

基于模糊PID的考虑风速变化的虚拟惯性控制策略

宋宇嘉, 王利猛, 李 扬, 任 星

(电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 为充分利用风电功率支撑能力, 有效缓解机组调频压力, 提升电网频率稳定性, 提出基于模糊PID的考虑风速变化的虚拟惯性控制策略。构建风机的数学模型, 依据该模型分析风机各个组成部分的运行特性, 并构建风速模型。在考虑风速影响下, 分析风速变化对于风机虚拟惯性控制的影响, 设计模糊PID控制器, 自适应动态调整虚拟惯性系数, 实现频率控制; 为避免虚拟惯性的控制结果发生超调控制, 采用粒子群算法优化PID控制器的控制参数, 设计粒子群优化的模糊PID控制器, 完成虚拟惯性控制, 保证电网频率稳定。测试结果显示: 考虑风速变化完成虚拟惯性系数调整具有较好的合理性, 能够实现该系数随着风速的动态变化进行自适应调整; 在故障扰动和负荷突变两种工况下, 电网频率的控制结果较好, 稳定性较高, 满足控制需求。

关键词: 模糊PID; 虚拟惯性; 控制策略; 粒子群优化

Virtual inertial control strategy considering wind speed changes based on fuzzy PID

SONG Yujia, WANG Limeng, LI Yang, REN Xing

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: In order to fully utilize the power support capability of wind power, effectively alleviate the pressure of unit frequency regulation, and improve the frequency stability of the power grid, a virtual inertia control strategy based on fuzzy PID considering wind speed changes is proposed. Construct a mathematical model of the fan, analyze the operating characteristics of each component of the fan based on this model, and construct a wind speed model. After considering the impact of wind speed changes on the virtual inertia control of the fan, design a fuzzy PID controller to adaptively adjust the virtual inertia coefficient and achieve frequency control; In order to avoid overshoot control of the control result of virtual inertia, particle swarm optimization algorithm is used to optimize the control parameters of PID controller, and Particle swarm optimization fuzzy PID controller is designed to complete virtual inertia control and ensure the stability of power grid frequency. The test results show that considering changes in wind speed to adjust the virtual inertia coefficient has good rationality, and can achieve adaptive adjustment of the coefficient with dynamic changes in wind speed; After the virtual inertia control of the fan, its control response time is all within 0.1 seconds, and the overshoot is all within 0.2%; Under both fault disturbance and sudden load changes, the control results of the power grid frequency are good, with high stability, meeting the control requirements.

Key words: fuzzy PID; virtual inertia; control strategy; particle swarm optimization

吉林省自然科学基金项目 (YDZJ202101ZYTS149)

0 引言

随着可再生能源的发展,风能已成为增长最快的可再生能源之一,为实现能源清洁,风电被大量并网,参与电网能源生产和服务。但是风电具有显著的不稳定性、间歇性以及天气依赖性等特点^[1],导致风机的输出功率形成较大波动,对于整个电网运行的稳定性造成直接影响。并且风电并网过程中,通常通过变流器完成风机和电网之间的耦合^[2],由此导致电力系统惯量明显降低。因此在大规模风电并网情况下,充分利用风电功率支撑能力,能够有效缓解机组调频压力,提升电网频率稳定性。但是受到风力发电特点的影响,风机的输出功率波动较大,不能满足电网调频的要求^[3]。为解决该问题,使风电同时参与电网调频,以提高电力系统的稳定性,支持可再生能源电力系统,降低成本。风电的参与可以降低电网调频的成本和发电成本,并提高电力系统的稳定性和可靠性^[4];可以支持整个电网发展向可再生能源持续发展,实现低碳经济,同时避免不必要的碳排放,促进风电的发展。因此,风电参与电网调频具有重要的意义^[5]。风机发电机参与电网调频后,为保证频率的稳定性,常见的频率控制方法包含下垂控制和虚拟惯量控制。其中下垂控制方法需结合减载法完成,控制步骤较为复杂;虚拟惯性控制是以系统频率变化率作为输入并参与调频,该控制方法在支撑暂态频率控制中应用较为广泛,并且可有效避免频率发生二次跌落。为保证虚拟惯性控制效果,文献[6]为保证频率控制稳定性,避免发生频率二次跌落,利用转矩极限实现虚拟惯量控制的优化,在释放较小动能的情况下,保证频率的响应效果,同时能够利用时变功率恢复风机转速,有效解决频率二次跌落现象;但是该方法在应用过程中,如果风机转速受到影响,则控制结果发生偏差。文献[7]为实现虚拟惯性控制,以风机的频率偏差为依据,对调频增发功率进行调整,以此降低频率跌落速度,实现虚拟惯性控制;但是该方法在应用过程中,没有考虑风速的变化随机性,因此控制

