

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

闻章^{1,2}, 姚良忠^{1,2}, 程帆^{1,2}, 毛蓓琳^{1,2}, 王强强^{1,2}, 陈汝斯³

(1. 交直流智能配电网湖北省工程中心(武汉大学), 湖北省 武汉市 430072;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北省 武汉市 430072;

3. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北省 武汉市 430077)

VSG-based Grid-forming Frequency Support Control of Type-IV Wind Turbine Considering the Rotor Stability Constraint

WEN Zhang^{1,2}, YAO Liangzhong^{1,2}, CHENG Fan^{1,2}, MAO Beilin^{1,2}, WANG Qiangqiang^{1,2}, CHEN Rusi³

(1. Hubei Engineering and Technology Research Center for AC/DC Intelligent Distribution Network (Wuhan University),
Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

3. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The increasing penetration of renewable energy in the power system leads to the continuous decline of system inertia, weakening the system frequency stability. As a representative of renewable energy, grid-forming controlled wind power is an effective method to improve the frequency stability level of the power system. However, the current control methods for virtual synchronous generator (VSG) based wind turbines do not sufficiently consider the dynamic characteristics of the machine side on the wind turbine involved in the frequency support process, which creates a risk of rotor instability due to rotor speed stalling. Because of the above problems, this paper first analyzes the frequency response characteristics of grid-forming controlled type-IV wind turbines. Then, the coupling relationship between the power angle and rotor speed is analyzed, and the characteristics of rotor instability and the influence of control parameters are clarified. Based on the above analysis, a VSG-based grid-forming frequency support control for type-IV wind turbines considering the rotor stability constraint is proposed, which improves the system frequency stability under various scales of disturbances and effectively avoids the secondary frequency drop during rotor speed recovery of wind turbines. Finally, a case study is simulated in the PSCAD/EMTDC to

verify the effectiveness of the proposed strategy.

KEY WORDS: type-IV wind turbine; rotor stability; virtual synchronous generator; frequency support; rotor speed recovery

摘要: 电力系统中新能源电源占比的不断上升导致系统惯量持续下降, 弱化了系统的频率稳定性水平。以风电为代表的新能源电源的构网控制是提升系统频率稳定水平的一种有效方法。但当前在风机构网频率支撑控制中对风机源侧动态特性的影响考虑得不充分, 特别是基于虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制的风机在频率支撑过程中存在由于转子失速导致的转子失稳问题。针对上述问题, 首先分析了构网控制下直驱风机频率响应特性, 并通过功角与转子转速耦合关系分析明晰了风电转子失稳特性和控制参数的影响。在此基础上, 提出了一种考虑转子稳定性约束的直驱风机 VSG 构网频率支撑控制策略, 不但提升了系统不同扰动下的系统频率稳定性, 同时可有效避免风机转速恢复过程中可能出现的频率二次跌落问题。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 算例仿真分析, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 直驱风机; 转子稳定; 虚拟同步机; 频率支撑; 转速恢复

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0116

0 引言

随着“双碳”目标的实施, 新型电力系统建设发展迅速, 风电渗透率持续提升^[1]。但目前广泛应用的变速恒频风电机组难以主动响应电网频率变化^[2-3], 大规模风电接入或替代常规同步机组后, 将

基金项目: 国家电网有限公司科技项目: “高比例新能源电力系统有功频率控制基础理论研究”(5100-202199273A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China: “Research on the Basic Theory of Active Power Frequency Control for Power System Integrated With High Penetration Renewable Energy”(5100-202199273A-0-0-00)。

导致电力系统的等效旋转惯量下降^[4],恶化了系统的频率响应特性及稳定性。因此,许多国家与地区通过修订风电并网导则提升对风电主动参与电力系统惯量响应及频率支撑的能力^[5-6]。

为提升电网频率的安全及稳定性水平,现有研究提出了多种风电参与频率支撑的控制策略^[7],从并网特性角度来看,可分为基于锁相环(phase-locked loop, PLL)的跟网(grid following, GFL)控制架构和构网(grid forming, GFM)控制架构2类。其中,跟网控制型风机主要包括下垂控制^[8]、虚拟惯量控制^[9]、短时功率超发控制^[10]等方法,通过在风机有功控制部分附加频率控制环节,利用风机转子动能的变化来响应系统频率扰动,实现惯量响应与频率支撑。但跟网控制型风机本质是被动地跟踪电网频率,而不是主动地建立频率^[11]。随着新能源渗透率的不断升高,该模式难以适应弱同步支撑电网运行需求^[12]。因此,有关研究提出了构网控制架构^[13-15],该控制参考同步发电机运行原理,通过主动建立频率使得机组对外呈现电压源特性,从而满足弱同步支撑电网以及无同步电源支撑电网的运行需求^[16]。

在构网型风机参与频率响应方面,其同步控制策略主要有:下垂控制^[17]、直流惯性同步控制^[18]、虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制^[19]等。文献[20]基于下垂型构网控制风电,实现了孤岛微电网的一次调频与黑启动。文献[21]提出了适用于永磁同步电机(permanent magnetic synchronous generator, PMSG)的直驱风机构网型控制策略,其网侧变换器(grid side converter, GSC)采用直流电容电压模拟惯性实现自主同步,但该控制需要配合机侧频率响应控制,否则频率支撑时提供的能量仅来源于直流电容,不足以支撑长时间的惯量响应与频率支撑^[22]。因此,文献[23]在此基础上,通过风机机侧变换器增加惯性传递控制器实现了构网型 PMSG 全风速段的惯量响应,但该控制结构下直流电压易受电网电压波动、风功率波动等因素影响^[24]。文献[25]将超速控制与 VSG 控制相结合,通过合理选取次优功率跟踪曲线,避免了风机惯量响应过程中最大功率跟踪运行(maximum power point tracking, MPPT)曲线对前馈控制环节的抵消作用,充分释放了风机的转子动能。但上述研究均未充分考虑风机参与调频过程的源侧动态特性^[26],特别是对构网风电参与系统频率支撑可能存在的转子失速导致的失稳风险缺乏研究。

