

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231167

并网变换器虚拟同步无模型参数鲁棒增强控制策略

王天宇¹, 赵晋斌², 潘超¹, 毛玲¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海电力大学海上风电研究院, 上海 200090)

摘要: 随着新型电力系统的发展, 并网变换器已成为能量传输的关键设备。模型预测控制的虚拟同步机参数鲁棒性较低, 当并网参数失配时, 输出电流纹波增大, 同步机功率支撑下降。针对此问题, 提出一种改进的虚拟同步无模型参数鲁棒预测控制方法。首先, 该方法采用四阶 Runge-kutta 优化超局部无模型得到虚拟同步机参数增强鲁棒模型。然后, 采用 Lagrange 插值法求解模型中 K 参数, 通过前 4 个时刻的采样值预测下一时刻的输出。同时设计虚拟惯量无模型自适应预测算法, 实现了惯量动态需求响应。最后, 经过价值函数寻优比较得到虚拟同步机的优化电压矢量, 实现参数鲁棒增强控制。实验结果表明, 所提出的控制策略在参数失配情况下功率支撑能力稳定, 频率波动时虚拟惯量能够动态响应, 具有良好的稳态和动态响应性能。

关键词: 并网变换器; 无模型预测控制; 参数失配; Runge-kutta

Robust enhanced control strategy of a virtual synchronous grid-connected inverter with model-free parameters

WANG Tianyu¹, ZHAO Jinbin², PAN Chao¹, MAO Ling¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Offshore Wind Power Research Institute, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: With the development of new power systems, grid-connected converters have become key pieces of equipment for energy transmission. The virtual synchronous machine parameters of model predictive control have low robustness, and when the parameters are mismatched, the output current ripple increases, and the synchronous machine power support decreases. To address this issue, an improved virtual synchronous model-free parameter robust predictive control method is proposed. This method first uses a fourth-order Runge-Kutta optimization super-local model-free method to obtain a robust model that enhances the virtual synchronous machine parameters. Then, the Lagrange interpolation method is used to solve the K parameter in the model, and the output for the next moment is predicted using the sampling values from the previous four moments. Also, a virtual inertia model-free adaptive prediction algorithm is designed to achieve dynamic response to inertia dynamic demand. Finally, the optimal voltage vector for virtual synchronous machines is obtained by optimizing the value function, achieving robust parameter-enhanced control. Experimental results show that the proposed control strategy has stable power support capability under parameter mismatch, and the virtual inertia can dynamically respond to frequency fluctuations, with good steady-state and dynamic response performance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177184).

Key words: grid-connected inverter; model-free predictive control; parameter mismatch; Runge-Kutta

0 引言

随着风电、光伏等新能源的快速发展, 并网变换器作为新型电力系统的重要设备, 主要用于新能源并入电网^[1-2]。由于风电、光伏等新能源出力的随

机性、不稳定性以及变换器缺乏传统电机所具有的惯性和阻尼, 严重影响了电网的稳定性和电能质量, 导致电力系统低惯量、抗干扰能力弱等问题^[3-4]。为改善变换器动态性能及主动支撑能力, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)已成为学术界关注的重点^[5-6]。VSG 技术通过配置储能单元, 引入惯性及阻尼来增强变换器性能, 从而使其具备

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177184)

同步发电机运行特性^[7-8]。基于 VSG 控制的并网变换器不仅可以在电网电压频率下降时提供有功功率支持, 还可以在电压下降的情况下提供无功功率支持, 并为电网的运行提供类似于传统同步发电机的惯性支撑^[9]。

传统变换器采用基于比例积分 (proportional integral, PI) 控制的线性控制方法, 外环用于参考跟踪, 内环用于抑制干扰和提高稳定性, 具有简单、易实现等优点, 然而模型解耦复杂, PI 控制器最优参数设计困难等问题严重制约线性控制^[10-12]。此外, PI 控制器的输出需要额外的调制模块产生驱动功率器件的脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 信号, 不利于简化控制和提升计算效率^[13-15]。为了减少开关损耗, 通常将功率器件的平均开关频率限制在低开关频率。在低开关频率情况下, 传统控制方法 (如 PI 控制), 会出现严重的性能退化, 因此需要采用新型的控制方法来解决这个问题。随着微处理器技术的进步, 有限集模型预测控制 (finite control set model predictive control, FCSMPC) 成为替代 PI 控制的一种选择^[16]。

FCSMPC 具有响应速度快、无需调制模块、容易实现多目标控制等优点^[17-19]。FCSMPC 利用有限的电压矢量集合, 以预测受控变量的未来状态, 通过最小化成本函数来选择最佳电压矢量^[20]。基于 FCSMPC 的变换器, 其输出性能很大程度上取决于变换器建模的准确性, 然而实际模型在运行过程中可能受到多种不确定因素的影响, 如建模参数不准确或者建模参数发生变化, 变换器并网性能将显著下降^[21-23]。

