

一种基于超局部模型的无模型顺序 预测控制方法

史明明,刘瑞煌,王鑫达,汪家铭,张宸宇

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏南京 210009)

摘要:针对传统模型预测控制算法存在的参数依赖性问题,提出了一种新型的模型预测控制方法,该方法使用了超局部模型,并且基于递归最小二乘(RLS)方法,利用运行时系统输入输出的实时数据对其中的参数进行更新,从而消除了模型预测控制方法对参数的依赖性,提高了其鲁棒性。此外,针对预测控制代价函数中权重因子选取没有普遍规则、依赖经验的问题,使用了基于顺序预测的控制方法,在避免选择权重因子的情况下达到了期望的性能。最后通过 Matlab/Simulink 进行仿真,在三电平自适应中点钳位(3L-ANPC)逆变器上验证了该方法的有效性和鲁棒性。

关键词:无模型预测控制;递归最小二乘法;三电平 ANPC 逆变器;超局部模型;顺序预测控制

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26011

A Novel Model-free Sequential Predictive Control Method for Inverters Based on the Ultra-local Model

SHI Mingming, LIU Ruihuang, WANG Xinda, WANG Jiaming, ZHANG Chenyu

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Ltd. Electric Power Science Research Institute,
Nanjing 210009, Jiangsu, China)

Abstract: To address the parameter dependency issues present in traditional model predictive control algorithms, a novel model predictive control method that employed an ultra-local model and updated its parameters in real-time using the recursive least squares (RLS) method was proposed. This approach eliminated the dependence on parameters in model predictive control methods and enhanced their robustness. Additionally, addressing the lack of universal rules and reliance on experience in selecting weighting factors in the predictive control cost function, a sequential prediction-based control method that achieves desired performance without the need to choose weighting factors was utilized. Finally, the effectiveness and robustness of the method were validated through simulations in Matlab/Simulink on a three level- active neutral point clamped (3L-ANPC) inverter.

Key words: model-free predictive control (MFPC); recursive least squares (RLS) method; three level- active neutral point clamped (3L-ANPC) inverter; ultra-local model; sequential predictive control

近些年来,城市电网的供电需求不断增加,对于安全性、环保性的要求是其关注重点。柔性互联装置以其可控性较高、能够改善系统稳定性、易于实现可再生能源的并网,以及输送容量大等优点,在城市电网供电安全问题中扮演重要角色。

多电平逆变技术因其具有电流变化率、总谐波畸变率(THD)低等优点,是柔性直流输电系统

中的重要部分。其中三电平逆变器由于拓扑结构简单、应用容易等优点,已经在包括列车、风机等多个场景得到应用^[1]。三电平逆变器主要类型有T型、二极管钳位型(neutral point clamped, NPC)^[2]、飞跨电容型(flying capacitor, FC)、有源中性点钳位型(active neutral point clamped, ANPC)^[3]。

为了提高直流输电系统的可靠性和稳定性,实现在城市电网中的有效运行,需要为其选取安

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023008)

作者简介:史明明(1986—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为新能源并网技术、交直流配电技术、电能质量测试分析治理技术,
Email:simon8612@126.com

全、可靠的控制策略^[4]。传统的线性控制策略往往难以应对系统的复杂性和动态变化。随着微处理器计算能力的不断提升,越来越多的复杂算法被引入到了电力电子变换器的控制中,其中,有限集模型预测控制(finite control set model predictive control, FCS-MPC)因其在处理非线性以及多目标中的优势,得到了众多研究者的关注^[5]。然而,模型预测控制依赖于系统的先验模型对于下一时刻状态进行估计,这一固有特点会导致在实际工况下,当系统参数发生改变,或者模型并不能精确描述动态系统时,预测结果与实际输出产生偏差^[6-8]。

