

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0079-05

考虑风速变化的风电系统频率综合控制策略

刘逸飞¹, 李泰², 马佳浩¹

(1. 南京信息工程大学 自动化学院, 江苏 南京 210000; 2. 无锡学院 自动化学院, 江苏 无锡 214000)

摘要: 自然风速的随机性与波动性, 风电机组输出功率易出现剧烈波动, 不仅降低风能利用效率, 还会对电网频率稳定性造成显著冲击, 给电力系统安全带来极大隐患。针对这一问题, 提出一种考虑风速变化的频率综合控制策略。该策略首先采用模型预测控制(model predictive control, MPC)对阵风信号进行优化处理, 精准提取有效风速, 据此生成最优转速参考值, 有效提升最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)的风能捕获效率与稳定性; 进而将提取的有效风速作为模糊控制的关键输入, 构建自适应虚拟惯性控制模块, 通过动态调整控制参数, 增强风电机组对电网频率变化的响应速度与调节能力, 提升一次调频性能。在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建仿真模型, 模拟不稳定风速工况进行测试, 验证所提策略的有效性。仿真结果表明, 该综合控制策略能够有效平抑风电机组输出功率的波动, 显著抑制电网系统频率的快速变化, 为不稳定风速下风电并网系统的安全稳定运行提供可靠保障。

关键词: 模型预测控制; 模糊控制; 虚拟惯性控制; 一次调频; 风电系统; 频率综合控制

中图分类号: TP18; TM614

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)03-0079-05

Frequency integrated control of wind power systems considering wind speed changes

LIU Yifei¹, LI Tai², MA Jiahao¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Technology, Nanjing 210000, Jiangsu, China;

2. School of Automation, Wuxi University, Wuxi 214000, Jiangsu, China)

Abstract: Due to the randomness and fluctuation of natural wind speed, the output power of wind turbines is prone to severe fluctuations, which not only reduces the efficiency of wind energy utilization but also significantly impacts the stability of grid frequency, posing great risks to the safety of the power system. To address this issue, a frequency integrated control strategy considering wind speed variations is proposed. This strategy first employs model predictive control(MPC) to optimize gust signals, accurately extracting effective wind speed and generating optimal speed reference values, thereby effectively enhancing the wind energy capture efficiency and stability of maximum power point tracking(MPPT). Furthermore, the extracted effective wind speed is used as a key input for fuzzy control to construct an adaptive virtual inertia control module. By dynamically adjusting control parameters, the module enhances the response speed and regulation capability of wind turbines to grid frequency variations, improving primary frequency regulation performance. To verify the effectiveness of the proposed strategy, a simulation model is built on the MATLAB/Simulink simulation platform to simulate unstable wind speed conditions for testing. The simulation results show that this integrated control strategy can effectively stabilize the fluctuations in wind turbine output power and significantly suppress rapid changes in grid system frequency, providing reliable guarantees for the safe and stable operation of wind power grid-connected systems under unstable wind speeds.

Keywords: model predictive control; fuzzy control; virtual inertial control; primary frequency modulation; wind power system; frequency integrated control

在“碳达峰”“碳中和”目标的背景下, 风电等新能源接入电网的比重越来越大, 已逐渐取代了常规化石能源^[1]。但是, 由于其本身的波动性和间歇性, 对电网的主动支撑能力较弱, 对电网的冲击较大^[2]。为了保障大规模风电接入电网后的安全性和稳定性, 风电并网准则对双馈风机(doubly fed induction generator, DFIG)需要具备惯性响应、一次调频等频率支持功能^[3-5]。