文献[21]分析了模型参数失配对预测误差的影响, 并提出一种旨在分析模型参数不确定性对电流控制预测误差影响的方法。该方法专注于研究电路参数 R 、 L 在失配时对 FCSMPC 稳态精度和动态性能产生的影响。文献[24]提出一种基于电流环的鲁棒定频 FCSMPC 方法, 该方法显著增强了系统的鲁棒性。然而, 这种方法在扰动观测器的设计方面存在一定的困难, 难以实现精确的设计。文献[25]提出一种将模型参数不匹配视为系统扰动量的方法, 该方法利用 Luenberger 观测器和前馈补偿技术来消除系统扰动, 但仅适用于定频的模型预测控制中参数不匹配的问题, 并不适用于 FCSMPC。文献[26]采用了扩展状态观测器来估计实际扰动, 并利用前馈补偿来消除扰动的影响。然而, 这种控制结构复杂且计算时间长, 并在一定程度上增加了对控制系统性能的要求。

为了解决 FCSMPC 对于电路参数的敏感性, 无

模型预测控制 (model-free predictive control, MFPC) 得到了广泛的关注^[27-29]。无模型预测控制主要分为完全的无模型、超局部无模型和预测矫正模型三类, 完全的无模型预测通过使用系统以前的输入和输出数据来进行, 需要通过查表来预测控制; 超局部模型通常包含一个或多个不确定项, 通过控制系统的输入和输出数据不断地进行估计, 不需要查表; 预测矫正模型需要控制系统的输入和输出来补偿预测误差。文献[30]提出了无模型控制理论, 该理论使用超局部模型来代替传统变换器数学模型, 可大大降低参数变化对系统的影响。常规的超局部无模型预测控制需要 5 个或更多的输入输出数据用于计算模型中的集总扰动, 这不仅会影响动态响应速度, 还会占用大量存储空间^[31-32]。

本文提出一种基于 MFPC 的并网变换器主动支撑并网控制策略。该策略采用改进龙格-库塔算法, 并基于四点差值计算求解斜率 K , 有效解决了变换器数学模型待求问题。同时, 增强系统的鲁棒性, 在参数失配的情况下, 仍具有良好的并网性能。本文首先对模型预测控制策略展开阐述, 其次对改进的无模型虚拟同步机控制策略展开分析, 分析参数扰动对模型的影响, 建立变换器数学模型, 通过龙格库塔对模型参数进行求解, 预测下一时刻的电流值和虚拟惯量, 结合虚拟同步机控制策略, 实现对电网频率的有效支撑。最后, 通过实验验证了所提方法的有效性。

1 并网变换器模型预测控制策略

模型预测控制在一个采样周期内, 根据被控对象的状态进行建模, 在线求解有限开关函数组合中的最优解, 将得到的控制量作用于被控对象。

本文将两电平并网变换器作为研究对象, 其拓扑结果如图 1 所示。图中: U_{dc} 为直流侧电压源; L 为滤波电感; R 为交流侧等效电阻; e_g 为电网电压, n 为三相电网电压中性点。

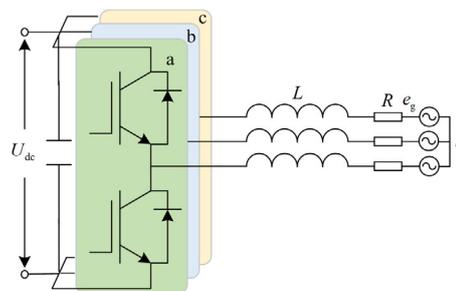


图 1 两电平三相并网变换器拓扑结构

Fig. 1 Two-level three-phase grid-connected inverter topology

两电平并网变换器在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} i_\alpha = u_\alpha - e_\alpha - R i_\alpha \\ L \frac{d}{dt} i_\beta = u_\beta - e_\beta - R i_\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_α 、 i_β 均为变换器输出电流; u_α 、 u_β 均为变换器输出电压矢量; e_α 、 e_β 分别为电网电压在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的分量。

将式(1)进行离散化, 整理可得第 $k+1$ 个周期变换器输出电流值为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \end{bmatrix} = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} u_\alpha(k) - e_\alpha(k) \\ u_\beta(k) - e_\beta(k) \end{bmatrix} + \left(1 - \frac{RT}{L}\right) \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $i_\alpha(k+1)$ 、 $i_\beta(k+1)$ 分别为第 $k+1$ 个采样周期在 $\alpha\beta$ 坐标系下的预测电流值; T 为信号采样周期; $u_\alpha(k)$ 、 $u_\beta(k)$ 分别为第 k 个采样周期变流器输出电压矢量在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量; $e_\alpha(k)$ 、 $e_\beta(k)$ 分别为第 k 个采样周期电网电压在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量; $i_\alpha(k)$ 、 $i_\beta(k)$ 分别为第 k 个采样周期并网电流在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量。