为了解决模型预测控制的固有问题,学者们进一步提出了无模型预测控制(model-free predictor control, MFPC),这一策略的核心思想在于,利用系统运行时的信息,对系统的模型进行估计或修正,从而降低传统模型预测控制对于模型的依赖性。在这一方面,已经有许多较为成熟的方法被提出。首先,基于查找表的无模型方法使用过往的输入输出(input output, IO)信息构建查找表,然后在估计阶段使用查找表中存储电压-电流的关系对下一时刻电流进行预测,从而不使用系统的先验模型^[9-10]。然而这一方法会面临数据停滞的问题,当查找表中的某个输入-输出关系对很久没有被更新时,利用其做出的估计可能不准确^[11]。另一个被广泛使用无模型预测控制的方法是基于超局部模型的方法,这一方法的思想是将系统的模型转化为更加简单的超局部模型,接着使用系统的IO数据,利用参数估计的方法对超局部模型的参数进行估计^[12]。超局部模型的估计性能很大程度上取决于使用的参数辨识方法的精确性。目前已经被成功应用于变换器的参数辨识方法有基于扩展状态观测器的方法^[13]、基于预测神经网络的方法^[14-15]、基于动态线性化的方法^[16]等。但是这些方法均有一个固有的缺点,即参数辨识的准确度较大程度上依赖于估计模型中 α 初始值的选取,如果初始值偏差较大,那么估计值与实际值的误差也会增加^[17]。从这个角度来说,这些方法仍然对于先验模型有一定依赖性。

模型预测控制的另一问题在于,当同时处理多个如中点电位平衡、电流追踪等控制目标时,需要对各个目标设置权重因子,以权衡每个目标的重要程度^[18],对于权重因子的选择没有严格的理论依据,常常根据经验以及实际效果选取,是

评价函数设计中的一个难点。

对此,本文提出了一种新型的无模型预测控制方法,作用于直流输电系统的有源中性点钳位三电平逆变器中,这一方法改进了以往使用的基于超局部模型的方法,使用含有遗忘因子的回归最小二乘法对超局部模型中的参数进行估计,并使用顺序预测的结构消除评价函数中的权重因子。其优点在于,该方法能够同时对超局部模型中的两个参数进行估计,消除了以往方法中对于初始值选取的依赖性。使用顺序预测的结构也能在保证系统性能的同时避免对权重因子的选取。进一步的,为了对本方法的鲁棒性以及参数的选择进行研究,本文在 Matlab/Simulink 中进行了仿真研究,以验证本方法的有效性。

1 三电平 ANPC 逆变器模型

本研究采用的三电平 ANPC 逆变器拓扑结构如图 1 所示,每相桥臂由 6 个开关器件构成,使用阻感型负载,其中 L, R 为三相负载电感与电阻,直流侧电容分别为 C_N, C_P , 直流电压大小为 V_{dc} , 三相输出电流分别为 i_a, i_b, i_c 。

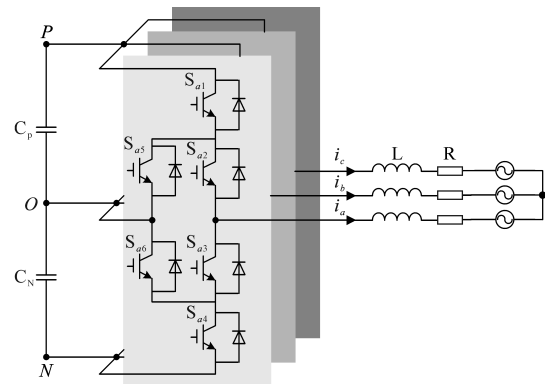


图1 三电平 ANPC 逆变器拓扑结构

Fig.1 Topology of the 3L-ANPC inverter

首先对于三相电流进行 Clark 变换,将其转换为两相固定坐标系下的值,坐标变换的计算如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \kappa_\alpha \\ \kappa_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \kappa_a \\ \kappa_b \\ \kappa_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: κ 为三相电流或者电压。

进一步的,假设变换后的交流侧电压为 v_α, v_β , 根据 KVL 可以得到三电平 ANPC 的负载侧动态模型如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{R_g}{L_g} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_g} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