但是, 由于风速的随机性以及较大的转子惯性, 使得风电机组的功率跟踪出现偏差, 从而影响了系统的鲁棒

性^[6-8]。模型预测控制(MPC)是一种先进的控制策略, 通过预测系统未来行为并在每个时间步上通过优化来选择最佳控制动作, 以实现系统的稳定和优化控制^[9]。因此, MPC可应用于功率跟踪控制策略^[10]。文献[11]将改进模型预测控制对风电机组最大功率点跟踪策略进行优化, 结果表明可以增强了系统的鲁棒性。目前, 针对风力发电并网导致的电网频率波动问题, 已有很多研究工作开展^[12]。文献[13]提出了虚拟惯性的概念, 即在系统出现频率变化时, 通过释放或储存转动动能, 产生一个更大的惯性矩来调节系

收稿日期: 2024-07-10; 录用日期: 2024-08-16

作者简介: 刘逸飞(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 风电机组智能预测控制。

引用本文: 刘逸飞, 李泰, 马佳浩. 考虑风速变化的风电系统频率综合控制策略[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(3): 79-83. (LIU Yifei, LI Tai, MA Jiahao. Frequency integrated control of wind power systems considering wind speed changes[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(3): 79-83.)

统的频率,但未能适应不定风速的情况。文献[14]提出一种控制策略,综合考虑风速、频差变化率及频率偏差等影响,建立多变量模糊控制方法,实现风机储能功率最优分配,提升风机调频能力,但未考虑风能利用率。文献[15]提出了参数模糊推理的虚拟惯量优化控制,采用模糊推理动态调整虚拟惯量控制参数,解决了虚拟惯性与固有转速不协调的问题,但未考虑风速变化对系统调频效果的影响。

综上所述,本文提出一种考虑风速变化的风电系统频率综合控制策略。首先,采用模型预测控制对阵风优化,获得有效风速,进而得到最优转速参考值,提高最大功率点跟踪(MPPT)的风能捕获效率,利用有效风速与模糊控制相结合的方式,构造自适应的虚惯量控制策略,使两种控制策略协同工作,从而提高风机一次调频能力。

1 系统模型

1.1 风速模型

风力发电系统中,风速对机组的运行和出力有直接的影响。可以用平均速度和湍流速度的总和来表达实际风速为

$$V = V_m + \nu \quad (1)$$

式中, V 是风速; V_m 是平均风速; ν 是湍流风速。

阵风是指在短期内风速急剧增加或减少的现象,可用于来检验风力发电机控制器的动力学特性。阵风的表达式为

$$V_n = V_{n_max} R(-1, 1) \cos(\omega_v t + \varphi_v) \quad (2)$$

式中, V_{n_max} 是随机分量的幅值, ω_v 是风速波动的平均间距, φ_v 是 $0 \sim 2\pi$ 均匀分布的随机变量。

1.2 DFIG 模型

图1为双馈风机系统结构图,整体结构可划分为5个主要部分:风力机、轴系、双馈感应发电机(DFIG)、变流器以及控制器。

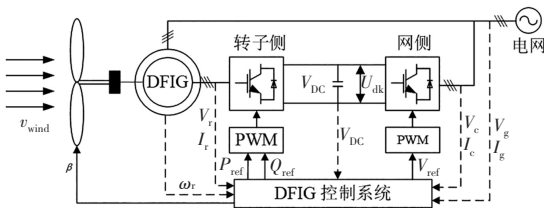


图1 双馈风机系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of double-fed wind turbine system

双馈风力机提取的机械功率可表示为

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

式中, ρ 为空气密度; R 为叶片的半径; v 为风速; C_p 为风能利用系数; λ 为叶尖速比; β 为桨距角; $C_p(\lambda, \beta)$ 是关于 λ, β 的非线性函数,描述为

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\gamma} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\gamma}} + 0.006795\lambda \\ \gamma = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \\ \lambda = \frac{\omega R_w}{v} \end{cases} \quad (4)$$

式中, γ 是引入的中间变量, ω 是风力机转子转速。

$C_p(\lambda, \beta)$ 在不同 β 时随 λ 变化时的曲线如图2所示。当 β 为 0° , 风能利用系数达到最大, DFIG 通过控制转子转速 ω 实现最大风能捕获, 进而实现 MPPT 运行模式为

$$P_{MPPT} = 0.5 C_{Pmax} \rho \pi r_w^2 \left(\frac{\omega r_w}{\lambda_0} \right)^3 \quad (5)$$