图 2 为模型预测控制框图。 i_{abc} 和 e_{abc} 分别为三相电网电流和三相电网电压, i_α^* 和 i_β^* 为两相旋转坐标系下电流的给定值。电网电流和电网电压经过 Clark 坐标变换得到 $e_\alpha(k)$ 、 $e_\beta(k)$ 、 $i_\alpha(k)$ 、 $i_\beta(k)$ 。两电平变换器由 3 个桥臂组成, 每个桥臂有两种开关状态, 最多组成 8 种开关状态, 将 8 种开关状态对应的 $u_\alpha(k+1)$ 、 $u_\beta(k+1)$ 依次代入预测模型式(2), 得到 $i_\alpha(k+1)$ 、 $i_\beta(k+1)$, 为了最大限度地跟随给定信号运行, 要保证给定电流值与预测值之间的差值最小, 设计代价函数 g 如式(3)所示。

$$g = |i_\alpha^* - i_\alpha(k+1)| + |i_\beta^* - i_\beta(k+1)| \quad (3)$$

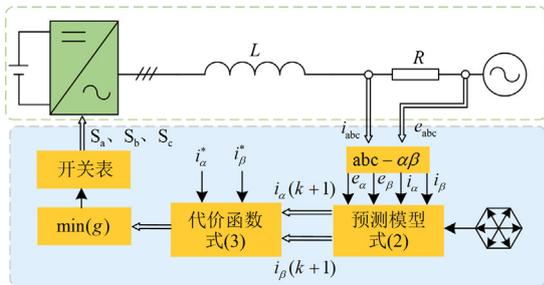


图 2 并网变换器模型预测控制框图

Fig. 2 Block diagram of grid-connected inverter model predictive control

选择代价函数最小的电压矢量作用到变换器控制, 根据电压矢量和变换器开关的关系输出开关信号 S_a 、 S_b 、 S_c , 达到跟踪给定电流的目标。

2 改进的无模型参数鲁棒虚拟同步控制

在上述 MPC 方法中, 控制性能很大程度上取决于参数的准确性, 当参数发生变化时, 预测模型的参数和实际参数不匹配, 会导致输出电流质量下降。

当电感或者电阻参数发生扰动时, 式(1)改写为

$$\begin{cases} (L + \Delta L) \frac{d}{dt} i_\alpha = u_\alpha - e_\alpha - (R + \Delta R) i_\alpha \\ (L + \Delta L) \frac{d}{dt} i_\beta = u_\beta - e_\beta - (R + \Delta R) i_\beta \end{cases} \quad (4)$$

式中: ΔL 为电感扰动量; ΔR 为电阻扰动量。

进一步可以给出系统的超局部模型, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_\alpha = \frac{u_\alpha}{(L + \Delta L)} - \frac{e_\alpha + (R + \Delta R) i_\alpha}{(L + \Delta L)} \\ \frac{d}{dt} i_\beta = \frac{u_\beta}{(L + \Delta L)} - \frac{e_\beta + (R + \Delta R) i_\beta}{(L + \Delta L)} \end{cases} \quad (5)$$

将 $\alpha\beta$ 静止坐标系下变换器端口输出电压 u_α 、 u_β 作为变换器系统的输入, 将 $\alpha\beta$ 静止坐标系下变换器输出电流 i_α 、 i_β 的导数作为系统的输出, 建立变换器模型, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_\alpha = F_\alpha + a_\alpha u_\alpha \\ \frac{d}{dt} i_\beta = F_\beta + a_\beta u_\beta \end{cases} \quad (6)$$

式中: a_α 、 a_β 为系统的电压比例因子, 通常取 $1/L$; F_α 、 F_β 分别表示已知和未知的扰动量在 α 轴和 β 轴上的分量, 是个待求的函数。当电感参数发生变化时, 误差可以由 F_α 、 F_β 进行补偿, 下面主要讨论如何不使用电路参数的情况下求解 F_α 、 F_β 。

式(6)左边的微分项可以用四阶四段龙格库塔表示, 可以得到

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_\alpha = \frac{i_\alpha(k+h) - i_\alpha(k)}{h} = \frac{1}{6}(K_{1\alpha} + 2K_{2\alpha} + 2K_{3\alpha} + K_{4\alpha}) \\ \frac{d}{dt} i_\beta = \frac{i_\beta(k+h) - i_\beta(k)}{h} = \frac{1}{6}(K_{1\beta} + 2K_{2\beta} + 2K_{3\beta} + K_{4\beta}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: h 为步长; $K_{1\alpha}$ 、 $K_{1\beta}$ 分别表示 K_1 在 α 、 β 轴

上的分量; $K_{2\alpha}$ 、 $K_{2\beta}$ 分别表示 K_2 在 α 、 β 轴上的分量; $K_{3\alpha}$ 、 $K_{3\beta}$ 分别表示 K_3 在 α 、 β 轴上的分量; $K_{4\alpha}$ 、 $K_{4\beta}$ 分别表示 K_4 在 α 、 β 轴上的分量, K_1 — K_4 为斜率。设 $\frac{d}{dt}i_\alpha = f_\alpha(x, y)$ 、 $\frac{d}{dt}i_\beta = f_\beta(x, y)$ 为待求函数, $K_1 = f(x_k, y_k)$ 为时间段开始时的斜率, $K_2 = f(x_k + h/2, y_k + K_1/2)$ 为时间段中点的斜率, 通过欧拉法用斜率 K_1 来决定在点 $x_k + h/2$ 的值, $K_3 = f(x_k + h/2, y_k + K_2/2)$ 为中点的斜率, 采用斜率 K_2 决定 y 值, $K_4 = f(x_k + h, y_k + K_3)$ 为时间段终点的斜率, 其 y 值由 K_3 决定。由于 $f(x, y)$ 是待求函数, 传统的龙格-库塔求解 K 变量方法失效, 提出采用四点差值求微分计算 K 变量。