效果存在一定的不稳定性。

模糊PID即为模糊PID控制器,其主要是将PID算法和模糊控制理论相结合的控制理论,形成一种控制器。该控制器在应用过程中^[8],主要是获取PID参数误差和误差变化率之间的模糊关系,并且通过模糊规则实现PID参数的在线调整,使其满足不同误差和误差变化率之间的模糊关系,提升控制准确度^[9]。因此,本文为保证风机并网后虚拟惯性控制效果,在充分考虑风速变化的前提下,研究基于模糊PID的虚拟惯性控制策略。

1 虚拟惯性控制策略

1.1 风机数学模型

为实现虚拟惯性的精准控制,充分掌握风速的变化情况^[10],在控制前需构建风机数学模型,依据该模型分析风速对于虚拟惯性的影响。

风机发电属于一种能量转换过程,其主要是通过风力机捕获风能后对其进行转换的过程。该转换先将风能转换成机械能,再利用发电设备将机械能转换成电能,风电机组的典型结构如图1所示。

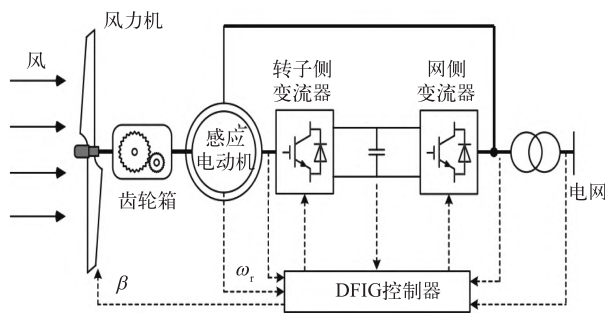


图1 风电机组的典型结构

Fig. 1 Typical structure of wind turbines

风电机组主要由气动模型、传动链模型、感应电机和控制器四个部分组成。

(1) 气动模型

该模型包括气流模型和物体模型两部分。气流模型是基于流体力学基本方程建立的,它用数学方法描述了空气的流动规律,包括气动力分布、速度场及动量分布等^[11]。在建立气流模型

时,需要考虑流体的性质、密度、黏度、速度和压力等因素。通常情况下,空气动力学中的物质流与湍流分离、过渡和湍流等状态直接相关联。因此对于难以解析的情况,可以使用现代流体数值计算方法来解决^[12]。物体模型则是将待研究的某个物体作为一个整体,综合考虑其中各部分特性和作用,对其气动性质进行分析和研究。从物理上来说,气流会对物体表面施加压力,产生变形和运动,同时产生反作用力。其中物体模型的建立和选取对模拟结果的准确度和可靠性有很大影响^[13],因此需要对物体的形状、尺寸、工作状态和所受气流作用力等进行合理建模,以便准确预测模型的性能和运动轨迹。

(2) 传动链模型

风机的传动链指的是从风轮至发电机的传动过程,该过程中主要经过风轮、齿轮箱和发电机转子等部分^[14]。其中齿轮箱的主要作用是实现传动链的划分,使其形成高、低两种速度轴,两种速度轴分别位于电动机侧和风轮侧。风电机组在风能转换过程中不考虑齿轮箱发生的传动损耗以及阻尼。

(3) 感应电动机

感应电动机主要是实现机械能转换的核心,其在发电机完成风能捕获后,受到发电机的拖动下实现能源转换。

(4) 控制器

风机控制在正常情况下,主要采用解耦双环控制,包含内、外两个控制模块。内控制模块也看作为转矩控制,主要以外环给定转矩指令以及电流、电压反馈值为依据,采用转矩直接控制方式进行功率调整,实现风机电磁动态控制;外环控制主要实现风机的机械动态控制,是将风机运行的实时转速、电磁功率结果等作为依据,进行电磁转矩指令的计算,将计算结果作为内环控制参考值,并在特定外控制器的控制下,完成风机机械动态的调整^[15],并完成控制目标。