式中, P_{MPPT} 是最大功率跟踪曲线, C_{Pmax} 是最大风能利用系数, λ_0 是最优叶尖速比, r_w 是风轮半径。

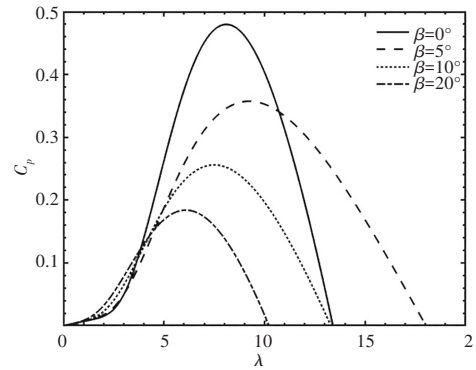


图2 不同桨距角下 $C_p - \lambda$ 曲线

Fig. 2 $C_p - \lambda$ curve under different pitch angles

传统的双馈风电机组控制框架下,通过对机组侧换流器的输出电流幅值和频率进行调节,以达到风电机组对风电的最大利用。双馈风力发电系统中,既可以等效为恒功源,又可以看作是零惯性的同步发电机,但随着风力发电机组取代常规发电机的比重越来越大,其等效惯性和等效阻尼都会急剧下降,这对交流电网的安全性和可靠性造成了极大的威胁。为了保证风机具有频率支撑能力,采用减载模式,通过虚拟惯性控制来应对频率变化率,降低调频时的速度变化量。

2 一次调频控制策略

2.1 基于 MPC 的风机有功功率控制

常规的 MPPT 控制对不稳定风速和较大的转动惯量跟踪效率低,从而导致功率控制方法性能降低。预测控制理论将非线性问题化为二次规划问题,采用数值算法求解,可以更好地解决风机的非线性问题。模型预测控制将最优控制和反馈控制有机地融合在一起,该方法以当前状态为基础,以未来时间内的输出为依据,构造目标函数,以最小的输出误差为目标,通过反馈修正与滚动优化构成闭环控制。所以该模型可用于风力发电系统的功率控制。

预测模型是预测控制的核心,它能对将来的运行状态进行预测。选取适当的预测模型,可以改善预测的有效性与稳定性。滚动优化就是根据当前系统的实际运行情况,结合模型的预测结果,在 k 时刻处,计算出最优的控制方案,并将此方案输入到被控对象,然后在下一时间 $k+1$ 重复该过程。该算法将整个系统划分为若干个最优问题,分别在当前时间与下一时间进行求解。反馈修正是对控制模型进行修正和调整,为了使控制系统更准确地进行控制。

建立风电机组离散状态空间模型为

$$\begin{cases} x(k+1) = A(V)x(k) + B(V)u(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{S_d}{J_r} & \frac{S_d}{J_r N} & \frac{K_\omega - D_d}{J_r} & \frac{D_d}{J_r N} & 0 & \frac{K_\beta}{J_r} & 0 & 0 \\ \frac{S_d}{J_g} & -\frac{S_d}{J_g N} & \frac{D_d}{J_g} & -\frac{D_d}{J_g} & -\frac{1}{J_g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_g} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_\beta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{R_\omega}{M_t} & 0 & 0 & \frac{R_\beta}{M_t} & -\frac{S_t}{M_t} & -\frac{D_t}{M_t} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_V}{J_t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_g} \\ 0 & -\frac{1}{\tau_\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{R_V}{M_t} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$C = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

式中, V 是风速值, K_ω 是气动转矩对风轮转速的偏导数, K_V 是气动转矩对风速的偏导数, K_β 是气动转矩对桨距角的偏导数, R_ω 是气动推力对风轮转速的偏导数, R_V 是气动推力对风速的偏导数, R_β 是气动推力对桨距角的偏导数, S_d 是风力机的扭转刚度, S_t 是发电机的扭转刚度, J_g 是转动惯量, M_t 是变桨执行机构的惯量, D 是阻尼系数, τ 是时间常数。

