteristics of gradually strengthening/weakening winds in actual turbulent wind speeds, an adaptive speed recovery strategy for GFWTs based on the state judgment of physical rotor speed is proposed. This method utilizes the measured rotor speed to distinguish between strengthening and weakening wind conditions. During strengthening winds, the reference power command is maintained, allowing the increasing aerodynamic power to accelerate the turbine's physical rotor. During weakening winds, the speed recovery process is temporarily interrupted, and the reference power command is set to a suboptimal power curve to maintain turbine stability. Finally, PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation results demonstrate that the proposed improved strategy, through multiple adaptive switches between recovery and interruption processes, can achieve reliable rotor speed recovery for grid-forming wind turbines under turbulent wind conditions.

Keywords: wind turbine; virtual synchronous control; frequency support; rotor speed recovery; turbulent wind speed; secondary frequency droop

(编辑 陆海霞)