此外,由于风机转子转速的限制,频率跌落时

无法持续增发有功功率。而机组退出调频后在转速恢复期间,转子加速吸收有功功率可能引发系统发生频率二次跌落^[27]。文献[28]提出将风机虚拟惯量控制中比例、积分控制系数与风机转速相耦合的自适应转速恢复策略,避免了转速恢复过程中有功功率的突然跃变。文献[29]通过改变有功参考功率与目标恢复功率的渐近速率,减少了转速恢复控制对机组机械载荷的冲击。但上述转速恢复策略均基于跟网控制架构的风电,对运行机制不同的构网控制架构下转速恢复策略鲜有研究。因此,需要结合构网控制型风机参与频率支撑过程转子失稳风险及影响因素,提出构网型风机的优化控制策略,改善风机参与频率支撑过程的转子稳定性和转速恢复特性。

针对上述问题,本文提出了一种考虑转子稳定性约束的直驱风机 VSG 构网频率支撑控制。通过分析频率支撑过程中功角与风机转子转速的耦合关系,明晰了风机转子失速导致的失稳特性及控制参数的影响。考虑风机频率支撑动态过程中临界稳定点和系统频率恢复特性,提出了基于变机械下垂系数的风机转子稳定性提升策略和参数配置方法,以及构网型控制下渐进式转速恢复策略。最后,通过 PSCAD/EMTDC 算例验证所提控制策略的有效性。

1 VSG 构网控制型直驱风机频率支撑机理及转子运行稳定分析

1.1 变速风电机组有功输出特性

风力机为风能捕获单元,将空气所携带的动能一部分转化为机械能,其机械功率可表示为

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \\ \lambda = \omega_r R / v_w \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_m 为风力机的机械输出功率; ρ 为空气密度; A 为风轮叶片的旋转面积; v_w 为风速; C_p 为风能利用系数,其大小与叶尖速比 λ 和桨距角 β 有关; ω_r 为风力机转速; R 为风轮半径。

在某一固定风速下,当 β 一定时,存在最佳叶尖速比 λ_{opt} ,其对应的 C_p 为最大风能利用系数 C_{p-opt} ,此时风机运行在 MPPT 模式,在整个转速区间的功率输出如式(2)所示。

$$P_{opt} = \begin{cases} 0 & \omega_r \in [0, \omega_0) \cup [\omega_{max}, +\infty) \\ k_{opt} \omega_r^3 & \omega_r \in [\omega_0, \omega_1] \\ k_{max} (\omega_r - \omega_n) + P_n & \omega_r \in (\omega_1, \omega_n] \\ P_n & \omega_r \in (\omega_n, \omega_{max}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{opt} 为 MPPT 模式下风机运行功率; ω_0 、 ω_1 、 ω_n 、 ω_{max} 分别为切入转速、恒转速区切入转速、额定转速、最大转速, 以本文所采用的 5MW 直驱风机为例, 其 ω_0 、 ω_1 、 ω_n 、 ω_{max} 取值分别为 0.7、0.99、1.0、1.2pu; k_{opt} 为 MPPT 最优功率系数, 则有:

$$k_{\text{opt}} = \rho \pi R^5 \frac{C_{\text{p-opt}}}{2\lambda_{\text{opt}}^3} \quad (3)$$

k_{max} 为恒转速区功率系数, 即

$$k_{\text{max}} = \frac{(P_{\text{max}} - k_{\text{opt}} \omega_1^3)}{(\omega_{\text{max}} - \omega_1)} \quad (4)$$

因此, 系统发生频率扰动时, 变速风电机组运行在常规跟网模式下无法做出响应, 需要引入附加控制环节或改变控制结构来完成转子动能的释放或吸收, 从而实现惯量响应与频率支撑。

1.2 VSG 构网控制型直驱风机频率支撑机理

本文采用的 VSG 构网控制型直驱风机控制结构如图 1 所示, 其中: PMSG 的机侧变流器控制直流侧电压 U_{dc} , U_{dcref} 为直流侧电压参考值, Q_{ac} 为风机输出的无功功率, Q_{ref} 为无功功率参考值。GSC 控制风机有功输出, 且基于 VSG 构网型控制实现与电网同步。

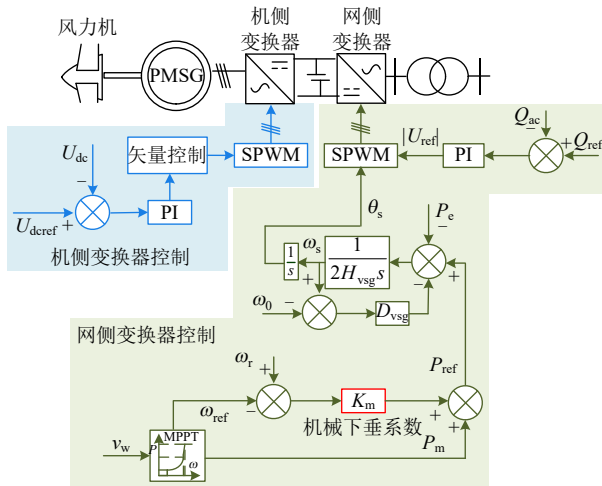


图 1 基于 VSG 构网控制的 PMSG 整机控制结构框图

Fig. 1 Control structure diagram of the PMSG based on VSG grid forming control

VSG 构网控制型直驱风电机组通过模拟同步机转子运动方程, 使其具有同步机的惯量响应特性, 可表示为

$$P_{\text{ref}} - P_{\text{e}} = 2H_{\text{vsg}} \left(\frac{d\omega_s}{dt} \right) + D_{\text{vsg}} (\omega_s - \omega_0) \quad (5)$$

