

基于数据驱动的并网逆变器无模型预测电流控制

杨金东¹, 张锡然¹, 杨泽宇², 荣飞²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;

2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:传统模型预测电流控制因其响应迅速和多目标优化优势,在并网逆变器控制领域得到广泛研究。文中针对传统模型预测电流控制中因参数失配导致控制性能下降的问题,提出一种基于数据驱动的无模型预测电流控制策略。首先,采用加权平均电流方法对三阶 LCL 型滤波器系统进行降阶处理,以抑制 LCL 谐振频率引起的振荡;然后,利用超局部模型简化传统预测电流模型,并通过设计线性扩张状态观测器对系统扰动进行估计和补偿,从而提高电流预测精度;最后,基于系统运行数据,应用递归最小二乘法在线更新系统模型,降低控制系统对参数的依赖。仿真与硬件在环实验结果证明,相较于传统模型预测电流控制,所提出的控制策略在参数失配情况下具有更强的鲁棒性且稳态性能更优。

关键词:有限集模型预测控制;无模型控制;数据驱动;超局部模型;递归最小二乘法;参数失配

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)04-0197-10

0 引言

近年来,随着风力发电、分布式光伏等可再生能源以及电动汽车充电桩等直流负荷的快速发展^[1-7],逆变器作为新能源并网^[8-12]、柔性互联^[13]等交直流混合供电系统的核心装备,对其控制系统响应速度、控制精度、输出电流谐波提出更高的要求。

并网逆变器中一般采用串联 LCL 型滤波器减小高次谐波的影响,然而 LCL 作为一种三阶滤波器,其本身会使得系统在高频下产生谐振^[14]。目前,谐振抑制策略主要分为无源阻尼^[15]和有源阻尼^[16]两类。而无源阻尼谐振抑制策略会产生功率损耗,因此有源阻尼谐振抑制策略的研究受到广泛关注。文献^[17-18]提出加权平均电流法,在不改变控制系统结构的情况下,将高阶控制系统降为 1 阶系统,为抑制三阶 LCL 系统引起的谐振提供了新的解决思路。

传统的控制策略方面,如比例-积分(proportional-integral, PI)控制^[19-20]因其结构简单、线性化特性良好等优点,在控制系统中得到广泛应用。但随着逆变器的结构日趋复杂,PI 控制在处理高阶系统时难以实现零稳态误差。比例-谐振(proportional-resonant, PR)控制^[21-22]虽然能够实现对交流信号的精确控制,并可针对特定高次谐波分量进行补偿,但随着谐波分量次数的增加,容易导致系统失稳。

有限集模型预测控制(finite set model predictive control, FS-MPC)因其具有的强鲁棒性、快速动态

响应能力以及多目标综合控制优势,在逆变器控制领域得到广泛应用^[23-24]。然而,FS-MPC 的控制性能高度依赖于预测模型的精度,实际运行中,并网逆变器的元器件因老化及外部环境的影响导致参数通常随时间而变化^[25]。在不过度增加计算负担的前提下,无法获得准确的系统模型,使得控制系统在实际运行中无法达到最优性能^[26]。

为解决模型预测控制中的参数失配问题,无模型控制(model-free control, MFC)近年来受到广泛研究^[27-29]。文献^[30]提出一种鲁棒模型预测电流控制方法,使用扩张状态观测器估计参数失配引起的扰动值,并进行模型补偿,但该方法仍需要依赖电感参数进行计算。文献^[31]通过引入信号跟踪器减小传统观测器的估计残差,从而提高系统对扰动的估计精度。文献^[32]利用递归最小二乘(recursive least squares, RLS)算法估算三相逆变器滤波的电感和电阻,虽然增强了系统在应对参数失配时的鲁棒性,但增加了模型计算的复杂度。

文中针对逆变器控制系统中参数失配的问题,提出一种基于数据驱动的无模型预测电流控制(model-free predictive current control, MFPCC)方法。使用超局部模型与 RLS 算法相结合的方式增加模型预测精度。在抑制参数失配对于系统性能影响的同时,提高控制系统稳态性能。

1 逆变器模型

图 1 为三相两电平 LCL 型逆变器拓扑。其中, U_{dc} 为直流侧电压; L_1 为逆变器侧电感; L_2 为网侧电感; C 为滤波电容; $S_x(x=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 为开关器件。

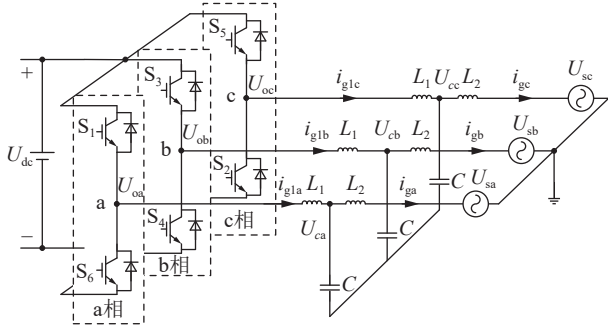


图 1 逆变器拓扑

Fig.1 Topology of inverter

根据图 1 所示拓扑以及基尔霍夫电压、电流方程, 可列出如下数学模型:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{g1}}{dt} = U_o - U_c \\ L_2 \frac{di_g}{dt} = U_c - U_s \\ C \frac{dU_c}{dt} = i_{g1} - i_g \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_{g1} = [i_{g1a} \ i_{g1b} \ i_{g1c}]^T$ 为装置侧电流; $i_g = [i_{ga} \ i_{gb} \ i_{gc}]^T$ 为网侧电流; $U_o = [U_{oa} \ U_{ob} \ U_{oc}]^T$ 为装置输出电压; $U_c = [U_{ca} \ U_{cb} \ U_{cc}]^T$ 为电容两侧电压; $U_s = [U_{sa} \ U_{sb} \ U_{sc}]^T$ 为交流侧相电压; t 为响应时间。