在运行过程中风力发电机组通过风力机获取风能后,对其进行转换,形成机械能,同时促使感应电动机旋转运行,实现机械能的转换,最终

形成电能^[16]。在该过程中,如果风力机捕获的风能输入机械功率用 P_m 表示,其计算公式为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度; A 为风电机组叶片迎风扫略的面积; v 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数, λ 为叶尖速比, β 为风电机组浆距。

由于风机控制器由两种变流器组成,分别为转子侧和网侧。前者的主要作用是保证直流环节电压稳定性;后者的主要作用是实现风电机组的有功、无功、最大功率点(MPPT)控制以及频率控制^[17]。当风机处于MPPT控制状态下,其给定输出功率指令 P_{MPPT} 的计算公式为

$$P_{MPPT} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \left(\frac{\omega_r R}{\lambda_{opt}} \right) C_{P,max} = k \omega_r \quad (2)$$

式中, λ_{opt} 为风电机组在进行风能捕获时,最优叶尖速比; $C_{P,max}$ 为风能的最大利用系数; ω_r 为风电机组转速; R 为风电机组叶轮半径; k 为风电机组特征参数。

1.2 风速模型

依据上述小结的分析可知,风速对于风电机组运行、输出功率存在直接影响。因此,需构建风速模型,以此分析风速变化特性,为风机虚拟惯性控制提供可靠依据^[18]。

以不同时间尺度下风速变化情况,对湍流风速进行分解,形成两种波动分量,分别为长期波动和短期湍流,用 $\bar{v}$ 和 $\tilde{v}$ 表示,则风速的计算公式为

$$v = \bar{v} + \tilde{v} \quad (3)$$

式中, $\bar{v}$ 主要用于描述在一定时间段内,平均风速结果,可判断风速强弱; $\tilde{v}$ 主要用于描述风速波动情况,其会受到大气运动的影响发生显著变化。

$\tilde{v}$ 对于风电机组来说属于快速变化量,可判断风速的波动范围,即实际风速值偏离平均值的程度,其计算公式为

$$TI = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (4)$$

式中, σ 为风速标准差。

1.3 考虑风速变化的虚拟惯性控制

1.3.1 风机虚拟惯性控制

完成风速建模后，分析风速变化对于虚拟惯性控制的影响，为虚拟惯性控制提供可靠保障。在分析前先分析风机虚拟惯量控制原理^[19]。

风电和电网之间的解耦是依据变流器完成的，风电侧对于系统频率快速变化的感受能力较差，会降低电网等效转动惯量；并且随着风电渗透率的逐渐增加，该影响也会随之增加，直接影响电网的运行安全^[20]。为有效处理风电并网造成的等效转动惯量下降问题，依据转速控制实现风电机组在电网频率发生变化的情况下，形成和同步发电机组惯量响应的特性，即为虚拟惯性控制^[21]。由于风机和电网之间的解耦状态，风轮转速在大范围内会发生改变，因此可通过调整转动速度实现风轮动能的释放，为频率跌落提供可靠依据，降低频率跌落速度^[22]。虚拟惯性控制原理如图2所示。

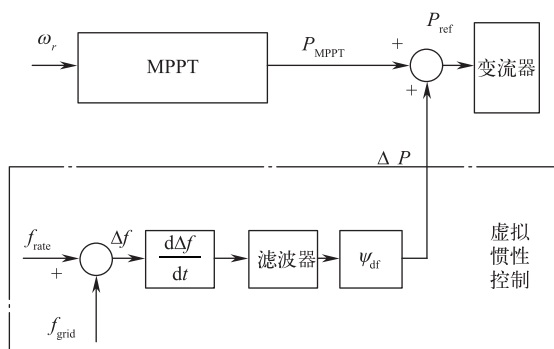


图2 虚拟惯性控制结构图

Fig. 2 Virtual inertial control structure diagram

图2中， Δf 为频率偏差； f_{rate} 为测量频率； f_{grid} 为参考频率。依据虚拟惯性控制原理可知，风机在控制过程中，主要包含两个部分：一是MPPT控制；二是虚拟惯性控制，该控制的主要目的是实现电网频率调节。如果风机输出功率指令用 P_{ref} 表示，其计算公式为

$$P_{\text{ref}} = P_{\text{MPPT}} + \Delta P \quad (5)$$

式中， ΔP 为频率调节给定的附加功率指令，其计算公式为

$$\Delta P = -\psi_{\text{df}} \frac{d\Delta f}{dt} \quad (6)$$

式中， ψ_{df} 为虚拟惯性系数。

依据上述原理可知，如果电网发生有功功率不平衡，会导致电网发生频率偏差，虚拟惯性控制可依据偏差的大小，计算不同的附加功率的参考指令。如果电网频率超过额定标准， ΔP 的结果即为负值，此时风电机组的输出功率下降，风机运行速度上升；如果电网频率低于额定标准， ΔP 的结果即为正值，风电机组输出功率增加，可为功率支撑提供短时间内的支撑，风机运行速度下降^[23]。