式中: H_{vsg} 和 D_{vsg} 分别为设定的惯性时间常数和阻尼系数; ω_s 为 VSG 虚拟转速; ω_0 为额定转速, P_{e} 为 GSC 侧输出电磁功率。结合式(1), 有功参考功率 P_{ref} 可表示为

$$P_{\text{ref}} = P_{\text{m}} + (\omega_r - \omega_{\text{ref}}) K_{\text{m}} =$$

$$\frac{1}{2} \rho A v_{\text{W}}^3 C_{\text{p}} (\omega_r, \beta) + (\omega_r - \omega_{\text{ref}}) K_{\text{m}} \quad (6)$$

式中: ω_r 为风机转子转速; K_{m} 为设定的机械下垂系数。

在忽略变流器的机械损耗和功率损耗的情况下, 风力机捕获的功率 P_{W} 、GSC 侧输出电磁功率 P_{e} 、风机发电机侧输出机械功率 P_{m} 间的关系为

$$\begin{cases} P_{\text{W}} = P_{\text{m}} + \dot{E}_{\text{R}} = P_{\text{m}} + T_{\text{r}} \dot{\omega}_{\text{r}} \\ P_{\text{m}} = P_{\text{e}} + \dot{E}_{\text{dc}} = P_{\text{e}} + C_{\text{dc}} \dot{E}_{\text{dc}} / E_{\text{dc}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_{R} 为风机转子储存的动能; T_{r} 为额定转矩; E_{dc} 为风机直流侧电容储存的能量; C_{dc} 为直流侧电容的容值。考虑到风机直流侧电容储存的容量远小于转子储存的动能, 且其动态过程通常在 10ms 左右, 故上述式(7)中 P_{m} 可以简化为

$$P_{\text{m}} = P_{\text{e}} \quad (8)$$

式中: GSC 侧输出电磁功率 P_{e} 可进一步表示为

$$P_{\text{e}} = E \| U_{\text{ac}} \| \sin \delta'_{\text{e}} / X_{\text{eq}} \quad (9)$$

式中: δ'_{e} 为 PMSG 的功角, 进一步可得 $d\delta'_{\text{e}}/dt$ [30] 为

$$\frac{d\delta'_{\text{e}}}{dt} = \omega_s - 2\pi f_{\text{g}} \quad (10)$$

式中: f_{g} 为电网频率。

基于以上分析, 尽管 GSC 侧基于 VSG 构网控制下的输出外特性与传统同步发电机相似, 但风机本身状态也将影响转子侧能量平衡, 风机转子的功角摇摆方程为

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_{\text{m}}} \left(\frac{P_{\text{m}} - P_{\text{e}}}{\omega_r} - D_{\text{m}} \omega_r \right) \quad (11)$$

式中: H_{m} 为风机的机械时间常数; D_{m} 为机械阻尼系数。结合式(5)~(11), 当风机频率支撑过程中达到新的平衡点时, 需要满足下述条件:

$$\begin{cases} P_{\text{m}} - P_{\text{e}} = D_{\text{m}} \omega_r^2 \\ P_{\text{m}} - P_{\text{e}} = D_{\text{vsg}} (\omega_s - \omega_0) - K_{\text{m}} (\omega_r - \omega_{\text{ref}}) \\ \omega_s = 2\pi f_{\text{g}} \end{cases} \quad (12)$$

忽略机械阻尼系数 D_{m} , 简化式(12)进一步可得:

$$\begin{cases} P_{\text{m}} = P_{\text{e}} \\ D_{\text{vsg}} (\omega_s - \omega_0) = K_{\text{m}} (\omega_r - \omega_{\text{ref}}) \\ \omega_s = 2\pi f_{\text{g}} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 基于 VSG 构网型控制的 PMSG 频率支撑过程中的稳定平衡点与 K_{m} 、 D_{vsg} 的变化存在耦合关系, 下面结合仿真结果进行分析。

1.3 基于 VSG 构网控制的直驱风机转子失稳特性

本节通过给定不同大小的负荷扰动与 VSG 控

制参数(K_m 、 D_{vsg} 、 H_{vsg})，基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件，采用附录 A 图 A1 所示两区域系统仿真模型定性分析直驱风机转子失稳特性，其中风电场由 30 台 5MW 的 PMSG 组成，同步机组容量为 300MW，初始负荷为 300MW，同步机与 PMSG 相关参数分别见附录 A 表 A1、A2 所示。

测试额定风速下，系统侧不同扰动大小以及相同扰动大小下，不同控制参数的风电功率-转子转速响应结果，如图 2(a)–(d)所示。图中黑色虚线表示不同转速下的风机机械功率 P_m ，忽略机械损耗，当风机处于稳态时运行点均位于黑色虚线上。

图 2(a)表明，随着系统扰动量的增大，风电机组释放有功功率增加，可能导致转子转速下降过快，引发转子转速过低而失速，带来转子失稳的风险。当系统扰动量为 18MW 时，风机频率支撑动态过程中电磁功率 P_e 与机械功率 P_m 变化曲线不存在交点，风机转子转速将持续下降至最低转速 ω_{min} ，触发风机最低转速限制导致脱网。

结合式(13)，VSG 构网控制下风机频率支撑稳定性与机侧机械下垂系数 K_m 及 VSG 同步控制环中的控制参数 D_{vsg} 有关，如图 2(b)、(c)所示。