为了抑制 LCL 谐振频率处引发的振荡, 并提高逆变器控制系统的稳定性。文中采用计算 i_{g1} 与 i_g 加权平均电流的方式, 对三阶控制系统进行降阶处理。加权平均电流 $i_w = [i_{wa} \ i_{wb} \ i_{wc}]^T$ 计算如下:

$$i_w = m i_{g1} + n i_g \quad (2)$$

式中: m 、 n 分别为装置侧电流 i_{g1} 和网侧电流 i_g 的加权值, $m = L_1 / (L_1 + L_2)$ 、 $n = L_2 / (L_1 + L_2)$ 。对式(1)、式(2)进行拉普拉斯变换可得加权平均电流 $i_w(s)$ 与输出电压 $U_o(s)$ 之间的传递函数:

$$\begin{cases} G_{i_w}(s) = i_w^T(s) U_o^{-1}(s) = \frac{L_1}{L_1 + L_2} G_{i_{g1}}(s) + \frac{L_2}{L_1 + L_2} G_{i_g}(s) = \frac{1}{(L_1 + L_2)s} \\ G_{i_{g1}}(s) = \frac{L_2 C s^2 + 1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2)s} \\ G_{i_g}(s) = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2)s} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $G_{i_w}(s)$ 为加权平均电流传递函数; $G_{i_g}(s)$ 为网侧电流传递函数; $G_{i_{g1}}(s)$ 为装置侧电流传递函数。同时, 考虑到电感寄生电阻及系统测量误差的影响, 电流模型可表示为:

$$\frac{di_w}{dt} = \frac{U_o - U_s - R i_w}{L} + E_{i_w} \quad (4)$$

式中: $L = L_1 + L_2$; $R = R_1 + R_2$, R_1 、 R_2 分别为 L_1 、 L_2 的寄生电阻; $E_{i_w} = [E_a \ E_b \ E_c]^T$ 为系统测量电流误差。

2 基于数据驱动的逆变器预测电流模型

传统模型预测电流控制(model predictive current control, MPCC)策略需要使用精确的数学模型来实现系统电流预测, 而参数失配会导致预测结果的准确性降低, 使控制器输出误差增加, 进而影响控制系统稳态性能甚至造成系统失稳。针对这一问题, 文中提出一种基于数据驱动的逆变器预测电流模型, 以提高控制系统电流的预测精度。

2.1 超局部预测电流模型

传统预测电流模型如式(5)所示。

$$i_w(k+1) = i_w(k) + \frac{T_s}{L} (U_o(k) - U_s(k)) \quad (5)$$

式中: $i_w(k)$ 为 k 时刻加权平均电流测量值; $U_o(k)$ 为 k 时刻装置输出电压测量值; $U_s(k)$ 为 k 时刻交流侧相电压测量值; T_s 为采样周期。

式(5)所示的线性化离散模型在处理连续非线性变化系统时存在一定的预测误差。传统电流控制模型的建立依赖于预设滤波器参数, 其控制参数需要与 LCL 滤波器实际参数精确匹配, 控制参数的变化将直接影响逆变器输出电流的稳定性和波形质量。为此, 文中使用超局部模型对系统进行简化, 将电流模型设计为单输入单输出系统, 减少控制参数, 即将输入电压与输出电流进行线性化处理。超局部模型如式(6)所示。

$$y^{(n)} = \alpha u + F \quad (6)$$

式中: $y^{(n)}$ 为系统输出的 n 阶导数; α 为系统输入与输出之间的增益系数; u 为系统输入; F 为系统中如参数变化、测量误差等未知的部分以及电流谐波、纹波等各种可能的干扰。为建立超局部电流模型, 须将式(4)得到的电流模型进行重构, 得到类似于超局部模型特性的式(7)。

$$\frac{di_w}{dt} = \frac{U_o}{L} - \frac{U_s + R i_w}{L} + E_{i_w} \quad (7)$$

式(7)所示的逆变器电流模型为一阶模型, 通过模型转换可得到对应的一阶超局部模型表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{i}_w = \alpha_i u_{dc} + \hat{F}_{i_w} \\ \text{s.t. } \alpha_i = 1/L \\ u_{dc} = S U_{dc} \\ \hat{F}_{i_w} = -\frac{U_s + R i_w}{L} + E_{i_w} \end{cases} \quad (8)$$

式中: u_{dc} 为系统输入电压, 即逆变器不同开关状态 $S = [S_a \ S_b \ S_c]^T$ 下对应的输出电压, 以 a 相为例, $S_a = 1$ 上桥臂导通下桥臂关断, $S_a = 0$ 下桥臂导通上桥臂关断; α_i 为电流 i 下系统的增益系数; $\hat{F}_{i_w} = [F_a \ F_b \ F_c]^T$ 为系统参数失配及未知扰动量。

根据式(5), 采用一阶前向欧拉法对电流模型进行离散处理, 可获得 $k+1$ 时刻的电流预测值。

$$\hat{i}_w(k+1) = \hat{i}_w(k) + T_s (\alpha_i u_{dc} + \hat{F}_{i_w}) \quad (9)$$

与传统预测电流模型相比, 超局部预测电流模型使用参数更少、结构更加简单, 开关状态及输出相电压如表 1 所示。

表 1 开关状态及输出相电压
Table 1 Switch status and output phase voltage

S_a	S_b	S_c	U_{oa}	U_{ob}	U_{oc}
0	0	0	0	0	0
1	0	0	$2U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$
0	1	0	$-U_{dc}/3$	$2U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$
1	1	0	$U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$-2U_{dc}/3$
0	0	1	$-U_{dc}/3$	$-U_{dc}/3$	$2U_{dc}/3$
1	0	1	$U_{dc}/3$	$-2U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$
0	1	1	$-2U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$	$U_{dc}/3$
1	1	1	0	0	0

2.2 线性扩张状态观测器

针对式(9)建立的电流数学模型中存在的扰动项, 文中使用线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)估算系统状态量, 以获得控制系统中存在的未知扰动量。

LESO 结构如图 2 所示, 通过实际输入 $\alpha_i S_a U_{dc}$ 和电流测量值 i_{wa} , 估计输出电流值及系统扰动量。其中, y 为电流测量值; $\hat{y}$ 为输出电流估计值; $\hat{F}_a$ 为电流扰动估计值; l_{01} 、 l_{02} 分别为观测器电流估计与误差估计系数; $e_{i_{wa}}$ 为输出电流估计值与测量值之间的误差。