如图 3 所示, 从 $(k-3h_1)$ 时刻, 每隔 h_1 的步长对电流值进行采样, 记作 $I(k)$ 、 $I(k-h_1)$ 、 $I(k-2h_1)$ 、 $I(k-3h_1)$, 根据拉格朗日三次差值, 由式(8)求得 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 的值。

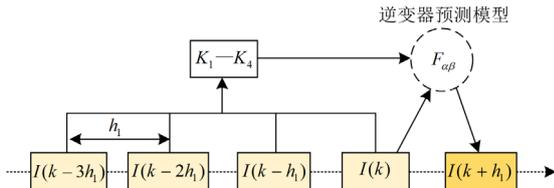

 图 3 F_α 、 F_β 求解示意图

 Fig. 3 Schematic diagram of the F_α and F_β solution

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{h_1} \begin{bmatrix} -\frac{11}{6} & 3 & -\frac{3}{2} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{3}{2} & -3 & \frac{11}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(k-3h_1) \\ I(k-2h_1) \\ I(k-h_1) \\ I(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(7)代入式(6), 则变换器扰动分量 F_α 、 F_β 的模型为

$$\begin{cases} F_\alpha = \frac{1}{6}(K_{1\alpha} + 2K_{2\alpha} + 2K_{3\alpha} + K_{4\alpha}) - a_\alpha u_\alpha \\ F_\beta = \frac{1}{6}(K_{1\beta} + 2K_{2\beta} + 2K_{3\beta} + K_{4\beta}) - a_\beta u_\beta \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9)可以求解得到 F_α 、 F_β 的值。采用一阶欧拉离散化的方法将式(6)进行离散化, 得到

$$\begin{cases} i_\alpha(k+1) = (F_\alpha + a_\alpha u_\alpha)T + i_\alpha(k) \\ i_\beta(k+1) = (F_\beta + a_\beta u_\beta)T + i_\beta(k) \end{cases} \quad (10)$$

设计代价函数同式(3)。

MPC 是基于离散化的数学模型进行单步或多步的预测, 通过代价函数的最优值挑选最优的电压矢量。改进的无模型预测控制如图 4 所示, 根据 $I(k)$ 、 $I(k-h_1)$ 、 $I(k-2h_1)$ 、 $I(k-3h_1)$ 计算出 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 , 求出变换器扰动分量模型 $F_{\alpha\beta}$, 建立变换器端口输出电压 u_α 、 u_β 和变换器输出电流 i_α 、 i_β 的非线性关系, 将逆变器电压矢量依次代入, 使代价函数最小, 确定作用的目标矢量, 实现变换器控制。控制过程中不需要变换器的电感和电阻参数, 当电感参数发生变化时, 误差可以由 F_α 、 F_β 进行补偿, 克服了模型预测控制对参数的依赖问题。

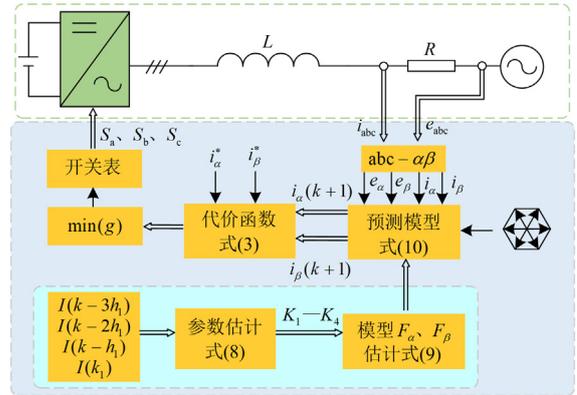


图 4 改进的无模型预测控制框图

Fig. 4 Block diagram of improved model-free predictive control

将虚拟同步控制的输出电流作为无模型预测控制的电流给定值, 可以实现基于无模型预测的虚拟同步控制。改进的无模型预测虚拟同步机控制框图如图 5 所示。

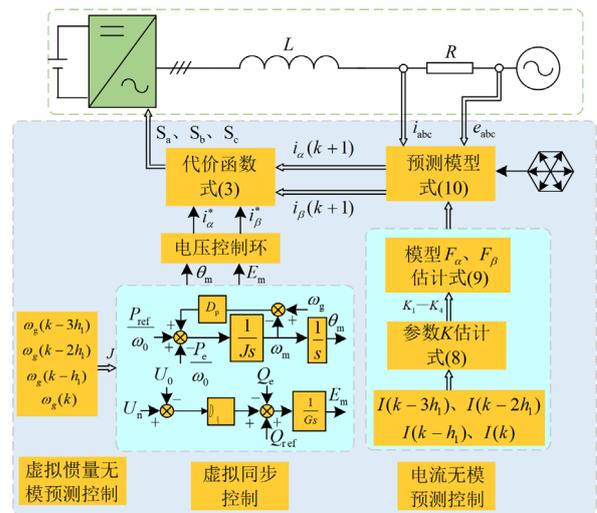


图 5 改进的无模型预测虚拟同步机控制框图

Fig. 5 Block diagram of improved model-free prediction virtual synchronous machine control