在相同大小的扰动下，风机转子转速稳定点与 K_m 的变化呈正相关，随着 K_m 增大，风机转子转速稳定平衡点右移，频率支撑动态过程中的转子稳定性增强。与 K_m 相反， D_{vsg} 的大小与风机转子稳定性呈负相关，随着 D_{vsg} 增大，风电机组转子稳定性变差。图 2(d)表明，VSG 同步控制环中的控制参数 H_{vsg} 的变化主要影响频率支撑的动态过程，在风电转子稳定时，转子转速稳定平衡点不变。

综合考虑， D_{vsg} 的取值对系统阻尼特性会产生影响，本文通过更改机械下垂系数 K_m 的方式，提升风电机组频率支撑过程中的转子稳定性。

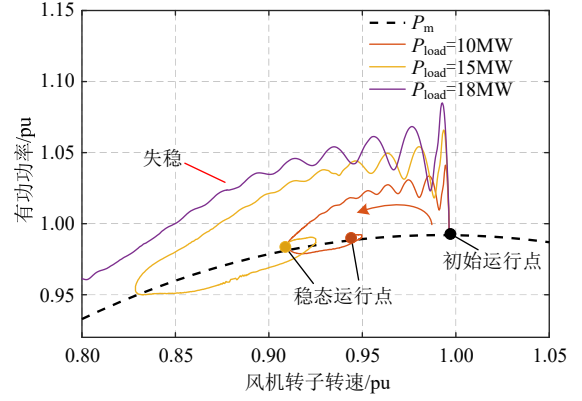
2 VSG 构网控制型直驱风机频率稳定性提升及转速恢复策略

2.1 计及风机转子稳定性约束的机械下垂系数选择方法

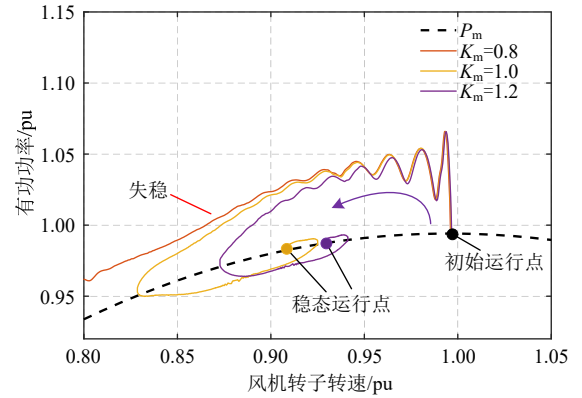
由图 2 可知，风机转子稳定性与系统频率扰动大小相关，随着扰动量增大，存在转子失稳的风险。因此，需要对扰动量大小进行估算。首先，系统等值惯性时间常数 H_{sys} 可表示为

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{sg,i} S_{sg,i} + \sum_{i=1}^m H_{vsg,i} S_{wt,i}}{\sum_{i=1}^n S_{sg,i} + \sum_{i=1}^m S_{wt,i}} \quad (14)$$

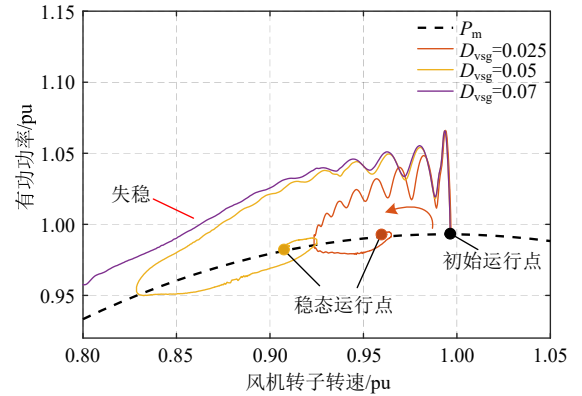
式中： n 为系统中同步机的个数； $H_{sg,i}$ 为同步发电



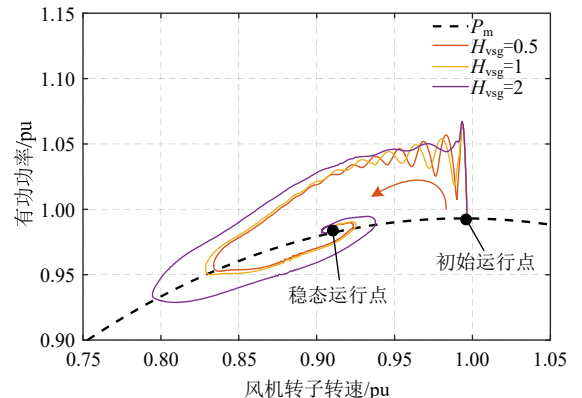
(a) 扰动大小对风电机组转子稳定性影响



(b) K_m 对风电机组转子稳定性影响



(c) D_{vsg} 对风电机组转子稳定性的影响



(d) H_{vsg} 对风电机组转子稳定性的影响

图 2 VSG 构网控制型直驱风机控制参数对转子稳定性的影响

Fig. 2 Rotor stability of VSG grid forming controlled PMSG during inertia response with different values of control parameters

机 i 的惯性时间常数; $S_{sg,i}$ 为同步发电机 i 的容量; m 为系统中基于 VSG 构网控制风机的台数; $H_{vsg,i}$ 为风机 i 的惯性时间常数; $S_{wt,i}$ 为风机 i 的容量。扰动量大小可预估为

$$\Delta P_d = \frac{2H_{sys}}{f_b} \frac{df}{dt} \left(\sum_{i=1}^n S_{sg,i} + \sum_{i=1}^m S_{wt,i} \right) \quad (15)$$

令 $d\delta'_e/dt=0$, 并将式(5)代入式(10), 可得:

$$\frac{d\delta'_e}{dt} = \omega_s - 2\pi f_g = \frac{P_{ref} - P_c}{D_{vsg}} + \omega_0 - 2\pi f_g = 0 \quad (16)$$