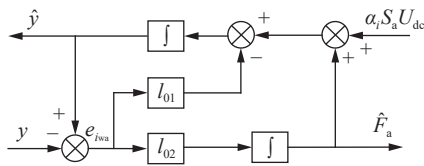


图 2 LESO 结构
Fig.2 LESO structure

针对单相电流超局部模型, 以输出电流为状态变量、系统误差为反馈, 以 a 相为例构建的 LESO 可以表述为:

$$\begin{cases} e_{i_{wa}}(k) = \hat{i}_{wa}(k) - i_{wa}(k) \\ \hat{i}_{wa}(k+1) = \hat{i}_{wa}(k) + T_s (\hat{F}_a(k) + \alpha_i S_a U_{dc}) - l_{01} e_{i_{wa}}(k) \\ \hat{F}_a(k+1) = \hat{F}_a(k) - l_{02} e_{i_{wa}}(k) \\ G(z) = \frac{\hat{i}_{wa}(z)}{\hat{i}_{wa}(z)} = \frac{T_s l_{02} + l_{01}(z-1)}{(z-1)^2 + T_s l_{02} + l_{01}(z-1)} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\hat{i}_{wa}(k)$ 为 a 相输出电流估计值; $i_{wa}(k)$ 为 a 相输出电流测量值; $\hat{F}_a(k)$ 为 a 相电流扰动估计值; $G(z)$

为输出电流测量值和输出电流估计值之比在 z 域中的传递函数。

根据式(10)所示的 LESO 在 z 域中传递函数特性分析, 观测器的估计系数 l_{01} 和 l_{02} 的取值将影响传递函数闭环极点的分布, 从而决定观测器的性能。由于观测器为二阶系统, 通过将 $l_{01}=2T_s\omega_0$, $l_{02}=T_s\omega_0^2$ 代入传递函数 $G(z)$, 求解极点可得:

$$z_{1,2} = 1 - 0.5T_s\omega_0 \quad (11)$$

式中: $z_{1,2}$ 为所求解的极点; ω_0 为固有频率。

2.3 基于 RLS 算法的预测电流模型

由 2.2 节推导得到超局部预测电流模型如式(9)所示, 其中, 电流扰动量虽可通过式(10)的 LESO 估计, 但其增益系数 α_i 仍需要依赖 LCL 滤波器的电感参数。为消除这一参数依赖性, 对超局部电流模型进一步优化, 采用 RLS 算法基于历史数据确定增益系数, 该 RLS 算法如下:

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \gamma(k)e(k) \\ e(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \\ \gamma(k) = \frac{1}{\varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k) + \lambda} P(k-1)\varphi(k) \\ P(k) = \frac{1}{\lambda} (I - \gamma(k)\varphi^T(k))P(k-1) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\hat{\theta}(k)$ 为需要估计的增益系数向量; $\gamma(k)$ 为增益系数更新矩阵; $e(k)$ 为系统实际输出与估计输出的误差; $y(k)$ 为系统输出测量值; $\varphi(k)$ 为采样输入和输出的历史数据; $P(k)$ 为增益系数估计向量协方差矩阵; $\lambda=1$ 为遗忘因子; I 为单位矩阵。

超局部预测电流模型为单输入单输出系统, 可以将其动态过程的数学模型描述为:

$$(a_0 + a_1 z^{-1})\hat{i}_w(k) = z^d(b_0 + b_1 z^{-1})u_{dc}(k) + T_s \hat{F}_{i_w} \quad (13)$$

式中: a_0 、 a_1 、 b_0 、 b_1 均为系统增益系数; z^d 为延迟环节。 $a_0=1$ 可将式(13)的数学模型变换为最小二乘格式得到:

$$\begin{cases} y(k) = \varphi^T(k)\hat{\theta}(k) \\ \varphi(k) = [-i_w(k-1) \ u_{dc}(k-1) \ u_{dc}(k-2)] \\ \theta_{start}(k) = [-1 \ T_s\alpha_i \ 0] \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\theta_{start}(k)$ 为增益系数初始值向量。

根据时间偏移估计方程, 下一采样周期电流的预测输出方程表示如下:

$$\hat{i}_w(k+1) = \varphi^T(k+1)\hat{\theta}(k) \quad (15)$$

将传统预测电流模型改为时变模型, 通过完全消除 LCL 滤波器参数在逆变器未来电流预测计算中的依赖性, 实现更高的电流预测精度, 可提高控制系统稳态性能与抗干扰能力。

3 MPFCC

基于无模型预测进行逆变器控制系统的设计,其主要控制目标是通过选取最优开关状态,使每个控制周期内的电流预测值与参考值之间误差最小。MPCC 框图如图 3 所示。

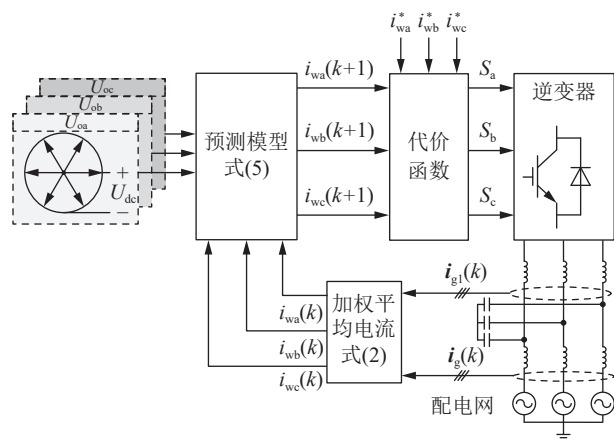


图 3 MPCC 框图

Fig.3 Block diagram of MPCC

FS-MPC 控制器由三部分组成,分别为预测电流模块、基于代价函数滚动优化的电压矢量选择模块和反馈矫正模块。为实现逆变器分相控制,文中基于 abc 三相电流建立如式(16)所示的综合代价函数。

$$g_X = \lambda_1 |i_{wa}^* - i_{wa}(k+1)| + \lambda_2 |i_{wb}^* - i_{wb}(k+1)| + \lambda_3 |i_{wc}^* - i_{wc}(k+1)| \quad (16)$$

式中: i_{wa}^* 、 i_{wb}^* 、 i_{wc}^* 为装置所需要输出的三相电流参考值; X 为电压矢量种类; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为权重系数,在输出三相平衡电流时 $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1$ 。通过式(16)可确定最优开关状态,使得各相电流参考值的误差绝对值最小。

MFPC 策略在 MPCC 策略基础上,采用第 2 章提出的数据驱动预测电流模型替代传统预测电流模型,其控制框图如图 4 所示。具体控制流程如图 5 所示,步骤如下:

(1) 在 k 时刻,采样装置 LCL 两侧三相电流为 $i_{g1}(k)$ 、 $i_g(k)$,通过式(2)计算三相加权平均电流 $i_w(k)$,经 LESO 获得扰动量估计值 $\hat{F}_{iw}$ 。