在第 k 时刻, 预测时域内预测方程的状态变量和对应的输出变量的表达式为

$$\begin{cases} X = Ax(k|k) + BU \\ Y = \Phi x(k|k) + \Psi U \end{cases} \quad (8)$$

$$\Phi = [C \ CA(V) \ CA^2(V) \ \dots \ CA^p(V)]^T \quad (9)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & L & \mathbf{0} \\ CB(V) & \mathbf{0} & L & \mathbf{0} \\ CA(V)B(V) & CB(V) & L & \mathbf{0} \\ M & M & L & M \\ CA^{p-1}(V)B(V) & CA^{p-2}(V)B(V) & L & CB(V) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, X_L 是状态变量矩阵, Y_L 是对应的输出变量矩阵, U 是扰动变量矩阵, C 是系统的输出矩阵, L 是占位符号, 通常代表零矩阵块。

当风机低于额定运行状态时, 通过调整电机的电磁力矩, 实现对风机的最佳转速的跟踪; 当风机高于额定运行状态时, 其输出的扭矩为额定值, 并对桨距角进行调节, 将其速度稳定在额定值。风电机组功率控制总体参考轨迹可以表示为

$$\omega_{ref} = \begin{cases} \frac{N\lambda_{opt}V}{R}, \beta \leq \beta_{min} \text{ 与 } \omega < \omega_r \\ \omega_r, T \geq T_r \text{ 与 } \omega > \omega_r \end{cases} \quad (11)$$

式中, N 是齿轮箱的传动比, T 是电磁转矩, T_r 是额定转矩, ω_{ref} 是参考转速, ω_r 是额定发电机转速, β_{min} 是最小桨距角。

通过求解最优的系统输出变量与参考值之间的误差, 并可以通过设置权重系数的值调整控制器性能, 定义功率控制器的目标函数为

$$J = (Y - Y_r)^T Q (Y - Y_r) + U^T R U \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} U_{min} \leq U \leq U_{max} \\ U_{r,min} \leq (U - U(k-1))/\Delta T \leq U_{r,max} \\ Y_{min} \leq Y \leq Y_{max} \end{cases} \quad (13)$$

式中, U 是扰动变量矩阵, Y_r 是参考值序列, U_{min} 、 U_{max} 分别是控制量的最小值和最大值, Y_{min} 、 Y_{max} 分别是输出量的最小值、最大值, $U_{r,min}$ 、 $U_{r,max}$ 分别是转速控制量的最小值和最大值。

MPC 需要在每一个控制步长中, 完成该二次规划问题的求解, 并将每个最优控制序列的第一个控制量施加于系统。控制逻辑为, 将风速同时作为参考轨迹模块和模型自适应模块的输入。以最佳叶尖速比计算发电机转速参考轨迹。同时根据风速通过自适应机制在每一个控制间隔内控制方法更新预测模型。基于反馈校正进行多目标约束下的最优控制量求解, 并进行滚动优化, 实现风电机组的功率控制。

2.2 风速自适应虚拟惯性控制

虚拟惯性控制是指在风机运行时, 通过调整风机的输出功率来影响发电机转子侧的变流器电流, 从而实现风机在转速瞬时波动时对风机出力进行调节和实现对电网频率瞬态变化的快速响应。虚拟惯性控制对 $d\Delta f$ 有较好的抑制效果, 功率补偿量计算公式为