1.3.2 风速变化对于虚拟惯性控制的影响

依据虚拟控制原理可知，风机在该控制过程中，通过调整转动速度实现风轮动能的释放或者存储，参与电网频率的调节，风轮动能的释放则取决于风速变化。当风机位于MPPT控制状态时，风机在初始时刻的风轮动能 E_K 计算公式为

$$E_K = \frac{1}{2} J \omega_{r0}^2 \quad (7)$$

式中， J 为风机转动惯量； ω_{r0} 为风机参与电网调频时的初始转速。

风机向电网提供功率支撑时，其转速会下降，由 ω_{r0} 下降至 ω_{r1} ，其中， ω_{r1} 表示电网频率下降至最低时的风机转速。结合风机转速的变化，计算风能释放后提供的有功功率支撑结果，其计算公式为

$$\Delta E_K = \frac{1}{2} J (\omega_{r0}^2 - \omega_{r1}^2) \quad (8)$$

如果风机转速下限用 ω_{min} 表示，在该情况下，风机可释放的动能极限计算公式为

$$\Delta E_{K\text{max}} = \frac{1}{2} J (\omega_{r0}^2 - \omega_{\text{min}}^2) \quad (9)$$

ω_{r0} 的计算公式为

$$\omega_{r0} = \frac{\lambda_{\text{opt}} v_0}{R} \quad (10)$$

式中， v_0 为初始风速。

结合式(9)和式(10)即可获取风机的 $\Delta E_{K\text{max}}$ 和 v_0 关联，其计算公式为

$$\Delta E_{K\max} = \frac{J\lambda_{\text{opt}}v_0^2}{2R^2} - \frac{J\omega_{\min}^2\omega_{\text{rate}}^2}{2} \quad (11)$$

式中, ω_{rate} 为风机额定转速。

依据上述内容确定风机可释放的最大动能量 $\Delta E_{K\max}$ 和初始风速 v_0^2 之间呈正比例关系, 即 v_0^2 越大, 电网频率发生跌落时风机释放的极限动能量越大。因此, 考虑风速变化实现虚拟惯性控制, 是保证风机稳定运行、参与频率调节的有效方式。

1.4 模糊PID控制器

虚拟惯性控制执行过程中, 虚拟惯性系数 ψ_{df} 直接影响该控制器控制效果, 进而影响电网频率的调整效果。如果 v_0 为恒定状态, ψ_{df} 不断增加, 则风机的动能释放量随之增加。因此, 如果虚拟惯性系数 ψ_{df} 过大, 风机动能释放量会超过风机的最大释放动能量, 此时会导致风机退出调频状态, 使电网频率发生显著跌落。为解决该情况, 需在考虑风速变化的情况下, 进行虚拟惯性系数 ψ_{df} 的动态调整。本文依据风速变化情况, 设计模糊PID控制器, 实现虚拟惯性系数 ψ_{df} 的自适应动态调整, 保证风机并网后电网的频率调整效果^[24]。

由于风速的变化直接影响风机的转速, 因此, 可通过风机的转速描述风速的变化。模糊PID控制器在进行虚拟惯性系数 ψ_{df} 的自适应动态调整时, 将风机转速 ω_{r0} 、频率偏差 $e(k)$ 作为输入量, 通过该控制器的自适应整定, 输出虚拟惯性系数 ψ_{df} 的参数结果^[25]。