(2) 基于式(15)采用遍历方式计算 $k+1$ 时刻 X ($X=0,1,\dots,7$) 种电压矢量 v_X 下电流预测值 $i_w(k+1)$ 。

(3) 将 8 种电流预测值代入式(16)中,计算代价函数值 g_X ,选择最小代价函数 g_{min} 对应的最优电压矢量作为控制系统的输出,并在 $k+1$ 时刻作用于装置。

4 仿真分析

文中将使用 MATLAB/Simulink 软件对逆变器控制策略进行建模仿真。通过将提出的数据驱动

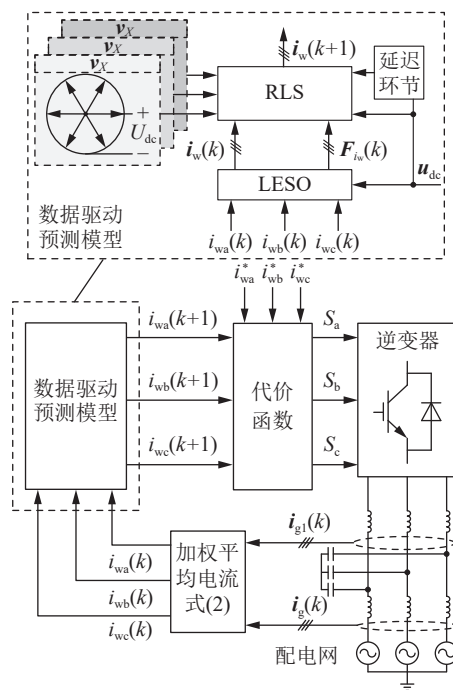


图 4 MFPC 框图

Fig.4 Block diagram of MFPC

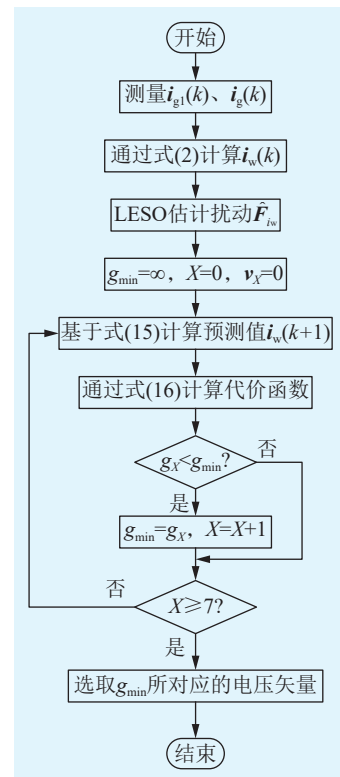


图 5 MFPC 流程

Fig.5 Flow chart of MFPC

MFPC 策略与传统 MPCC 进行对比分析,验证系统的动态、稳态性能以及参数失配条件下控制系统的鲁棒性能优势。MPCC 与 MFPC 控制系统参数相同,如表 2 所示。

4.1 动态及稳态仿真

图 6 为两种控制策略的三相输出电流波形。

表 2 MATLAB/Simulink 仿真参数
Table 2 MATLAB/Simulink simulation parameters

参数	数值
网侧相电压/V	220
直流侧母线电压/V	800
逆变器滤波电感/mH	2
网侧滤波电感/mH	1
滤波电容/ μF	0.5
采样周期/ μs	10
LESO固有频率/Hz	55 000

逆变器初始为空载状态, 0.1 s 时将电流参考值阶跃至 70 A, 0.2 s 后再阶跃为轻载电流 30 A。实验结果表明, 两种控制策略均能实现系统稳定。对比图 6 可以发现, 在电流参考值阶跃变化后, 文中提出的 MFPCC 策略与传统 MPCC 策略均能快速跟踪电流参考值。

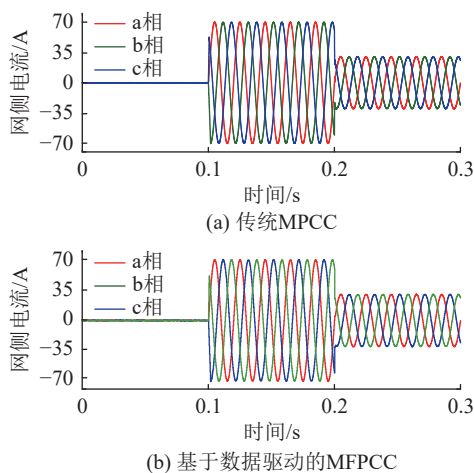


图 6 输出电流参考值变化的并网电流波形

Fig.6 Grid-connected current waveforms with changed reference value for output current

稳态并网电流仿真波形如图 7 所示。当控制参数与电感真实值相等时, 两种控制策略均可输出标准正弦电流。图 8 对比了两种控制策略的总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD), MPCC 输出电流基频幅值为 29.82 A, THD 为 1.28%; MFPCC 输出电流基频幅值为 29.95 A, THD 为 0.45%。结果表明, MFPCC 有效抑制了传统 MPCC 中存在的高频谐波分量, 稳态性能更优。

两种控制方式均通过遍历 8 种电压矢量的方式计算代价函数。由于代价函数与所选取的最优电压矢量呈周期性变化, 图 9 展示了一个基波周期 0.02 s 内代价函数的变化趋势及对应的最优电压矢量选择过程。