$$\Delta P = -K_f \frac{d\Delta f}{dt} \quad (14)$$

式中, K_f 是虚拟惯性控制系数; Δf 是系统频率偏差。

当频率出现波动时, 利用风机转子中的能量来进行虚拟惯性控制, 实现对电网频率稳定运行的支持。风速是影响双馈风电机组工作状态的一个重要外部因素, 针对风机在不同风速工况下, 其虚拟惯性的变化规律很难用精确的数学表达式来描述, 因此, 利用模糊逻辑对其进行处理, 可以有效地解决这一问题。本文以风速 V 、频差变化率 $d\Delta f/dt$ 作为模糊控制器的输入, 经过模糊控制器输出虚拟惯性控制系数 K_f 。将风速取为 $[6 \text{ m/s}, 13.5 \text{ m/s}]$, 频差变化率取 $[-1 \text{ Hz/s}, 1 \text{ Hz/s}]$, 虚拟惯性系数取 $[0.1, 1]$ 。其中输入模糊集合为 $\{FB(\text{极$

小),FM(中小),FS(略小),FO(中等),ZS(略大),ZM(中大),ZB(极大)}.输出的为{NB(极小),N(中小),NS(略小),Z(中等),PS(略大),P(中大),PB(极大)}.输入输出变量的隶属度函数采用三角形函数,解模糊计算采用重心法,模糊逻辑规则如表 1 所示。

表 1 模糊逻辑规则
Tab. 1 Fuzzy logic rules

$\frac{d\Delta f}{dt}$	V						
	FB	FM	FS	FO	ZS	ZM	ZB
FB	NB	Z	PS	P	PB	PB	PB
FM	NB	NS	Z	P	PB	PB	PB
FS	NB	NS	Z	PS	PB	PB	PB
FO	NB	N	NS	PS	P	PB	PB
ZS	NB	N	NS	Z	P	P	PB
ZM	NB	NB	N	NS	PS	P	P
ZB	NB	NB	N	NS	Z	PS	P

2.3 频率综合控制策略

随着外部风速的改变,风电机的有功输出也会发生相应的变化,在风机并网时,风电场与电网的安全运行会受到一定程度的影响。所以进行风电机组的功率优化控制是必要的。常规 MPPT 控制主要目的是提高功率系数,优化动态跟踪特性,在其控制方法中,参考转速跟风速直接相关,因此会呈现出高频率的波动。而实际能被风机吸收的风速无法被准确地观测,因此采用 MPC 来估计得到的有效风速,计算出最优转速作为参考轨迹,通过 PI 控制调节电磁转矩信号,优化风电机组的 MPPT 控制。将有效风速和频差变化率通过模糊控制器得到控制参数,从而实现自适应虚拟惯性控制。