模糊化是实现输入量转换的重要依据, 在该过程中, 主要是依据被控量偏差的大小完成, 模糊集合通常采用负大、负中、负小、零、正小和正中实现变量的描述, 如果模糊集合 A 是论域 U 上的一个模糊集合, 其计算公式为

$$\mu_A: U = [0,1], u \rightarrow \mu_A(u) \quad (12)$$

式中, μ_A 为 A 的隶属度函数, 代表论域 U 中元素 u 和模糊集合 A 的隶属程度。

如果 $\mu_A(u)=1$, 表示 u 完全隶属于 A ; 如果 $\mu_A(u)=0$, 表示 u 不完全隶属于 A 。

依据上述模糊化处理后可实现输入量的数字

量信号转换, 形成模糊量。该模糊量需通过模糊规则进行判断后形成输出量。模糊规则是基于经验和专家知识构建形成, 在实际应用过程中, 需结合控制误差和控制偏差率完成^[26]。该控制器的输出结果计算公式为

$$\omega(k) = K_p e + \frac{K_i T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k \varepsilon(i) + K_d T_d \frac{\varepsilon(k) - \varepsilon(k-1)}{T_s} \quad (13)$$

式中, $\omega(k)$ 为调整后 k 时刻的风机转速; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为PID控制器的三个控制参数; T_s 、 T_i 、 T_d 分别为时间周期、积分时间常数和微分时间常数。

模糊PID控制器利用模糊化处理对输入量进行数字量信号转换, 形成模糊量, 再将模糊量输入至模糊规则中, 利用模糊规则获取输出量。最后通过反模糊转换将输出量转换成精确量, 传送至执行机构上。该机构则依据输出结果实现虚拟惯性系数 ψ_{df} 的自适应动态调整, 并输出调整结果^[28]。

1.5 模糊PID控制参数优化

模糊PID在应用过程中, 会存在超调以及响应不及时等现象, 还会导致虚拟惯性的控制结果出现超调控制。因此, 本文为保证虚拟惯量控制精准性, 采用粒子群算法对模糊PID参数进行优化, 设计粒子群优化的模糊PID控制器, 控制其整体结构如图3所示^[28]。

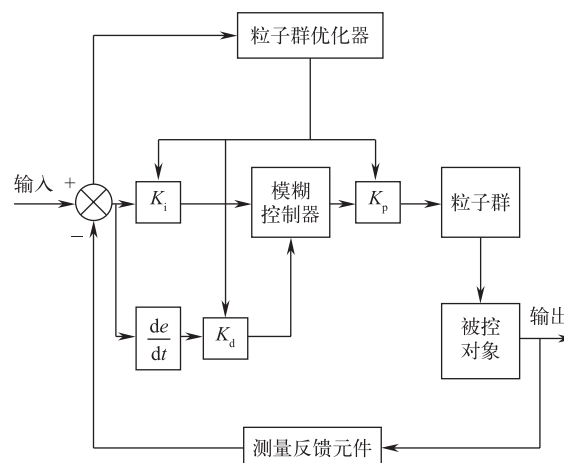


图3 粒子群优化的模糊PID控制器结构

Fig. 3 Fuzzy PID controller structure for particle swarm optimization

该控制器是依据粒子群算法 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数进行迭代寻优，并完成三个参数位置和速度更新，并且在每次迭代后，判断参数的寻优结果是否满足虚拟惯性控制需求。如果满足需求则将风机转速 ω_{r0} 、频率偏差 $e(k)$ 输入 K_i 、 K_d 参数优化后的模糊PID控制器中，输出模糊控制量结果。再依据优化后的 K_p 参数将模糊控制量进行转换，形成PID参数调节增量。

1) 设置算法参数，包含粒子种群大小、最大迭代次数、最大更新速度和学习率等，并对上述参数进行初始化。

2) 计算每一个粒子的适应度，依据适应度计算结果选择其中的优质因子并进行保存，文中选择误差绝对值积分作为适应度函数 f_{ITAE} ，其计算公式为

$$f_{ITAE} = \int_0^{t_k} [t|\varepsilon(t)| + \varphi E(t)] dt \quad (14)$$

式中， t_k 为当前时间； $\varepsilon(t)$ 为给定结果和实际结果之间的偏差； φ 为加权系数； $\varepsilon(t)$ 中的任意值用 $E(t)$ 表示。

3) 对粒子进行循环迭代，并且实现粒子速度、位置信息的更新^[30]。

4) 对当前粒子适应度进行判断，如果优于上一代结果，则进行粒子信息库的更新；反之则保留历史适应度结果。

5) 判断当前迭代是否满足控制系统所需的最优结果，如果达到最大迭代次数或者满足全局粒子最优标准，进入下一步；反之依据亲和力和浓度大小确定的概率完成粒子排序和挑选；同时利用上一代进行微粒群补充，并回转至步骤3。