4.2 参数失配仿真

首先, 针对传统 MPCC 在电感控制参数变化情况下性能进行仿真分析, 结果如图 10 所示。控制

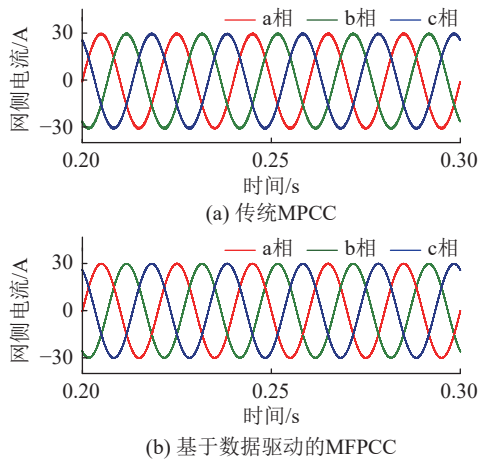


图 7 稳态下并网电流波形

Fig.7 Grid-connected current waveforms under steady state

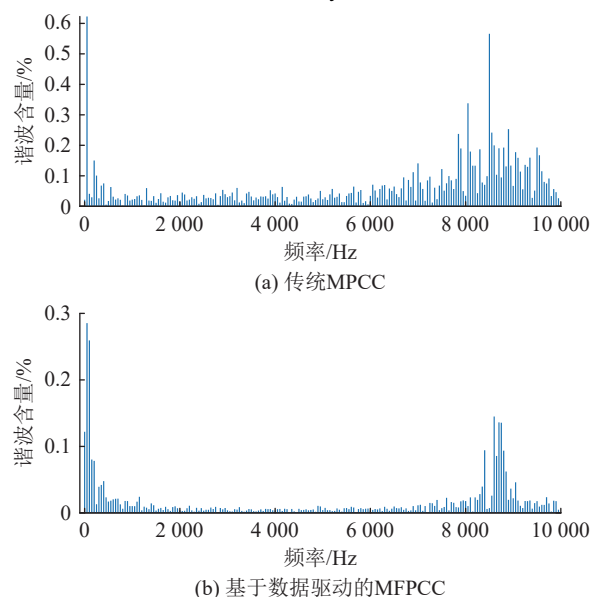


图 8 并网电流 THD

Fig.8 Grid-connected current THD

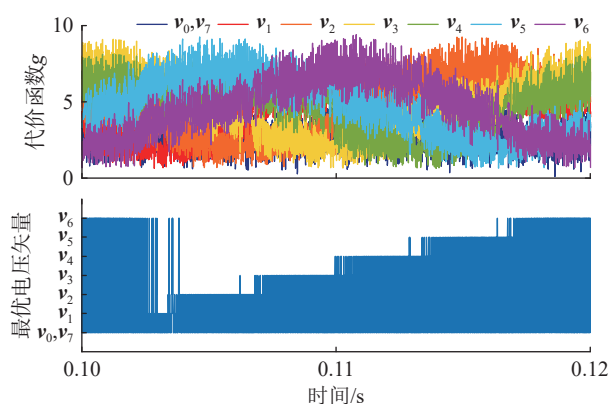


图 9 代价函数变化趋势

Fig.9 Trend of cost function changes

系统在准确参数下运行 0.1 s 后, 将控制参数 L 调整为电感真实值 L^* 的 0.5 倍, 即 $L=0.5L^*$, 随后每隔 0.05 s 将控制参数 L 增加 $0.25L^*$ 。从图 10 中可知,

当电感参数降至 $0.5L^*$, MPCC 的输出电流无法跟踪参考值。

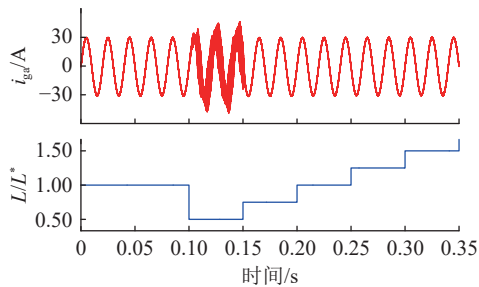


图 10 参数失配下 MPCC 的并网电流波形
Fig.10 Grid-connected current waveforms of MPCC under parameter mismatch

为进一步评估系统的鲁棒性,采用时间与绝对误差积分(integrated time and absolute error, ITAE)指标量化电流输出误差,其定义如下:

f_{ITAE} = \int_0^\infty t|e(t)|dt \tag{17}

式中: f_{ITAE} 为时间与电流绝对误差积分值; $e(t)$ 为输出与参考值的误差。

两种控制策略在不同控制参数下分别稳定运行 0.5 s, 并计算 f_{ITAE} 值, 结果如图 11 所示。从 f_{ITAE} 值随电感参数变化的趋势可以看出, 传统 MPCC 对电感参数减小更为敏感, 尤其在 $L/L^*=0.5$ 时系统失稳, 导致 f_{ITAE} 值无法有效表征其性能。相比之下, 文中提出的 MFPPCC 方式在 $L/L^*=0.5\sim 1.5$ 的参数失配范围内, f_{ITAE} 值变化不明显, 且均小于 MPCC 的 f_{ITAE} , 证明了文中所提 MFPPCC 策略的有效性, 提高了控制系统的稳态性能。

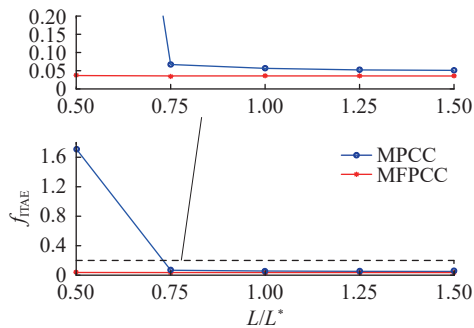


图 11 两种控制策略的 ITAE
Fig.11 ITAE of two control strategies

图 12 为 RLS 算法对于系统增益的估计过程, 系统在稳定运行 0.2 s 后, 输出电流参考值从 30 A 变化为 70 A。从图 12 中可以看出, 在系统稳定运行时, RLS 算法通过不断迭代更新实现系统增益收敛。控制系统参数失配仅会影响 RLS 算法的初值, 而不会对控制系统的稳态性能产生影响。同时, RLS 算法的收敛过程具有鲁棒性, 其收敛特性不会因参考值的阶跃变化而受到干扰。

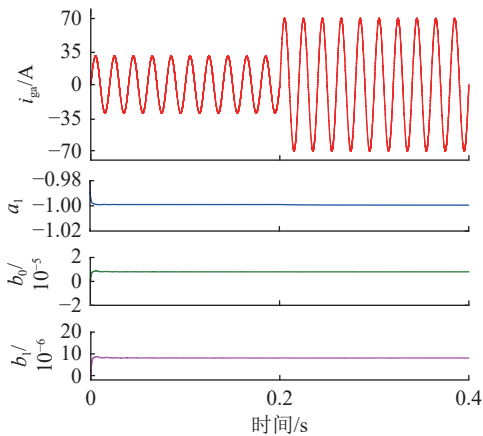


图 12 RLS 估计增益系数
Fig.12 RLS estimated gain coefficient

5 硬件在环实验

为进一步验证文中所提控制方案的有效性, 在如图 13 所示的硬件在环 (hardware-in-the-loop, HIL) 仿真测试系统平台进行实验, 实验参数如表 3 所示。