如果要使用FCS-MPC的方法,首先需要将对下一时刻的输出电流进行预测,因此需要对上面的方程进行离散化,本研究设置采样周期与控制周期相同,其值均为 T_s ,则在 k 时刻对下一时刻的电流预测如下式所示:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \end{bmatrix} = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} + \frac{T_s}{L} \begin{bmatrix} v_\alpha(k) \\ v_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

接下来考虑中点电位平衡问题,假设中点电位为 v_n ,上、下电容值相等且大小为 C_{dc} ,下一时刻的中点电位值可由下式预测得到:

$$v_n(k+1) = v_n(k) - \frac{T_s}{2C_{dc}} i_n(k) \quad (4)$$

其中当前时刻的 v_n 以及 i_n 可按下式计算:

$$v_n = \frac{1}{2} (V_{c2} - V_{c1}) \quad (5)$$

$$i_n(k) = (1 - |S_a|)i_a(k) + (1 - |S_b|)i_b(k) + (1 - |S_c|)i_c(k) \quad (6)$$

式中: $S_x(x = a, b, c)$ 为三相的开关状态,取值为0, 1, -1。

在获得了逆变器的精确数学模型之后,考虑输出电流追踪参考值以及支流中点电位平衡两个控制目标,可以设计如下式的代价函数:

$$J_1 = |i^*(k+1) - i(k+1)| + \theta_n |v_n(k+1)| \quad (7)$$

式中: θ_n 为权重因子; $i^*(k+1)$ 为下一时刻的参考电流,可以使用参考外推的方法求得^[2]。

三电平三相ANPC每相由6个开关器件组成,每相输出侧共有3种电位,分别以 P, O, N 表示,其分别对应输出侧电压为 $\frac{v_{dc}}{2}, 0, -\frac{v_{dc}}{2}$ 。三相共计能够在空间中产生27个电压矢量,如图2所示,FCS-MPC方法的开关状态选择也在这27个矢量间进行。

根据设计出的代价函数,使用基于模型的FCS-MPC方法,遍历所有电压矢量,选取使得代价函数最小的电压矢量作为最优输入,在下一时刻作用于变换器,这种方法在模型精确时能够取得较好效果,但是如果模型参数出现偏差,或者模型中某些动态未能进行建模,则会导致预测结果产生较大误差。

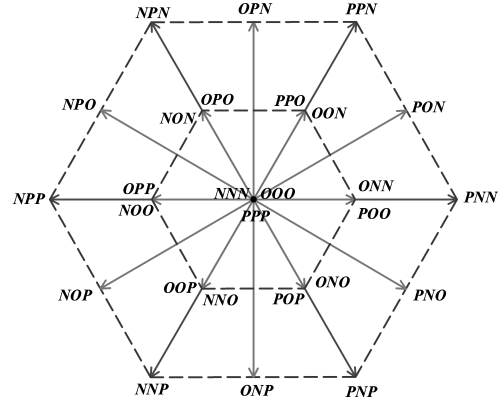


图2 三电平ANPC逆变器空间矢量

Fig.2 Voltage vector of the 3L-ANPC inverter

2 基于RLS的无模型预测控制

2.1 超局部模型应用

如之前所述,模型预测控制的性能很大程度上依赖于系统的准确模型,而基于超局部模型的方法的效果也在某些程度上依赖于系统的先验信息的准确性。为了消除这一模型依赖性,实现完全的无模型预测,本节提出了一种基于RLS的新型无模型预测控制方法。

对于本文中的变换器系统,其超局部模型给出如下:

$$y = \alpha_x u_x + F_x \quad (8)$$

式中:下标 x 为 α 或者 β ; y 为下一时刻的电流值与当前时刻电流值之差,即 $i(k+1) - i(k)$ 。

对比超局部模型和系统原有模型式(3),可以看出:

$$\begin{cases} \alpha_x = \frac{T_s}{L} \\ F_x = -\frac{T_s R}{L} i_x \end{cases} \quad (9)$$