风电系统主要由 MPPT 控制器和以虚拟惯性为基础的频率调节器两部分组成。风机输出功率 P_{ref} 由两部分组成,其公式为

$$P_{ref} = P_{MPPT} + \Delta P \tag{15}$$

式中, P_{MPPT} 是 MPPT 控制输出指令, ΔP 是虚拟惯性控制的功率补偿量。

频率综合控制策略结构图如图 3 所示。

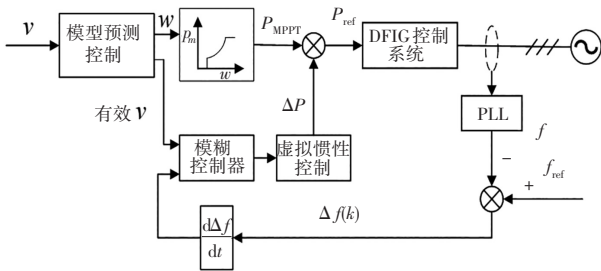


图 3 频率综合控制结构图

Fig. 3 Structural diagram of frequency synthesis control

3 仿真分析

为了验证本文所提控制策略的可行性与有效性,本章

基于 MATLAB/Simulink 平台搭建双馈风机仿真模型,具体模型参数如下表 1 所示。通过仿真在不定风速下的响应过程。

表 2 风机系统参数

Tab. 2 Wind Turbine System Parameters

参数	取值
风电场额定功率	9 MW
DFIG 机组额定功率	1.5 MW
DFIG 额定电压	575 V
发电机惯性	0.62 s
额定风速	11 m/s

图 3 为生成 20 秒阵风风速曲线。通过风电机组在阵风作用下的动态特性进一步对比分析 MPC-MPPT 的控制性能。

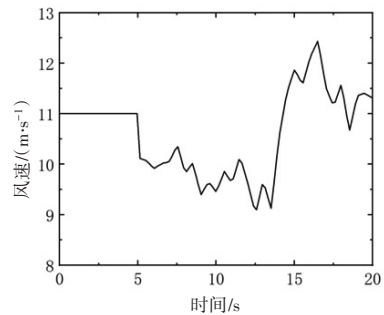


图 4 阵风风速曲线

Fig. 4 Gust wind speed curve

在风机的 MPPT 控制中,以增大功率系数为目标,而控制器则以最优的动态跟踪性能为目标。其输出功率随电磁转矩的起伏及变化规律趋于相同,因此,常规 MPPT 的功率输出和电磁转矩变化趋势基本一致。MPC 能够对电机的电磁力矩、扭矩增量等参数进行约束,并通过赋权调节电机输出的电磁转矩的变化及波动。风机的大转矩变化率是出现在电磁转矩变化的高频部分,MPC-MPPT 对于电磁转矩响应速度更快。有功输出对比图如图 4 所示,与常规 MPPT 相比,MPC-MPPT 输出功率较为平稳,且总出力可增加 0.3%,能有效地减小电机的电磁力矩波动,提高风机的出力稳定性。

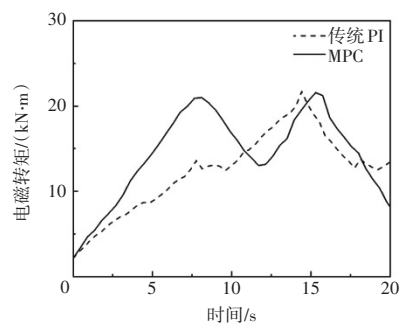


图 5 有功输出对比图

Fig. 5 Comparison diagram of active power output

风机在 MPC-MPPT 的运行模式下虽能够充分利用风

力资源,但是无法满足新能源电站对一次调频的需求。由于风速的剧烈波动,使得系统的频率发生了显著的变化。在此基础上,本文引入自适应虚拟惯性控制,不管风速是上升还是下降,模糊控制参数均能实现对风机惯量的有效补偿,从而改善系统的调频性能。

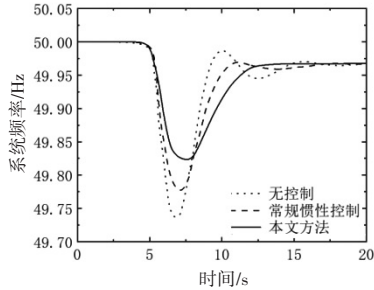


图6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

为了验证所提出的控制方法对阵风的适应能力,本项目将针对不参与调频、常规惯性控制和本文提出的频率集成控制3种方式,在风机渗透率20%情况下,比较研究3种情况下的动态响应特征,仿真结果如图5所示。风电机组融合虚拟惯性控制和MPC-MPPT控制进行系统一次调频对比,研究其系统频率变化偏差。采用本文的控制方式,DFIG惯性和一次频率的最大波动为49.83~49.95 Hz,因此,不论风速增加还是减少,该方案都能提高一次调频能力。考虑到风速的波动,本文方法能够产生惯性和一次调频的优化,提高风力发电效率,能够更好地支撑系统的一次调频需求,可以保证变桨控制设备的安全性、稳定性和耐久性。

4 结论

在深入研究双馈风机系统频率动态响应的基础上,针对在定风情况下,常规最大功率点跟踪控制其功率控制效果不佳,系统的频率动态稳定会受到影响,提出考虑风速变化的风电系统频率综合控制。该策略可以使风电机组

在定风的情况下提高功率控制效果,平稳输出功率,对虚拟惯性控制环节的参数进行动态调节,既能有效规避风险,又能更准确地掌握可释放动能。通过仿真验证,该控制策略可以使具备惯性响应,显著改善系统的稳定性。