式中: 稳态平衡时 $d\omega_s/dt=0$ 。将式(6)(8)(9)代入式(13), 可得:

$$\frac{(\omega_r - \omega_{ref})K_m}{D_{vsg}} + \omega_0 - 2\pi f_g = 0 \quad (17)$$

进一步可得风机转子转速在频率支撑过程中的临界稳定点(ω_{cr}):

$$\omega_{cr} = \omega_{ref} - \frac{(\omega_0 - 2\pi f_g)D_{vsg}}{K_m} \quad (18)$$

由式(18)可知, ω_{cr} 与 K_m 的变化呈正相关, 与 D_{vsg} 的变化呈负相关, 与上述仿真分析结果一致。为防止风机因过度释放能量触发转速保护而脱网, 设置最低转速为 ω_{min} 。因此, ω_{cr} 应满足 $\omega_{cr} \geq \omega_{min}$ 。

结合式(15)中预估扰动量 ΔP_d , 建立如图 3 所示的系统频率响应模型^[31]。

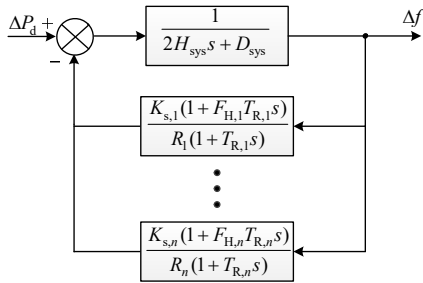


图 3 系统频率响应模型

Fig. 3 Modified system frequency response model

图 3 中: F_H 为汽轮机高压缸做功比例; T_R 为再热器系数; K_s 为机械功率增益系数; R 为调速器调节系数; D_{sys} 为系统等值阻尼系数, 其计算方法与式(14)类似, 此处不再赘述。建立系统频率响应表达式^[32]如下:

$$\Delta f(s) = \frac{\Delta P_d}{2HT_R s} \frac{1 + T_R s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (19)$$

式中: ζ 和 ω_n 可表示为式(20)。

对式(19)进行拉普拉斯反变换, 可得系统频率响应时域表达式为式(21), 其中 ϕ 可表示为式(22)。当频率偏差达到最大值时, 满足式(23)。进一步可得系统频率最大偏差估算值 Δf_{max} 的表达式为式(24)。

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{1}{2HT_R}(D + R_R)} \\ \zeta = \frac{1}{2} \frac{2H + T_R(D + F_R)}{\sqrt{2HT_R}(D + R_R)} \\ F_R = \sum_{i=1}^n \frac{K_i F_i}{R_i} \\ R_R = \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{R_i} \end{cases} \quad (20)$$

$$\Delta f(t) = \frac{\Delta P_d}{2HT_R \omega_n^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \phi) \right) + \left[\Delta P_d / (2H\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}) \right] e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t) \quad (21)$$

$$\phi = \arctan(\zeta / \sqrt{1-\zeta^2}) \quad (22)$$

$$\frac{d\Delta f(t)}{dt} = 0 \quad (23)$$

$$\begin{cases} t_{max} = \frac{1}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \arctan\left(\frac{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta\omega_n - 1/T_R}\right) \\ \Delta f_{max} = \frac{\Delta P_d}{R_R + D_{sys}} \left(1 + e^{-\zeta\omega_n t_{max}} \sqrt{\frac{T_R(R_R - F_R)}{2H_{sys}}} \right) \end{cases} \quad (24)$$

结合式(15)(18)(24), 可得 K_m 取值范围表达式:

$$K_m \geq K_{cr} = \frac{\Delta f_{max} 2\pi D_{vsg}}{\omega_{ref} - \max(\omega_{cr}, \omega_{min})} \quad (25)$$

假设频率扰动发生前系统中 H_{sys} 、 S_{sys} 、 D_{sys} 等参数均为已知量, 考虑到新能源波动特性对系统参数的影响^[33-34], 设定式中 Δf_{max} 的估算误差为 $\pm 5\%$, 即可得到 K_m 取值范围。

2.2 计及风机转子稳定性提升的频率支撑控制策略

本文所提的计及风机转子稳定性提升的频率支撑控制策略流程如图 4 所示。

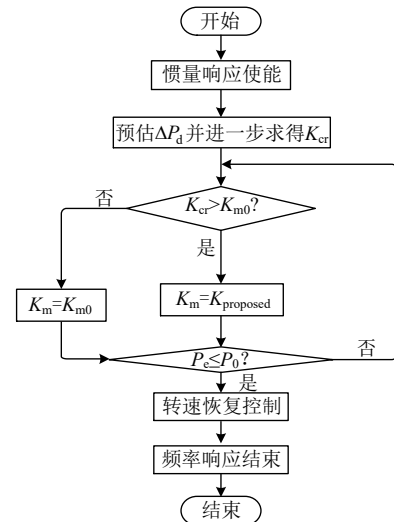


图 4 本文所提构网控制型风机频率支撑控制策略流程
Fig. 4 Proposed frequency support control strategy of GFM based wind turbine

当频率扰动发生时, 构网控制型风机在扰动瞬间参与惯量响应, 此时 K_m 取值为初始值 K_{m0} , 本文取 $K_{m0}=1$ 。根据式(15)(25), 预估得到扰动大小 ΔP_d 并进一步求得临界稳定值 K_{cr} , 当系统频率扰动量较小, $K_{cr} \leq K_{m0}$ 时, 风机频率支撑过程中无失稳风险, K_m 值维持 K_{m0} 不变。当系统频率扰动量较大, $K_{cr} > K_{m0}$ 时, 若风机 K_m 值仍设置为 K_{m0} , 则存在转子失稳的风险, 此时切换 K_m 取值至 $K_{proposed}$ 。为抵消式(25)中 $\Delta f_{\max} \pm 5\%$ 的估算误差, $K_{proposed}$ 可表示为

$$K_{proposed} = \frac{105\%}{95\%} K_{cr} \quad (26)$$

当风机电磁功率 P_e 持续减少至低于机械功率 P_m 时, 在没有附加转速恢复控制的情况下, 风机会进入偏离 MPPT 曲线的稳态运行点, 导致风机捕获功率下降, 因此需要附加转速恢复控制环节。