6) 获取满足控制需求的最优粒子位置对应的模糊PID控制参数，并将通过该参数实现虚拟惯量的控制，同时通过反馈元件将控制结果进行反馈，以此完成虚拟惯量的优化控制，保证电网频率的稳定控制效果，提升风机并网后电网的安全性。迭代过程如图4所示。

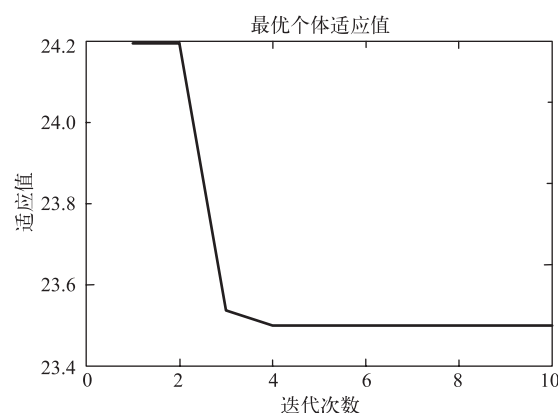


图4 适应值寻优过程

Fig. 4 Fitness value optimization process

2 测试分析

为验证本文策略的应用效果，文中以某地区的发电站的一台风机（型号为WTG3-1500）作为测试对象，该发电站为风机并网结构，风机详细参数见下表。

表 风机详细参数

Tab. Detailed parameters of the fan

参数名称	数值
风机额定功率/kW	1 500
风机额定转速/(r/min)	1 000 ~ 1 800
风机额定电压/V	690
极限风速/(m/s)	56.3
直径/m	70
扫风面积/m ²	3 850
功率因数	0.9 ~ 0.95
防护等级	IP54
绝缘等级	H
风电机组总重量/t	188.4

参数设定：粒子种群规模为10，粒子速度为 $-1 \sim 1$ 之间，位置范围在 $-10 \sim 10$ 之间；学习率取值为0.001； e 和 ec 的比例因子为0.132 4、0.360 5； K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数的量化因子优化结果分别为6.108 0、2.242 8、0。

为验证本文策略考虑风速变化对于虚拟惯性的控制合理性，获取考虑风速变化时虚拟惯性参数的变化结果，如图5所示。

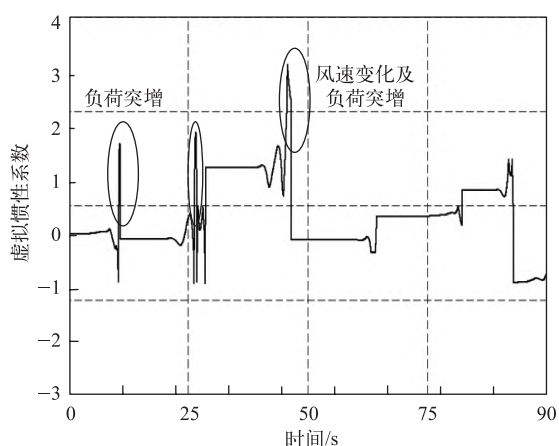


图5 考虑风速变化时虚拟惯性参数的变化结果

Fig. 5 The variation results of virtual inertia parameters considering wind speed changes

对图5测试结果进行分析后得出：风机运行10 s后，发生负荷突增30 kW（5%）情况，虚拟惯性系数结果显著提升。如果风速处于恒定状态，则虚拟惯性系数较小，并且相对较为平稳。因此文中充分考虑风速变化完成虚拟惯性系数调整具有较好的合理性，能够实现该系数随着风速的动态变化进行自适应调整，可保证风机在风速较低的情况下依旧能够可靠参与电网频率调整。即使发生电网频率跌落，风机也可通过释放动能保证有功功率的支撑，以此实现频率调整的稳定性。