参考文献

- [1]魏泓屹,卓振宇,张宁,等. 中国电力系统碳达峰·碳中和转型路径优化与影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19):1-12.
- [2]魏赏赏,许昌,阎洁,等. 考虑延迟的风电场模型预测尾流优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5):1813-1823.
- [3]王豪,董锋斌,王凯,等. 不平衡电压下的DFIG模型预测直接功率控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(4):84-93.
- [4]谢善益,谢恩彦,杨强,等. 台风条件下海上风电安全运行仿真模拟系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6):146-149,180.
- [5]杨强,仲卫,谢善益,等. 基于粒子群算法优化PID的海上风电柔直并网系统调频控制[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8):144-148.
- [6]赵照临,姚业佩,徐光辉,等. 双馈感应发电机参与电网一次调频的改进限转矩控制方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(1):87-93.
- [7]屈兴武,王栋,马天诚,等. 支撑电网频率稳定的双馈风机一次调频控制需求分析[J]. 智慧电力, 2023, 51(10):38-46.
- [8]赵璟溢,张磊,王建响,等. 船舶工厂机械臂变导纳模糊控制策略[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(10):22-26.
- [9]田德,周臣凯,唐世泽,等. 基于自适应模型预测控制的大型风电机组MPPT方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44(6):501-508.
- [10]段家华,姚朴,姚金明. 基于MPC算法的风电参与频率调控策略[J]. 可再生能源, 2023, 41(11):1497-1503.
- [11]余洋,贾浩,陈启维,等. 基于改进模型预测控制的电-气系统新能源功率波动平滑策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9):65-73.
- [12]马德智,栗文义,温彩凤,等. 基于双馈发电机调频参与度的风/储协调一次调频控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(3):968-979.
- [13]颜湘武,孙雪薇,崔森,等. 基于转子动能与超级电容器储能的双馈风电机组惯量和一次调频改进控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊1):179-190.
- [14]商侨晏,李凤婷,王森,等. 基于多变量模糊逻辑控制的风储联合系统一次调频策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6):2344-2360.
- [15]黎静华,宋诚鑫,兰飞. 基于参数模糊推理的风机虚拟惯量优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20):125-133.

(上接第45页)

- [8]陈志刚,赵志川,钟新荣,等. 基于鲁棒局部均值分解与二阶瞬态提取变换的滚动轴承故障诊断[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(1):157-165.
- [9]杨楠,孙鑫,孙梦雨,等. 基于MATLAB/Simulink的动态电路仿真实验设计[J]. 信息技术, 2019, 43(7):37-40.
- [10]曹渝昆,何健伟. 基于RA-DNN的电力变压器故障分类方法[J]. 电气自动化, 2019, 41(2):98-101, 107.
- [11]公多虎,詹仲强,葛志杰,等. 基于小波分析的高压隔离开关故障检测方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(3):19-22,42.
- [12]徐延海. 基于GAN的通信网络故障检测与诊断方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(4):67-70,146.
- [13]杨婧. 基于K-means聚类和LSTM的供电台区线损预测[J]. 微型

- 电脑应用, 2023, 39(8):76-78, 90.
- [14]张尧,李子森. 面向智能电网系统的轻量级入侵检测方法[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(3):17-20, 27.
- [15]饶姗姗,冷小鹏. 基于组合特征选择的随机森林信用评估[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(3):345-350.
- [16]张家源,胡岳. 基于Spectrogram谱图局部放电窄带干扰信号抑制方法[J]. 电气自动化, 2020, 42(3):55-58.
- [17]王新宇,任正,陈财福,等. 基于RT-LAB硬件在环的风电机组宽频振荡风险评估[J]. 东北电力技术, 2023, 44(11):27-31, 35.
- [18]陈萍,陈垚,于明月,等. 基于OPAL-RT的电机模拟器仿真方法[J]. 电气技术, 2023, 24(4):15-21.