2.3 VSG 构网控制型直驱风机渐进式转速恢复控制策略

当风机电磁功率 P_e 等于初始有功功率 P_0 时, 若频率支撑继续进行, 风机的有功输出将持续降低, 故此时频率支撑结束转入转速恢复阶段, K_m 切换至 K_{rec} , 其表达式在 $K_{proposed}$ 基础上附加时变函数 ΔK 以逐渐增大 K_m 的值, 帮助转子转速恢复:

$$K_{rec} = K_{proposed} + \Delta K \quad (27)$$

为减缓频率二次跌落风险, 当风机退出频率支撑切换至转速恢复阶段时, 有功功率变化应尽可能减少, 因此本文提出一种基于二次函数渐进式转速恢复控制策略, 可以有效避免产生明显的频率二次跌落, 其中 ΔK 表达式为

$$\Delta K = a(t - t_{rec})^2 + b(t - t_{rec}) + c \quad (28)$$

式中: t_{rec} 为频率支撑结束转入转速恢复阶段的时刻, 触发判据为 $P_e \leq P_0$ 。其中, a 、 b 、 c 的取值通过正交实验法^[35]初步确定。

由上述分析可知, 通过增加 K_m 的取值可以加速转速恢复过程, 但从风机参与下次频率支撑角度出发, 需要控制 K_m 回到初始值 K_{m0} 。本文提出将 K_m 的变化与系统二次调频相结合, 系统二次调频开始前, K_m 保持在 K_{rec} 以维持较高的转子转速, 当 $P_e = P_m$ 达到临时稳态时, K_{rec} 维持在当前值 K_{rec_hold} 不再增大; 当接收到系统二次调频的自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 信号 $t = t_{off}$, K_m 切换至 K_{off} , 如式(29), 线性降低至初始值 K_{m0} 。

$$K_{off} = K_{rec_hold} - d(t - t_{off}) \quad (29)$$

综上, VSG 构网控制型直驱风机频率支撑全过程的 K_m 变化如图 5 所示。

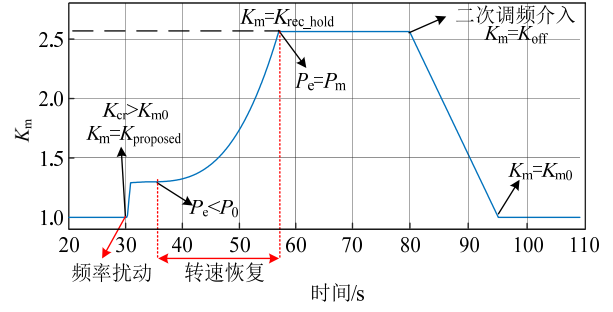


图 5 典型频率扰动全过程的 K_m 变化曲线

Fig. 5 Typical curve of K_m during the process of frequency regulation

为验证所提 VSG 构网控制型风机渐进式转速恢复控制策略的有效性, 以附录 A 图 A1 两区域系统仿真为例, $t=15s$ 时负荷突增 10MW 以模拟系统频率跌落事故, $t=50s$ 时系统二次调频动作, 对比了不附加转速恢复、 K_{rec} 线性增加策略、本文所提转速恢复策略, 结果如图 6 所示。

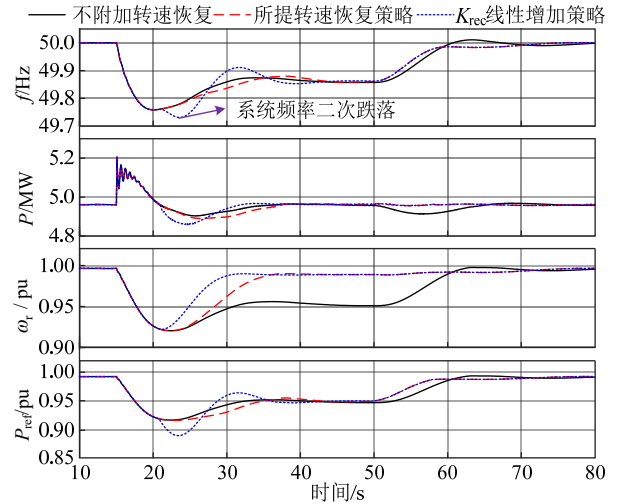


图 6 VSG 构网控制型直驱风电转速恢复控制策略

Fig. 6 Rotor speed recovery strategy of VSG GFM controlled PMSG

如图 6 中黑色曲线所示, 不附加转速恢复控制下, 风机转子转速无法主动恢复至初始值。当采用 K_{rec} 线性增加的转速恢复策略时, 如图中蓝色曲线所示, 造成了系统频率二次跌落现象。与之对比, 如图 6 中红色曲线所示, 本文所采用的渐进式转速恢复控制策略可有效减小恢复初期的风机有功突变, 在提升风机转子转速的同时, 避免了频率二次跌落的风险。

3 算例仿真

为验证本文所提的考虑转子稳定性约束的直驱风机 VSG 构网频率支撑控制的有效性, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件, 采用改进 IEEE 3 机 9 节点系统进行分析, 聚合风场由 30 台 5MW 的 PMSG 组成, 风电渗透率为 20%, 系统发生频率扰