为验证本文策略在虚拟惯性控制中的应用效果，获取本文策略应用后随着风速的不断增加，在故障扰动和负荷突变两种工况下，电网频率的控制结果，如图6和图7所示。

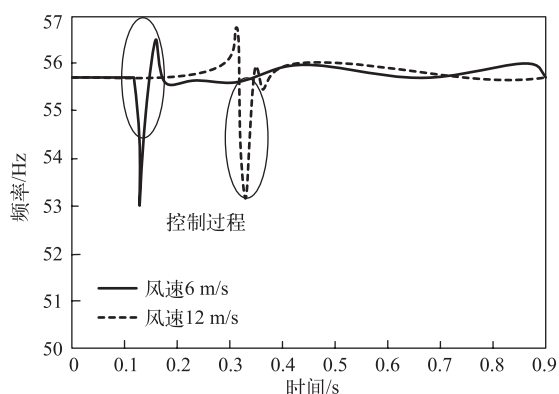


图6 故障扰动工况下电网频率的控制结果

Fig. 6 Control results of power grid frequency under fault disturbance conditions

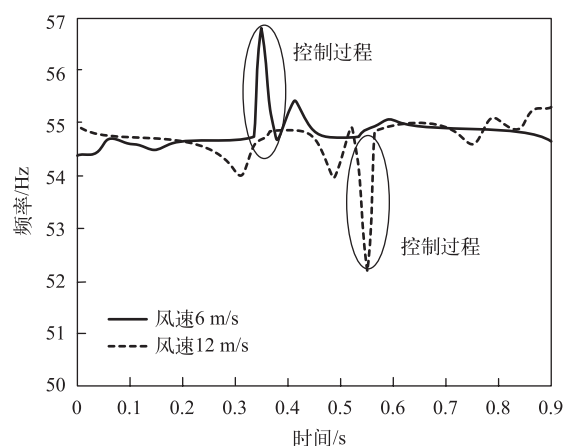


图7 负荷突变工况下电网频率的控制结果

Fig. 7 Control results of power grid frequency under sudden load changes

对图6和图7测试结果进行分析后得出：采用本文策略进行虚拟惯性控制后，在故障扰动和负荷突变两种工况下，电网频率的控制结果较好。本文策略可在0.1 s内快速完成电网频率控制，并且控制后电网的频率相对较为平稳，不存在较大波动。在故障扰动工况下电网频率控制后，其在55~57 Hz范围内变化，波动幅度较小；在负荷突变工况下电网频率控制后，其在54~55.5 Hz范围内变化。因此，本文策略应用性较好，可高效完成不同风速变化下风机虚拟惯性控制，并保证风机稳定、可靠参与频率调节，为保证电网的稳定运行。

3 结束语

本文为保证虚拟惯性的控制准确度，在充分考虑风速变化的前提下，提出基于模糊PID的虚拟惯性控制策略。利用该控制策略选择合理的虚拟惯性控制系数，并对PID控制参数进行寻优，获取最优的控制结果。测试结果表明：

1) 本文的策略使风电场具备一定的惯性响应以及一次调频能力，在高风电渗透率环境下的频率特性更加完善，降低了频率的变化率及其最大偏差。

2) 粒子群优化模糊PID控制是利用了多种控制策略的叠加，弥补了传统风电机组虚拟惯性控制在变化风速以及负荷变化两种干扰下的控制

效果不够好的这一问题。

3) 利用粒子群优化算法,对模糊PID控制的控制参数进行选优,使得该控制在每次不同的工况下都有着良好的控制效果。

4) 粒子群优化模糊PID控制结合虚拟惯性控制的控制策略能够充分考虑风速的变化情况,实现虚拟惯量的控制,并且该控制策略的控制性能较好,显著提升控制响应时间,快速完成电网频率控制。