改进的模型预测虚拟同步机控制主要分为虚拟同步控制、电流无模型预测控制和虚拟惯量无模型预测控制。其中： $\omega_g(k-3h_1)$ 、 $\omega_g(k-2h_1)$ 、 $\omega_g(k-h_1)$ 、 $\omega_g(k)$ 分别为电网角频率前4个时刻的值； P_{ref} 和 P_c 分别为有功功率参考值和瞬时有功功率； Q_{ref} 和 Q_c 分别为无功功率参考值和瞬时无功功率； J 为虚拟惯量； D_p 和 D_q 分别为有功功率阻尼系数和无功功率下垂系数； ω_m 和 ω_0 分别为VSG机械角频率和电网额定角频率； ω_g 为电网的角频率； U_n 和 U_0 分别为额定电压和输出电压； G 为调压系数； θ_m 为VSG的电角度； E_m 为VSG输出的内电势。

由图5可得有功控制环和无功控制环的方程，分别如式(11)和式(12)所示。

$$J \frac{d(\omega_g - \omega_m)}{dt} = \frac{P_{ref}}{\omega_0} - \frac{P_c}{\omega_0} + D_p(\omega_g - \omega_m) \quad (11)$$

$$K \frac{dE_m}{dt} = Q_{ref} - Q_c + D_q(U_n - U_0) \quad (12)$$

VSG的机械方程实现了传统电力系统中调速器的功率-频率调节功能，用于调节变换器的电磁功率输出。转动惯量和阻尼项在储能的支持下为变换器提供了惯性和阻尼。在同步发电机中，这些特性由机械转轴和绕组提供。虚拟惯性和阻尼是VSG的核心，它们模拟了同步发电机的运行机理。结合无模型预测原理，根据式(8)和式(9)对虚拟惯量进行无模型预测控制，可得虚拟惯量 J 表达式为

$$J = \frac{h_1(J_1 + 2J_2 + 2J_3 + J_4)}{6} \quad (13)$$

式中， J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 为四阶四段龙格库塔的斜率系数，由式(14)可得。

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{h_1} \begin{bmatrix} -\frac{11}{6} & 3 & -\frac{3}{2} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{3}{2} & -3 & \frac{11}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_g(k-3h_1) \\ \omega_g(k-2h_1) \\ \omega_g(k-h_1) \\ \omega_g(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

采用无模型预测控制的虚拟惯量能够提高系统调频的动态响应能力。有功控制环和无功控制环根据给定的功率指令和瞬时功率值动态地输出电压幅值和相位，经过电压控制环输出电流给定值 i_α^* 和 i_β^* ，根据代价函数式(3)达到跟踪电流给定值的目标。

所提出的基于无模型预测的VSG控制策略，具有较强的参数鲁棒性，无需对系统进行建模，在系统参数发生变化的情况下，仍能够跟踪给定电流。因为不需要模型参数，控制算法具有拓展性，可以快速适用于不同变换器的控制。

3 实验验证

为了验证本文所提方法的有效性，基于MYWAY TYPHOON 404搭建实验平台，实验平台如图6所示，实验参数如表1所示。

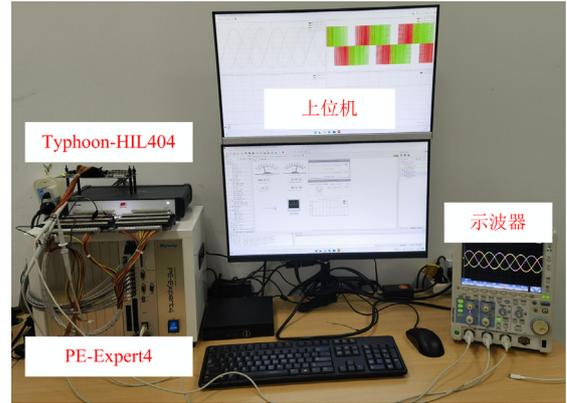


图6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

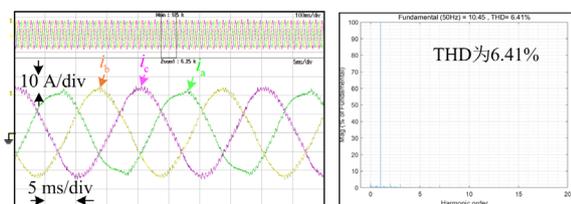
表1 系统实验参数

Table 1 Experimental parameters of the system

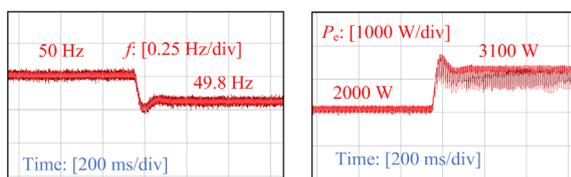
参数	数值
直流母线电压 U_{dc}/V	400
电网频率 f/Hz	50
电网电压 e_g/V	80
滤波电感 L_0/mH	10
有功功率参考值 P_c/W	2000
无功功率参考值 Q_c/var	1000
采样频率 f_s/kHz	10
虚拟惯量 J	0.1
有功功率阻尼系数 D_p	20