在使用参数估计方法,利用系统的IO数据对上述两个参数进行正确的估计后,即可通过如下式所示的递推式得到下一时刻两相坐标系下电流的估计值:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha(k) \\ i_\beta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_\alpha(k) \\ F_\beta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_\alpha(k) \\ \alpha_\beta(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha(k) \\ v_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

然而,先前的方法大多数考虑 F 的估计,而给定 α 为一个固定值,这一值的选取依赖于系统先验信息因而降低了整个算法的鲁棒性,而下一小节要介绍的基于RLS的参数辨识方法可以同时

估计 α 和 F ,从而解决这一问题。

2.2 基于RLS的无模型预测控制方法

为了使用RLS方法对模型参数进行估计,对式(8)进行改写,令 $\theta = [\alpha \ F]^T$ 表示系统的参数矩阵, $\varphi = [v \ 1]^T$ 为输入矩阵,则有:

$$y = \varphi^T \theta \quad (11)$$

使用基于RLS的方法可以直接对参数矩阵 θ 进行估计,其计算公式如下式所示:

$$\begin{cases} \hat{i}_k = i_{k-1} + \varphi_k^T \hat{\theta}_{k-1} \\ K_k = P_{k-1} \varphi_k (\varphi_k^T P_{k-1} \varphi_k + \lambda)^{-1} \\ P_k = \frac{1}{\lambda} (I - K_k \varphi_k^T) P_{k-1} \\ \hat{\theta}_k = K_k (i_k^* - \hat{i}_k) + \hat{\theta}_{k-1} \end{cases} \quad (12)$$

式中: \hat{i}_k 为上一时刻对本时刻电流的估计值; K_k 为中间变量; λ 为取值在0~1之间的遗忘因子,其值越大,表示对于过去时刻的信息的权重越大; P_k 为系统的协方差矩阵。

如式(12)所示,该算法利用上一时刻的估计值与当前时刻真实值的误差对估计的参数进行更新。其收敛性已经在之前的工作中被证明。

在实际系统中,当前时刻控制器计算的值可能会延迟一拍到达,因此需要对控制算法加入延时补偿,即在 k 时刻预测 $k+2$ 时刻的电流值并以此为依据对下一时刻作用的开关状态进行选择,如下式所示:

$$i(k+2) = i(k+1) + F(k) + \alpha(k)v(k+1) \quad (13)$$

式中: $v(k+1)$ 为上一时刻计算出的输入电压的大小。

在预测得到电流后,需要将其代入评价函数对电压矢量进行滚动寻优,式(7)所示原先的评价函数含有权重因子,对其的选择可能会增加额外的计算量,因此接下来使用顺序预测的方法对其中的权重因子进行消除。

首先将系统的评价函数拆分为含有单个目标的多个评价函数,对式(7)进行拆分得到以下两式:

$$J_{01} = |i^*(k+1) - i(k+1)| \quad (14)$$

$$J_{02} = |v_n(k+1)| \quad (15)$$

两个评价函数分别代表参考电流追踪目标以及中点电位平衡目标,在滚动寻优时,传统方法考虑对单个目标函数进行计算并且一次求出结果,而本方法分步对两个目标函数进行计算。首先将候选的27个电压矢量代入式(14),将其结

果进行排列,接着选取使得式(14)评价函数最小的10个电压矢量,代入式(15)计算下一评价函数的值,并且选取其中的最小值作为最优电压矢量,在下一时刻作用于系统。由此,电压矢量的选取如图3所示。