参考文献

- [1] 卿梦琪,唐飞,刘涤尘,等.基于虚拟惯性的改进短时过载控制策略的研究[J].智慧电力,2021,49(4):30-36.
- [2] 李柏慷,张峰,丁磊.双馈风机参与调频的速度控制器模糊协同控制及参数校正策略[J].电网技术,2022,46(2):596-605.
- [3] 何廷一,王晨光,李胜男,等.云南电网低频问题下风机转子动能控制研究[J].电力建设,2021,42(10):110-118.
- [4] 马欢,杨冬,高志民,等.基于改进虚拟惯量法的双馈风机频率综合控制策略[J].山东大学学报(工学版),2022,52(5):102-110.
- [5] 王秀莲,段悦,高宏伟,等.双馈风机经VSC-HVDC并网的调频控制策略[J].沈阳理工大学学报,2022,41(3):20-26.
- [6] 杨德健,许益恩,金朝阳,等.基于转矩极限的改进风电机组虚拟惯量控制策略[J].太阳能学报,2023,44(2):80-86.
- [7] 王鑫,杨德健,金恩淑,等.双馈风电机的虚拟惯性控制优化策略[J].智慧电力,2022,50(8):1-6,81.
- [8] 李俊,任冲,樊国旗,等.基于模糊控制的高占比风电系统自适应虚拟惯量及调频参数补偿策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(4):55-61.
- [9] 纪泰鹏,赵伟,李永达,等.基于能量函数法的含虚拟惯性控制直驱风电场内部暂态同步稳定性分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(22):38-48.
- [10] 胥心怡,武家辉,姚磊,等.基于协同惯量控制的双馈风机并网系统稳定性分析[J].电力建设,2021,42(12):59-67.
- [11] 高蒙楠,秦文萍,王丽彬,等.基于可释放动能的双馈风机虚拟惯性控制策略影响分析[J].现代电力,2021,38(5):583-591.
- [12] 张祥宇,沈文奇,林毅,等.同步耦合双馈风机的虚拟惯量优化控制技术[J].电网与清洁能源,2022,38(9):126-133.
- [13] 祝贺,许大田,赵浩然,等.双馈风电机组PWM变换器的控制策略及其参数优化[J].东北电力大学学报,2014,34(5):20-26.
- [14] 刘泽宇,赵兴勇,唐震.不同渗透率下风机惯量提升控制研究[J].电气自动化,2022,44(6):13-15.
- [15] 卿梦琪,唐飞,刘涤尘,等.基于虚拟惯性的改进短时过载控制策略的研究[J].智慧电力,2021,49(4):30-36.
- [16] 金睿,金海,莫松楠.基于模糊PID的大型双旋翼无人机研究[J/OL].电子科技:1-8[2023-09-04].
- [17] 管政.模糊PID电液控制对采煤机姿态调整的效果分析[J].机械管理开发,2023,38(8):29-30,33.
- [18] 任乐天,宋超,韩俊杰,等.基于模糊神经网络PID控制的双向DC/DC变换器[J].北华大学学报(自然科学版),2023,24(5):671-677.
- [19] 曹丽珍.基于模糊PID控制实现对通风机调节系统的设计[J].机械管理开发,2023,38(8):198-199+204.
- [20] 李光保,高栋,路勇,等.基于卡尔曼滤波的模糊PID热处理温度控制系统的设计[J].金属热处理,2023,48(8):235-241.
- [21] 施维振.增程式新能源汽车发动机怠速控制模糊PID算法[J].自动化与仪器仪表,2023(8):126-129,134.
- [22] 郭俊宇,孙照桐,谭志勇,等.基于模糊PID的海缆定余量控制研究[J].自动化与仪表,2023,38(8):36-39.

- [23] 戎新萍, 徐海璐, 季春天. 基于解耦的工业机器人模糊PID抑振研究[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(8): 40-45.
- [24] 王椿, 贾磊, 王国辉, 等. 车辆磁流变半主动悬架变论域模糊PID控制[J]. 现代制造工程, 2023(8): 59-65.
- [25] 宋昊举, 李桂琴, 熊焱, 等. 基于Fuzzy-PID的负载敏感挖掘机位姿控制策略[J]. 液压与气动, 2023, 47(8): 50-57.
- [26] 谢鑫, 徐巍, 朱怀志, 等. 基于GA优化的模糊PID控制螺旋给料计量系统[J]. 湖北工业大学学报, 2023, 38(4): 29-33.
- [27] 孙兆丹, 李若冰, 魏爱玲. 模糊PID技术在给煤机自适应控制系统中的应用[J]. 煤炭技术, 2023, 42(8): 226-228.
- [28] 孟岚. 基于模糊PID的矿用电铲多机构协同控制研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(8): 219-221.
- [29] 邓华波, 李宏利, 赵洪瑞. 基于模糊PID的瓦斯抽采负压控制系统设计[J]. 机电产品创新, 2023, 36(4): 25-28.

作者简介

宋宇嘉（1998—），男，硕士研究生，主要研究方向为风电调频控制策略。

王利猛（1971—），男，博士，副教授，主要研究方向为电力系统检测与控制、储能系统在含风电系统电网中的应用及协调控制。

李扬（1980—），男，博士，教授，主要研究方向为综合能源系统建模与优化和电力系统运行分析与控制。

任星（2000—），男，硕士研究生，主要研究方向为风电参与调频的控制。

（收稿日期：2023-11-03）