为比较模型预测控制和本文所提方法在参数不匹配情况下的性能差异，通过改变实际电路中的电感参数，比较两种方法的输出电流波形。图7和图8分别为电感参数变化时，MPC和所提MFPC方法的输出电流、有功调频和无功调压情况，电感参数从10 mH变为12 mH，电感变化量 $\Delta L = 2mH$ 。比较图7(a)和图8(a)可知，在电感参数失配时，所提方法具有更好的电流跟踪能力和更低的THD；比较图7(b)和图8(b)可知，在电感参数失配、频率发生波动时，模型预测控制虚拟同步机(model predictive

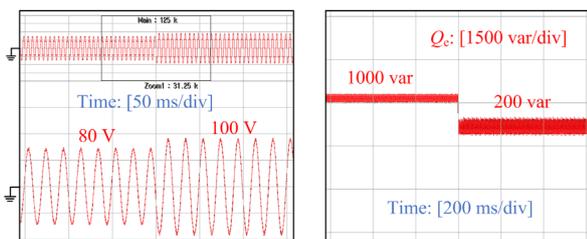
control virtual synchronous generator, MPC-VSG)的有功功率有较大波动, 本文所提方法有功功率波动较小; 比较图 7(c)和图 8(c)可知, 在电感参数失配, 电网电压发生波动时, MPC-VSG 的无功功率有较大波动, 本文所提方法无功功率波动较小, 这进一步说明了所提方法具有较强的鲁棒性。



(a) 电流波形



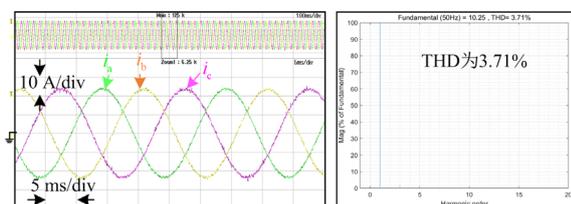
(b) 频率下降, 有功功率变化情况



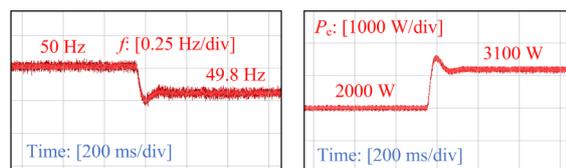
(c) 电压上升, 无功功率变化情况

图 7 电感扰动情况下, MPC-VSG 电流波形、有功调频、无功调压情况

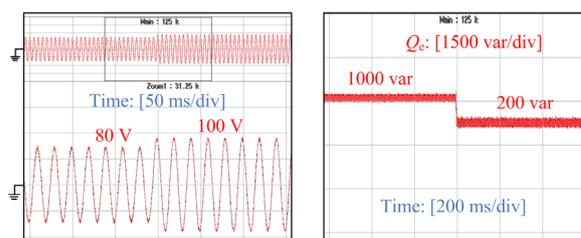
Fig. 7 MPC-VSG current waveform, active frequency regulation, reactive voltage regulation with inductance disturbance



(a) 电流波形



(b) 频率下降, 有功功率变化情况

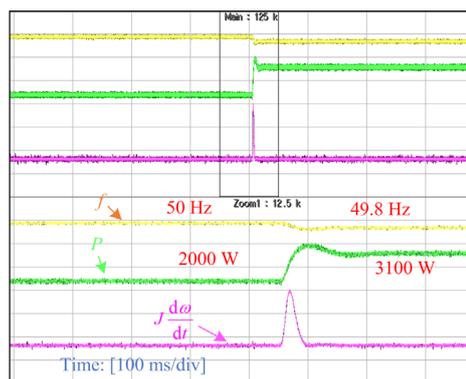


(c) 电压上升, 无功功率变化情况

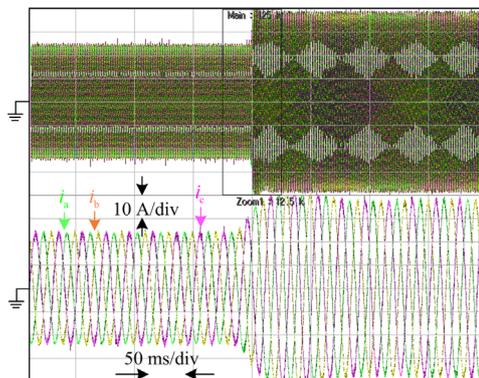
图 8 电感扰动情况下, 本文所提方法电流波形、有功调频、无功调压情况

Fig. 8 Current waveform, active frequency regulation, reactive voltage regulation of the proposed method with inductance disturbance

为验证本文所提虚拟惯量无模型预测控制的有效性, 设 $L = 10 \text{ mH}$, 改变电网频率, 观察有功响应和惯量响应。如图 9 所示, 电网频率从 50 Hz 下降到 49.8 Hz, 虚拟惯量跟随频率变化波动进行响应, 动态自适应调整 J 值, 有功功率随即快速上升, 惯量支撑达最大值, 如图 9(a)所示, 即位于有功功