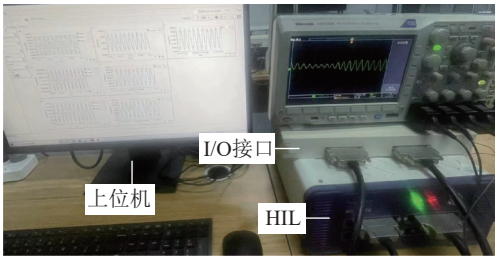


图 13 HIL 半实物实验平台
Fig.13 HIL semi-physical experimental platform

表 3 HIL 实验参数
Table 3 HIL experimental parameters

参数	数值
网侧相电压/V	220
直流侧母线电压/V	800
逆变器滤波电感/mH	2
网侧滤波电感/mH	1
滤波电容/ μ F	0.5
LESO固有频率/Hz	55 000
主电路频率/kHz	100
控制电路频率/kHz	40

图 14 为 HIL 系统自闭环架构, 系统主要由 HIL 实时模拟器与上位机组成。主电路模型运行在现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)芯片上, 电压、电流检测信号通过 I/O 信号接口传输至控制算法模块。控制算法运行于 ARM Cortex-A 多核中央处理器中, 最终生成所需的脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号, 并通

过数字信号控制主电路中的变流器。上位机软件可实时在线监测电路运行状态, 并调整控制器参数。同时, 主电路检测信号经过数模转换后输出模拟信号, 可以直接通过示波器进行测量。

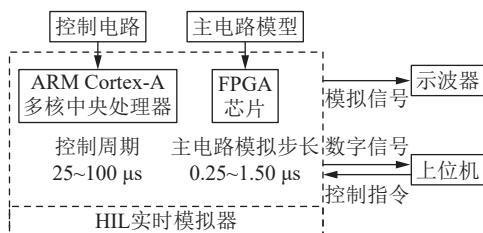


图 14 HIL 系统自闭环架构

Fig.14 HIL system closing loop architecture

5.1 动态及稳态实验

图 15、图 16 为传统 MPCC 与文中所提 MFPCC 策略的动态电流实验波形。图 15 为输出电流参考值从空载状态阶跃至 70 A 时动态电流波形, 图 16 为输出电流参考值从 70 A 阶跃降至 30 A 时动态电流波形。实验结果表明, 两种控制策略均能在 2 ms 内快速跟踪参考值并达到新的稳态。

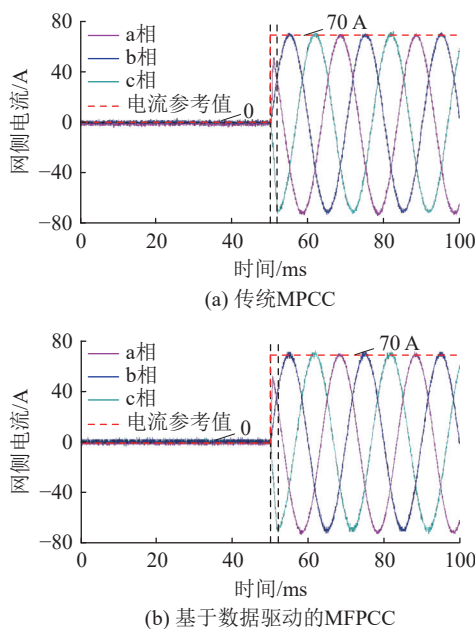


图 15 电流参考值从 0 跃变至 70 A 时动态电流波形
Fig.15 Dynamic current waveforms when current reference value jumps from 0 to 70 A

图 17 为两种控制策略稳定输出参考值 60 A 电流的实验波形, 通过示波器采样数据导入 MATLAB 进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 分析。MPCC 输出电流的基频幅值为 59.13 A, THD 为 3.56%, 而 MFPCC 输出电流的基频幅值为 59.86 A, THD 为 2.11%。对比两种控制策略的稳态波形与 THD, 实验结果证明在提高电流模型预测精度后, 控制系统的稳态性能进一步提升。

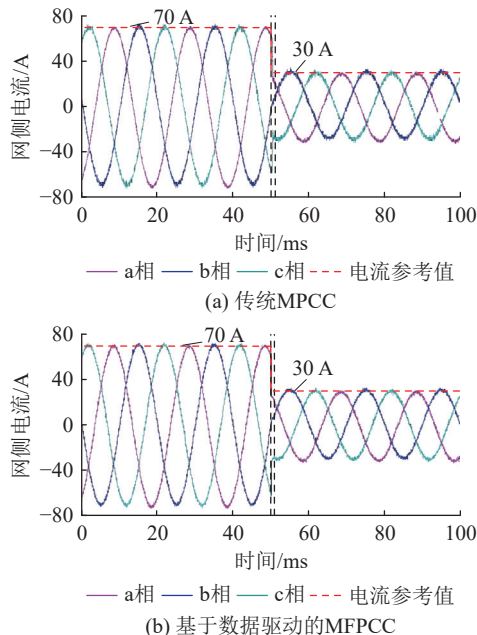


图 16 电流参考值从 70 A 跃变至 30 A 时动态电流波形
Fig.16 Dynamic current waveforms when current reference value jumps from 70 A to 30 A