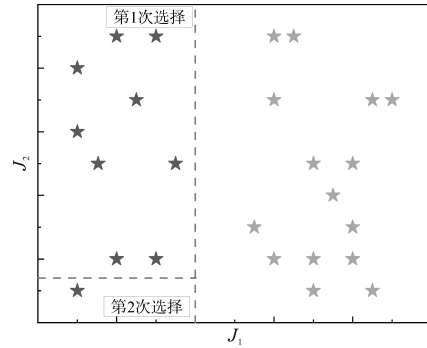


图3 多目标顺序预测最优开关状态选择

Fig.3 Multi-objective sequential optimal vector choice

由前面的描述可以给出本文提出的无模型预测控制算法流程如图4所示,利用输入输出数据的计算能够保证算法的鲁棒性,在获得参数的估计值之后进一步采用顺序预测的方法消除评价函数中的权重因子,能够避免权重因子选择的复杂性以及可能带来的误差,结合算法实现流程,所提方法的算法框图如图5所示。

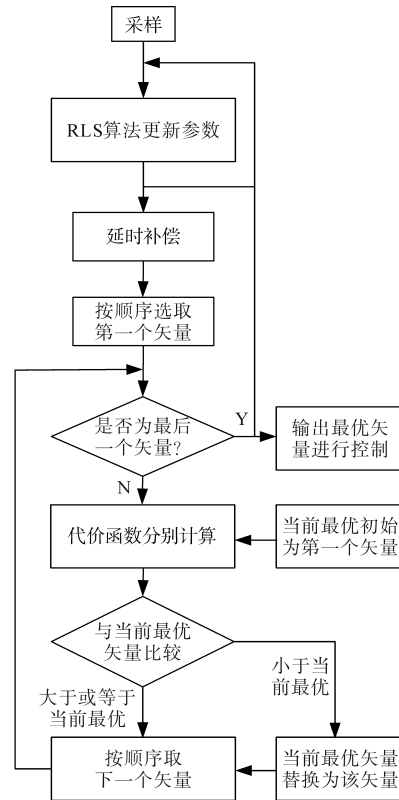


图4 无模型预测控制流程图

Fig.4 Flowchart of model-free predictive control method

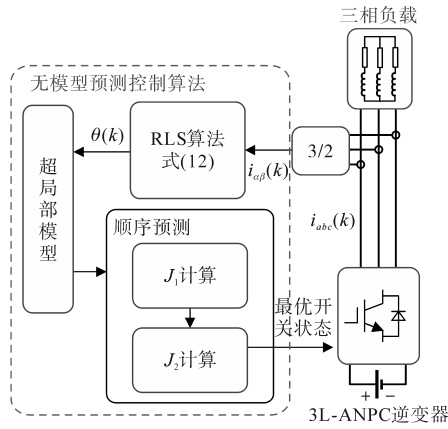


图5 所提的基于RLS的顺序模型预测控制方法框图
Fig.5 Structure of proposed RLS-based sequential MPC

3 仿真分析

为了全面评估本文提出控制策略的性能,首先在 Matlab/Simulink 中对具有图1所示拓扑结构的3L-ANPC进行仿真,仿真参数如表1所示。

表1 系统参数选取

Tab.1 System parameters

参数	数值	参数	数值
采样周期 $T_s/\mu\text{s}$	100	负载电阻 R_g/Ω	2
交流频率 f/Hz	50	遗忘因子 λ	0.92
直流电压 V_{dc}/V	200	参考电流幅值 I_{ref}/A	12
直流侧电容 $C_{dc}/\mu\text{F}$	2 700	传统算法权重因子 θ_n	1
负载电感 L_g/mH	10		

3.1 参数匹配下的性能分析

为了更好地证明本文提出方法的估计能力,首先在参数匹配的场景下进行实验,并且与相同情况下的传统MPC算法进行对比。

对遗忘因子进行选取是其中的一个重要问题,在仿真条件下,对遗忘因子在不同值时的系统性能进行分析,以估计值与实际值的平均误差 ε 以及三相平均总谐波畸变率THD为指标,得到结果如图6所示,由图可看出在仿真情况下, λ 的