(a) 频率、有功功率、虚拟惯量变化情况

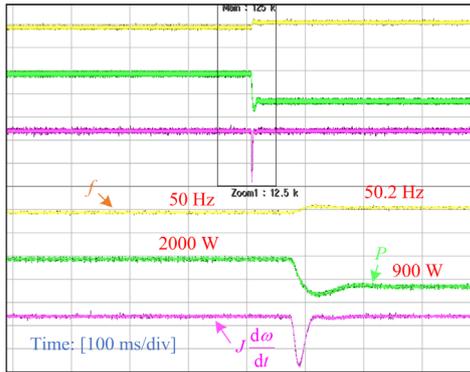


(b) 三相电流波形

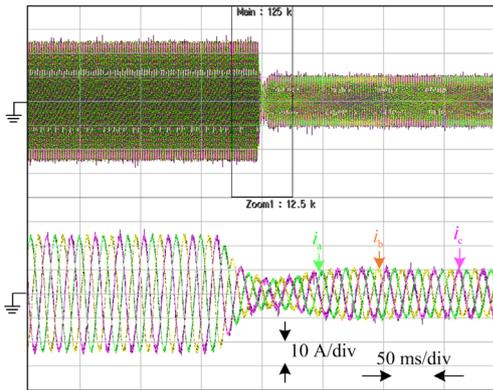
图 9 频率下降, 有功功率、虚拟惯量、三相电流变化情况

Fig. 9 Variation of active power, virtual inertia, three-phase current with frequency drop

率变化率最大点。随后惯量减小，有功功率变化减缓，直到频率稳定后，虚拟惯量变为常数。三相电流也随之动态变化。如图 10 所示，电网频率从 50 Hz 上升到 50.2 Hz，虚拟惯量跟随频率变化波动进行响应，动态自适应调整 J 值，有功功率随即快速下降，进一步说明所提虚拟惯量无模型预测控制可以根据频率需求，进行动态调节，并具有良好的支撑效果。



(a) 频率、有功功率、虚拟惯量变化情况



(b) 三相电流波形

图 10 频率上升，有功功率、虚拟惯量、三相电流变化情况

Fig. 10 Variation of active power, virtual inertia, three-phase current with frequency rise

4 结论

本文针对模型预测虚拟同步机参数鲁棒性差的问题，提出了一种改进的无模型虚拟同步参数鲁棒预测控制方法。首先无模型改进的预测虚拟同步机控制，通过四阶龙格库塔求解扰动分量，较常规的超局部无模型，仅用前 4 个时刻的采样值得到下一时刻的预测值，减小输出误差，增强了参数鲁棒性。然后提出基于无模型预测的虚拟惯量自适应控制策略，通过动态调整转动惯量值，能够及时响应系统的惯量需求，增强虚拟机的动态支撑能力。最后实验结果表明，在参数不匹配情况下，频率发生

波动时所提方法比模型预测虚拟同步机有着更小的有功和无功功率波动；同时虚拟惯量会跟随频率变化动态调整，自适应响应性能较好。

参考文献

[1] 李可雨, 王峰, 贾红云, 等. 基于光伏逆变器的快速功率控制系统研究及应用[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 241-247.
LI Keyu, WANG Feng, JIA Hongyun, et al. Research and application of rapid power control system based on photovoltaic inverter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 241-247.

[2] 李林晏, 韩爽, 乔延辉, 等. 面向高比例新能源并网场景的风光-电动车协同调度方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(5): 554-563.
LI Linyan, HAN Shuang, QIAO Yanhui, et al. A wind-solar-electric vehicles coordination scheduling method for high proportion new energy grid-connected scenarios[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(5): 554-563.

[3] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 484-491.
XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.

[4] 李雨果, 易皓, 姜鑫, 等. 极弱电网下新能源跟网变流器低频振荡的机理探究与暂态无功过补稳定性提升策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 482-496.
LI Yuguo, YI Hao, JIANG Xin, et al. Mechanism researching on low-frequency resonance of renewable-energy grid-following inverters under very weak grid and the stability-improving strategy based on dynamic reactive power over compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 482-496.

[5] 于晶荣, 孙文, 于佳琪, 等. 基于惯性自适应的并网变流器虚拟同步发电机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 137-144.
YU Jingrong, SUN Wen, YU Jiaqi, et al. Virtual synchronous generator control of a grid-connected inverter based on adaptive inertia[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 137-144.

[6] ELWAKIL M M, ZOGHABY H M E, SHARAF S M, et al. Adaptive virtual synchronous generator control using optimized Bang-Bang for islanded microgrid stability improvement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 953-973.