随着风电渗透率的上升,系统等效惯量与阻尼变化,根据2.1节中的分析可得 K_{cr} 也随之变化。当风电渗透率为25%、29.4%、33.3%时, K_{cr} 分别为1.04、1.08、1.12,均大于预设值 $K_{m0}=1$ 。因此,在无附加控制下风电机组频率支撑过程中存在转子失稳的风险,而采用本文所提的稳定性提升控制策略后可有效避免转子失稳,如图9所示。

3.3 不同风速下控制策略验证

为讨论所提控制策略在不同风速下的有效性,以系统扰动 $\Delta P_d=18\text{MW}$ 为例,对比风速为8、9、10、11m/s(额定风速)下的仿真结果,如图10所示。

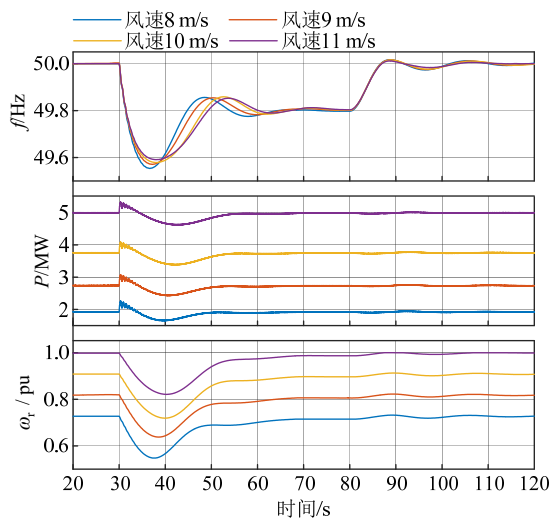


图10 不同风速下仿真结果

Fig. 10 Simulation results under different wind speeds

如图10所示,随着风速逐渐上升至额定风速,风机的 ω_{ref} 逐渐增加,其所能释放的转子动能更多。当系统发生频率扰动时,减缓了扰动初期频率变化率的同时提升了频率最低点,且采用所提控制方法下,均未发生转子失稳及频率二次跌落现象,验证了该方法具有较强的鲁棒性。

综上,仿真验证了所提方法在不同扰动、不同风电渗透率、不同风速场景下,保证VSG构网控制型直驱风机参与系统频率支撑过程的转子稳定性,并避免转速恢复过程的频率二次跌落,提升系统频率响应特性,具备较强的适用性和优越性。

4 结论

为提升含高比例新能源电力系统的频率调节能力,本文提出了一种考虑转子稳定性约束的直驱风机VSG构网频率支撑控制策略,通过理论研究和仿真分析得出以下结论:

1) VSG构网控制下直驱风机频率支撑稳定性与VSG同步控制环中的虚拟阻尼 D_{vsg} 及风机机械下垂系数 K_m 有关,虚拟惯量 H_{vsg} 则主要影响频率

支撑的动态过程。

2) 所提基于变机械下垂系数 K_m 的直驱风电有功控制策略不但可有效保证频率支撑过程的转子稳定,同时充分挖掘了风电支撑潜力,并提高了支撑能力;所采用的渐进式转速恢复控制策略可减小恢复初期的风机有功突变,在兼顾转子转速恢复速度的同时,有效避免系统发生频率二次跌落。

限于篇幅,本文研究尚未考虑系统频率动态中各节点频率的时空分布特性,下一步将对跟网/构网混合新能源集群的惯量-功率-频率多时空耦合机理与控制技术进行深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191(in Chinese).
- [2] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-25.
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25(in Chinese).
- [3] HU Jiabing, SUN Li, YUAN Xiaoming, et al. Modeling of type 3 wind turbines with d/dt inertia control for system frequency response study[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2799-2809.
- [4] 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(in Chinese).
- [5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [6] National Grid (Great Britain). Grid code documents: connection conditions[EB/OL][2025-04-08]. <http://www.nationalgrid.com/uk/Electricity/Codes/gridcode/gridcodedocs/>.
- [7] WEN Zhang, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. A comprehensive review of wind power based power system frequency regulation[J]. Frontiers in Energy, 2023, 17(5): 611-634.
- [8] XIONG Yongxin, YAO Wei, SHI Zhongtuo, et al. Adaptive dual droop control of MTDC integrated offshore wind farms for fast frequency support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2525-2538.
- [9] 李国庆, 刘先超, 姜涛, 等. 考虑转子磁链-电流环控制动态的虚拟惯量DFIG功频响应特性建模[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4897-4911.
LI Guoqing, LIU Xianchao, JIANG Tao, et al. Active power-frequency response modeling of doubly-fed induction generator with virtual inertia control considering rotor flux-current loop control dynamics[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4897-4911(in Chinese).
- [10] BAO Weiyu, DING Lei, LIU Zhifan, et al. Analytically derived fixed termination time for stepwise inertial control of wind turbines—Part I: analytical derivation[J]. International Journal of Electrical Power &