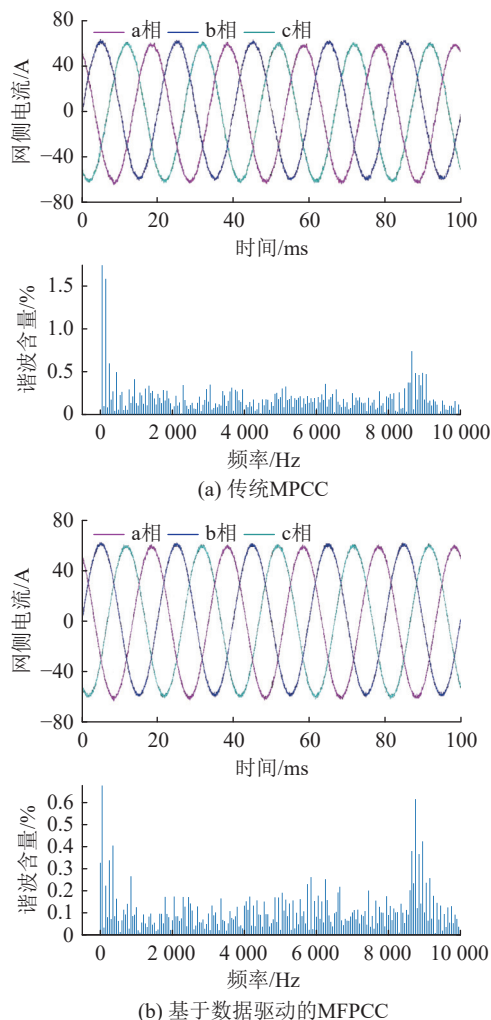


图 17 稳态下电流波形与 THD
Fig.17 Steady state current waveforms and THD

5.2 参数失配实验

控制系统在参数失配时的鲁棒性能见图 18。实验首先保证电感控制参数为标称值,然后将电感控制参数改变为准确值的 0.5 倍。对比图 18(a)传统 MPCC 方法与图 18(b)基于数据驱动的 MFPCC 方法输出电流波形可知,传统 MPCC 方法在电感控制参数变化后,输出电流无法跟踪参考值;而文中所提的 MFPCC 方法因模型参数自适应更新特性,输出电流几乎无波动。这表明文中所提方法具有更强的鲁棒性能。

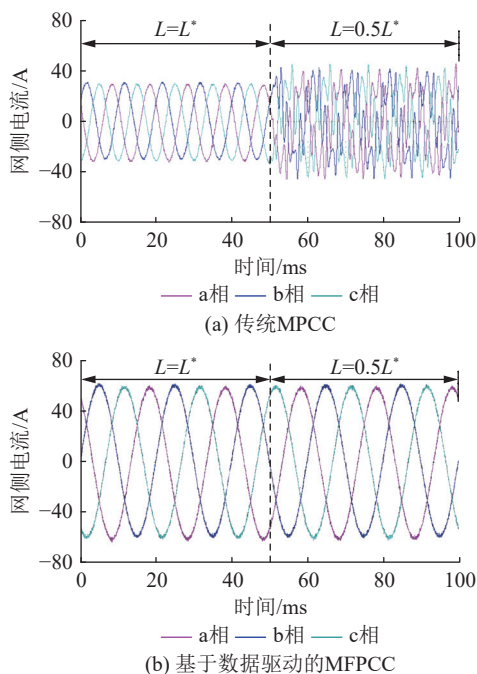


图 18 参数失配下输出电流波形
Fig.18 Output current waveforms under parameter mismatch

6 结论

针对逆变器在运行过程中因环境温度变化、器件老化等因素引起的参数失配问题,文中提出一种基于数据驱动的 MFPCC 策略。

(1) 采用超局部模型对传统电流模型进行简化,通过 LESO 估计参数失配造成的扰动值,并将其补偿到预测模型中;

(2) 基于历史输入电压与输出电流数据,使用 RLS 算法对模型参数进行实时更新;

(3) 通过对比实验验证所提 MFPCC 策略的有效性。

与 MPCC 策略相比,文中所提出的 MFPCC 策略通过高精度的电流预测模型,使得输出电流谐波含量明显减少,稳定性能更优。当电感控制参数在实际值的 0.5~1.5 倍范围内变化时,逆变器输出电

流均能快速稳定跟踪参考电流,有效降低控制系统对电感等参数的依赖,鲁棒性更强。

致 谢

本文得到云南电网科技项目(0562002023030301PD00004)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] KOUTSOUKIS N C, SIAGKAS D O, GEORGILAKIS P S, et al. Online reconfiguration of active distribution networks for maximum integration of distributed generation[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 14(2): 437-448.
- [2] 季玉琦,王涛,史少彧,等. 含分布式电源的配电网功率优化模式影响因素分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1): 97-107.
JI Yuqi, WANG Tao, SHI Shaoyu, et al. Analysis of influencing factors of power optimization modes in distribution network containing distributed generations[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 97-107.
- [3] SINGH M, KHADKIKAR V, CHANDRA A, et al. Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(1): 307-315.
- [4] 曹文君,张岩,张安彬,等. 弱电网条件下分布式光伏并网系统谐振机理及影响特性[J]. *电力建设*, 2024, 45(3): 149-159.
CAO Wenjun, ZHANG Yan, ZHANG Anbin, et al. Resonance mechanism and influence characteristics of distributed photovoltaic grid-connected system under weak grid conditions[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(3): 149-159.
- [5] 惠慧,李蕊,朱逸楠,等. 含高比例分布式光伏的配电网多目标概率规划方法[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(11): 2-10.
HUI Hui, LI Rui, ZHU Yidi, et al. Multi-objective probabilistic planning method for distribution network with high proportion of distributed photovoltaic[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(11): 2-10.
- [6] 李鹏,刘嘉彦,李佳蔚,等. 考虑光伏与电动汽车充电站协同的配电网电压控制方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(6): 121-130.
LI Peng, LIU Jiayan, LI Jiawei, et al. A voltage control method for distribution networks considering photovoltaic and electric vehicle charging station coordination[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(6): 121-130.
- [7] 高雪寒,高源,赵健,等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(8): 77-87.
GAO Xuehan, GAO Yuan, ZHAO Jian, et al. Three-phase unbalanced optimization of a distribution network with a high proportion of distributed photovoltaic energy based on a data-driven power flow model[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(8): 77-87.
- [8] 杨欢,蔡云旖,屈子森,等. 配电网柔性开关设备关键技术及其