- [7] LI C, YANG Y, CAO Y, et al. Grid inertia and damping support enabled by proposed virtual inductance control for grid-forming virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 294-303.
- [8] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
- CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [9] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-360.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [10] 边志维, 何远彬, 吴圆圆, 等. 一种提高LCL型并网变换器无源性及抗扰性的网侧电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2175-2186.
- BIAN Zhiwei, HE Yuanbin, WU Yuanyuan, et al. An injected current control strategy for passivity enhancement and disturbance rejection of LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2175-2186.
- [11] 赵清林, 郭小强, 邬伟扬. 单相变换器并网控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 60-64.
- ZHAO Qinglin, GUO Xiaoqiang, WU Weiyang. Research on control strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 60-64.
- [12] 郭小龙, 张江飞, 亢朋朋, 等. 含基于PI控制受端二次调频的特高压直流虚拟同步控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 66-72.
- GUO Xiaolong, ZHANG Jiangfei, KANG Pengpeng, et al. Virtual synchronization control strategy for UHVDC with secondary frequency modulation based on PI control[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 66-72.
- [13] 杨嘉伟, 易杨, 姜浩, 等. 基于随机载波脉冲宽度调制的变换器群超高次谐波抑制机理[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 160-167.
- YANG Jiawei, YI Yan, JIANG Hao, et al. Principle of Supraharmonic elimination based on random carrier sinusoidal pulse width modulation for converter clusters[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 160-167.
- [14] 朱文杰, 许赢, 李云飞, 等. 三相三电平变换器输出电压谐波抑制控制研究[J]. 电工技术, 2023(6): 130-133.
- ZHU Wenjie, XU Ying, LI Yunfei, et al. Research on harmonic suppression control of output voltage of three-phase three-level inverter[J]. Electric Engineering, 2023(6): 130-133.
- [15] 刘志坚, 刘杰, 李鹏程, 等. 基于虚拟电阻的双馈风机次同步振荡分数阶PI控制[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 12-20.
- LIU Zhijian, LIU Jie, LI Pengcheng, et al. Virtual resistance-based fractional-order PI control strategy for sub-synchronous oscillation in doubly-fed wind turbines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 12-20.
- [16] 孙佳航, 王小华, 黄景光, 等. 基于MPC-VSG的孤岛微电网频率和电压动态稳定控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 51-60, 81.
- SUN Jiahang, WANG Xiaohua, HUANG Jingguang, et al. MPC-VSG based control strategy for dynamic stability of frequency and voltage in islanded microgrid[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 51-60, 81.
- [17] VAZQUEZ S, RODRIGUEZ J, RIVERA M, et al. Model predictive control for power converters and drives: advances and trends[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 935-947.
- [18] DRAGIČEVIĆ T. Model predictive control of power converters for robust and fast operation of AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 6304-6317.
- [19] 程俊, 肖先勇, 马俊鹏, 等. 三相储能型准Z源并网变换器有限开关序列模型预测直接功率控制[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1647-1655.
- CHENG Jun, XIAO Xianyong, MA Junpeng, et al. Finite switching sequence model predictive direct power control of a three-phase energy-stored quasi-Z-source grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1647-1655.
- [20] 陆治国, 王友, 廖一茜. 基于光伏并网变换器的一种矢量角补偿法有限控制集模型预测控制研究[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 548-554.
- LU Zhiguo, WANG You, LIAO Yixi. A vector angle compensation method study of finite control set model predictive control based on photovoltaic (PV) grid inverter[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 548-554.
- [21] YOUNG H A, PEREZ M A, RODRIGUEZ J. Analysis of finite-control-set model predictive current control with model parameter mismatch in a three-phase inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3100-3107.
- [22] 席裕庚, 李德伟, 林妹. 模型预测控制—现状与挑战

- [J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
- XI Yugeng, LI Dewei, LIN Shu. Model predictive control—status and challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.
- [23] 郭磊磊, 郑铭哲, 李琰琰, 等. 三相LCL并网变换器无参数滑模预测控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 72-82.
- GUO Leilei, ZHENG Mingzhe, LI Yanyan, et al. Nonparametric sliding mode predictive control strategy for a three-phase LCL grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 72-82.
- [24] GUO X, REN H P, LI J. Robust model-predictive control for a compound active-clamp three-phase soft-switching PFC converter under unbalanced grid condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2156-2166.
- [25] XIA C, WANG M, SONG Z, et al. Robust model predictive current control of three-phase voltage source PWM rectifier with online disturbance observation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(3): 459-471.
- [26] LIU H, LI S. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1171-1183.
- [27] 尹政, 胡存刚, 芮涛, 等. 一种改进的电压源变换器无模型预测控制方法[J]. 电力电子技术, 2022, 56(6): 53-56.
- YIN Zheng, HU Cungang, RUI Tao, et al. An improved model-free predictive control method for voltage source inverter[J]. Power Electronics, 2022, 56(6): 53-56.
- [28] WU W, QIU L, LIU X, et al. Data-driven iterative learning predictive control for power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 14028-14033.
- [29] 朱敏龙, 宋慧庆, 李宇航, 等. NPC型三电平变换器可视化三矢量无模型预测控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 110-122.
- ZHU Minlong, SONG Huiqing, LI Yuhang, et al. Visualized three-vector model-free predictive control strategy for an NPC three-level inverter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 110-122.
- [30] FLIESS M, JOIN C. Model-free control[J]. International Journal of Control, 2013, 86(12): 2228-2252.
- [31] WANG Y, LI H, LIU R, et al. Modulated model-free predictive control with minimum switching losses for PMSM drive system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 20942-20953.
- [32] ZHANG Y, JIANG T, JIAO J. Model-free predictive current control of a DFIG using an ultra-local model for grid synchronization and power regulation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(4): 2269-2280.

收稿日期: 2023-09-07; 修回日期: 2023-12-12

作者简介:

王天宇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术、新能源变换器及其控制技术; E-mail: wty_suep@outlook.com

赵晋斌(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代电力电子技术在电力系统中的应用、新能源发电技术。E-mail: zhaojinbin@shiep.edu.cn

(编辑 张颖)