- Energy Systems, 2020, 121: 106120.
- [11] 闵勇, 陈磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 855-868.
MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 855-868(in Chinese).
- [12] 闫培雷, 葛兴来, 王惠民, 等. 弱电网下新能源并网逆变器锁相环参数优化设计方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2210-2221.
YAN Peilei, GE Xinglai, WANG Huimin, et al. PLL parameter optimization design for renewable energy grid-connected inverters in weak grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2210-2221(in Chinese).
- [13] 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(in Chinese).
- [14] ZHANG Haobo, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [15] KENYON R W, SAJADI A, BOSSART M, et al. Interactive power to frequency dynamics between grid-forming inverters and synchronous generators in power electronics-dominated power systems[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(3): 3456-3467.
- [16] 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(in Chinese).
- [17] ZHONG Qingchang. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1281-1290.
- [18] YAN Weihang, CHENG Lin, YAN Shijie, et al. Enabling and evaluation of inertial control for PMSG-WTG using synchronverter with multiple virtual rotating masses in microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 1078-1088.
- [19] XU Yunyang, NIAN Heng, HU Bin, 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.
- [20] 桑顺, 齐琛, 张新松, 等. 永磁直驱风电机组的构网型控制与黑启动[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3168-3180.
SANG Shun, QI Chen, ZHANG Xinsong, et al. Grid-forming control and black start of PMSG-based direct-driven wind turbine[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3168-3180(in Chinese).
- [21] 桑顺, 张琛, 蔡旭, 等. 全功率变换风电机组的电压源控制(一): 控制架构与弱电网运行稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5604-5616.
SANG Shun, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control of wind turbines with full-scale converters (Part I): control architecture and stability analysis under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5604-5616(in Chinese).
- [22] XI Jiangbei, GENG Hua, MA Shaokang, et al. Inertial response characteristics analysis and optimization of PMSG-based VSG-controlled WECS[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(15): 1741-1747.
- [23] 邓桢彦, 王伟, 王晗, 等. 电压源风电机组的全风速段惯量响应控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 12-25.
DENG Zhenyan, WANG Wei, WANG Han, et al. Inertia response control of voltage source wind turbines at full wind speed[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 12-25(in Chinese).
- [24] 桑顺, 徐婷, 齐琛, 等. 惯性同步构网型变换器定量感知电网频率的机理及抗干扰控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1395-1408.
SANG Shun, XU Ting, QI Chen, et al. Mechanism of quantitatively sensing grid frequency and anti-disturbance control strategy for the grid-forming converter[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1395-1408(in Chinese).
- [25] XI Jiangbei, GENG Hua, ZOU Xin. 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.
- [26] 饶仪明, 吕敬, 戴金水, 等. 不同控制策略下直驱风电机组的电网耦合特性及稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 150-159.
RAO Yiming, LYU Jing, DAI Jinshui, et al. Analysis of generator-grid coupling characteristics and stability for direct-drive wind turbines with different control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 150-159(in Chinese).
- [27] 唐玉烽, 杨苹, 杨义. 考虑频率二次跌落的风电机组频率响应控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 166-174.
TANG Yufeng, YANG Ping, YANG Yi. Frequency response control strategy of wind turbines considering frequency secondary drop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 166-174(in Chinese).
- [28] 王鑫, 杨德健. 基于变系数PI控制的双馈风电机组自适应转速恢复策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4120-4129.
WANG Xin, YANG Dejian. Adaptive speed recovery strategy of doubly-fed induction generator based on variable PI control coefficient[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4120-4129(in Chinese).
- [29] 秦世耀, 代林旺, 王瑞明, 等. 考虑风电机组功率跌落和机械载荷优化的虚拟惯量控制方法[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1665-1672.
QIN Shiyao, DAI Linwang, WANG Ruiming, et al. Virtual inertia control method considering wind turbine power drop and mechanical load optimization[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1665-1672(in Chinese).
- [30] HUANG Linbin, XIN Huanhai, ZHANG Leiqi, et al. Synchronization and frequency regulation of DFIG-based wind turbine generators with synchronized control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1251-1262.
- [31] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [32] NGUYEN N, ALMASABI S, BERA A, et al. Optimal power flow incorporating frequency security constraint[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 6508-6516.
- [33] 王强强, 姚良忠, 徐箭, 等. 基于切片采样-马尔科夫链蒙特卡洛模拟的高比例新能源电力系统等效惯量概率评估[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 140-152.
WANG Qiangqiang, YAO Liangzhong, XU Jian, et al. S-MCMC based equivalent inertia probability evaluation for power systems with high proportional renewable energy[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 140-152(in Chinese).
- [34] LEKSHMI J D, RATHER Z H, PAL B C. Online estimation of disturbance size and frequency nadir prediction in renewable energy integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1126-1137.
- [35] LIU Kangcheng, QU Yanbin, KIM H M, et al. Avoiding frequency second dip in power unreserved control during wind power rotational speed recovery[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3097-3106.



闻章

在线出版日期: 2024-04-12。

收稿日期: 2024-01-18。

作者简介:

闻章(1996), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源并网运行、电力系统分析与控制等, E-mail: wenzhang1996@whu.edu.cn;

姚良忠(1961), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为直流输电技术、新能源并网与控制等, E-mail: yaoliangzhong@whu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)

附录 A

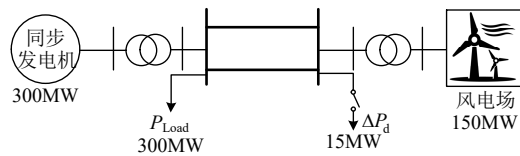


图 A1 两区域系统仿真结构图

Fig. A1 Modified two-area simulation system diagram

表 A1 同步机组参数信息

Table A1 Synchronous generator parameters information

同步机组参数	数值
额定容量/MW	300
额定电压/kV	38.105
惯性时间常数 H_{sg}	2.41
调差系数 R_{sg}	0.3
阻尼系数 D_{sg}	2
再热器时间常数 T_{R}	7
汽轮机高压缸做功比例 F_{H}	0.49

表 A2 PMSG 参数信息

Table A2 PMSG parameters information

风机参数	数值
切入风速/(m/s)	3
切出风速/(m/s)	25
额定风速/(m/s)	11
空气密度 ρ /(kg/m ³)	1.225
风轮半径 R /m	63
机械下垂系数 K_{m}	1
VSG 惯性时间常数 H_{vsg}	1
VSG 阻尼系数 D_{vsg}	0.05
机械惯性时间常数 H_{m}	0.9
机械阻尼系数 D_{m}	0.01