- 发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 153-165.
- YANG Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165.
- [9] 雷傲宇, 苏婷婷, 梅勇, 等. 基于分频器理论的新能源电网暂态频率稳定分析方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 132-140.
- LEI Aoyu, SU Tingting, MEI Yong, et al. A transient frequency stability analysis method for new energy grid based on frequency divider theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 132-140.
- [10] 李冠儒, 孙亮, 罗瑞, 等. 考虑能量梯级利用的风氢综合能源系统多目标优化配置[J]. 电力建设, 2024, 45(10): 1-12.
- LI Guanru, SUN Liang, LUO Rui, et al. Multi-objective optimization of wind-hydrogen integrated energy systems with energy cascade utilization[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 1-12.
- [11] 耿新, 马文恒, 武琼, 等. 新能源大规模并网环境下变电站防孤岛技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 161-171.
- GENG Xin, MA Wenheng, WU Qiong, et al. Islanding prevention technology for substations in the context of large-scale grid connection of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 161-171.
- [12] 林涛, 林政阳, 李晨, 等. 基于 TCN 的跟网/构网混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 169-177.
- LIN Tao, LIN Zhengyang, LI Chen, et al. Small signal stability assessment of grid-connected system for grid-following/grid-forming hybrid new energy stations based on TCN[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 169-177.
- [13] 李宇骏, 陆艺源, 牟同鹏, 等. 新能源发电经换流器并网系统的稳定性分析与控制综述[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 79-94.
- LI Yujun, LU Yiyuan, MU Tongpeng, et al. A review of stability analysis and control of renewable energy integration systems via converters[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 79-94.
- [14] 王喆, 严欢, 邵克强, 等. 逆变器并网系统谐振特性及预防措施[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(7): 99-107.
- WANG Zhe, YAN Huan, TAI Keqiang, et al. Resonance characteristics and prevention measures for grid-connected inverter systems[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 99-107.
- [15] 郝为瀚, 谭威, 黄阳, 等. 基于无源阻尼的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(3): 23-31.
- HAO Weihuan, TAN Wei, HUANG Yang, et al. High-frequency oscillation suppression strategy of MMC-HVDC based on passive damping method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(3): 23-31.
- [16] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于 PI 调节器和电容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142, 19.
- BAO Chenlei, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 133-142, 19.
- [17] SUN J J, WANG Y, GONG J W, et al. Adaptability of weighted average current control to the weak grid considering the effect of grid-voltage feedforward[C]//2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Tampa, FL, USA. IEEE, 2017: 3530-3535.
- [18] HE N, XU D H, ZHU Y, et al. Weighted average current control in a three-phase grid inverter with an LCL filter[C]//IEEE Transactions on Power Electronics. IEEE, 2013: 2785-2797.
- [19] DANNEHL J, WESSELS C, FUCHS F W. Limitations of voltage-oriented PI current control of grid-connected PWM rectifiers with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 380-388.
- [20] ERROUSSI R, AL-DURRA A. Design of PI controller together with active damping for grid-tied LCL-filter systems using disturbance-observer-based control approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3820-3831.
- [21] 杭丽君, 李宾, 黄龙, 等. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振 PR 电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 51-58.
- HANG Lijun, LI Bin, HUANG Long, et al. A multi-resonant PR current controller for grid-connected inverters in renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 51-58.
- [22] SHEN G Q, ZHU X C, ZHANG J, et al. A new feedback method for PR current control of LCL-filter-based grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2033-2041.
- [23] 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.
- [24] RODRIGUEZ J, KAZMIERKOWSKI M P, ESPINOZA J R, et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1003-1016.
- [25] 张艳峰, 杨锡运, 王忻哲. 基于改进无模型自适应控制的漂浮式海上风机转矩-变桨协调控制策略研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(4): 607-615.
- ZHANG Yanfeng, YANG Xiyun, WANG Xinze. Research on torque-pitch coordinated control of floating offshore wind turbines based on improved model-free adaptive control[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(4):

- 607-615.
- [26] KHALILZADEH M, VAEZ-ZADEH S, RODRIGUEZ J, et al. Model-free predictive control of motor drives and power converters: a review[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 105733-105747.
- [27] 蔡子育, 于新红, 许立斌, 等. 基于级联扩张状态观测器的 VIENNA 整流器无权重无模型预测控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(12): 11-18.
CAI Ziyu, YU Xinhong, XU Libin, et al. Unweighted model-free predictive control for VIENNA rectifier based on cascade extended state observer[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2024, 36(12): 11-18.
- [28] WEI Y, YOUNG H, KE D L, et al. Model-free predictive current control using extended affine ultralocal for PMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(7): 6719-6729.
- [29] WEI Y, WANG F X, YOUNG H, et al. Autoregressive moving average model-free predictive current control for PMSM drives[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, 11(4): 3874-3884.
- [30] 郑士成, 何国锋, 董燕飞, 等. 三相并网逆变器的鲁棒模型预测电流控制[J]. *控制工程*, 2023, 30(7): 1233-1241.
ZHENG Shicheng, HE Guofeng, DONG Yanfei, et al. Robust model predictive current control for three-phase grid-connected inverter[J]. *Control Engineering of China*, 2023, 30(7): 1233-1241.
- [31] 江田田, 于新红, 苏畅, 等. 基于补偿函数观测器的三相并网逆变器无模型预测功率控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(12): 85-92.
JIANG Tiantian, YU Xinhong, SU Chang, et al. Model-free predictive power control of three-phase grid-connected inverter based on compensation function observer[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2024, 36(12): 85-92.
- [32] 严勤, 俞林刚, 汤克艰, 等. 基于递归最小二乘估算的三相逆变器无参数预测电流控制[J]. *电气自动化*, 2023, 45(5): 84-87.
YAN Qin, YU Lingang, TANG Kejian, et al. Parameter-free predictive current control for three-phase inverters based on recursive least squares estimation[J]. *Electrical Automation*, 2023, 45(5): 84-87.

作者简介:



杨金东

杨金东(1984),男,博士,高级工程师,从事配电网无功电压控制、中低压柔性互联运行控制、配电网绝缘状态监测及故障查找定位等工作(E-mail: 1440771598@qq.com);

张锡然(1995),男,硕士,工程师,从事配电网中性点全补偿、陶瓷电容传感器及变压器故障检测等工作;

杨泽宇(1997),男,博士在读,研究方向为变流器控制、模型预测控制、中低压柔性互联运行控制。

A data driven model-free predictive current control for grid-connected inverters

YANG Jindong¹, ZHANG Xiran¹, YANG Zeyu², RONG Fei²

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Traditional model predictive current control has been widely studied in the field of grid-connected inverter control due to its rapid response and multi-objective optimization capabilities. A data driven model-free predictive current control strategy is proposed to address the problem of control performance degradation caused by parameter mismatch in traditional model predictive current control. Firstly, the weighted average current method is used to reduce the order of the third-order LCL filter system, suppressing oscillations caused by LCL resonant frequency. Then, the ultra local model is adopted to simplify the traditional predictive current model, and a linear extended state observer is designed to estimate and compensate for system disturbances, thereby improving the accuracy of current prediction. Finally, the recursive least squares method is used to update the system model online based on system operating data, reducing the dependence of the control system on parameters. The simulation and hardware-in-the-loop experimental results demonstrate that compared to traditional model predictive current control, the proposed control strategy exhibits strong robustness and good steady-state performance under parameter mismatch conditions.

Keywords: finite set model predictive control; model-free control; data driven; ultra local model; recursive least squares; parameter mismatch

(编辑 吴昊)