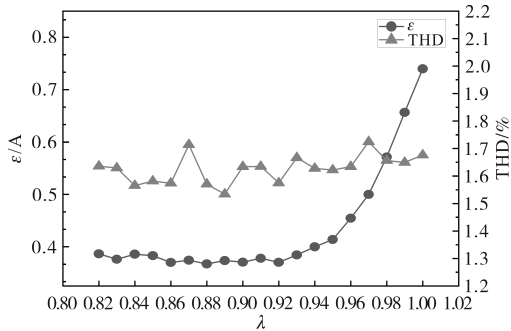


图6 平均估计误差和THD随遗忘因子 λ 变化图
Fig.6 Graph of the average estimation error and THD versus the forgetting factor λ

值在0.9附近继续增加时,总误差会迅速升高,而THD变化较小,而当 λ 更小时,估计的参数会因波动较大而可信度较低,因此本节选取 $\lambda=0.9$ 进行仿真研究。

在对遗忘因子进行正确选取后,本文在上述情况下对提出的新型无模型预测控制算法以及传统的模型预测控制方法进行了研究与对比,并分别对两种方法的平均总谐波失真和三相电流跟踪误差进行了测量计算,结果如图7和图8所示,其中从上到下分别是三相电流波形以及电流跟踪误差波形。

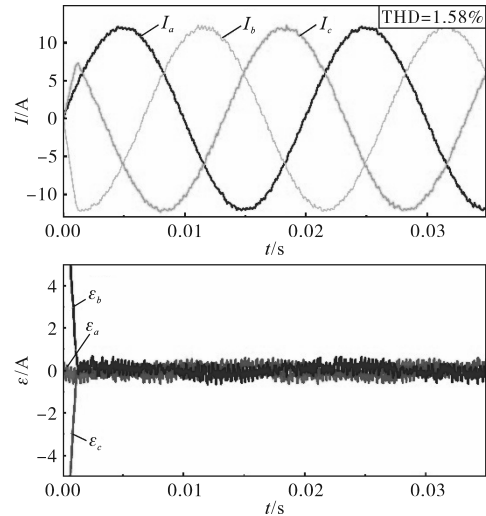


图7 传统MPC方法在参数匹配下的电流波形和三相误差
Fig.7 Current waveforms and the three-phase error of conventional MPC method under matched parameters

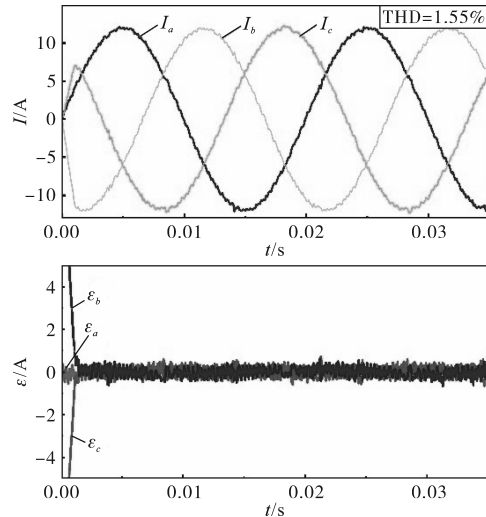


图8 所提方法在参数匹配下的电流波形和三相误差
Fig.8 Current waveforms and the three-phase error of proposed method under matched parameters

从图7、图8中可以看出,在参数匹配的情况下,两种方法的估计效果相差较小,所提方法在电流峰值处有一定抖动,这是由于估计值与实际

值之间仍存在一定误差导致,但是在误差和THD上两者结果相差不大,这也证明了所提方法的准确性,能够在不使用先验信息、并且避免了权重因子的选取的情况下与参数完全匹配的传统算法获得相近的效果。

3.2 参数失配下的性能分析

如前所述,传统MPC的一个缺点在于对精确模型的依赖性,为了研究本方法在模型参数失配下的鲁棒性,在对控制器中的信息不进行任何修改的情况下,改变系统参数,分别用两种方法在 $L_g=5\text{ mH}$, $R_g=1\ \Omega$ 的情况下进行实验,得到波形如图9,图10所示。

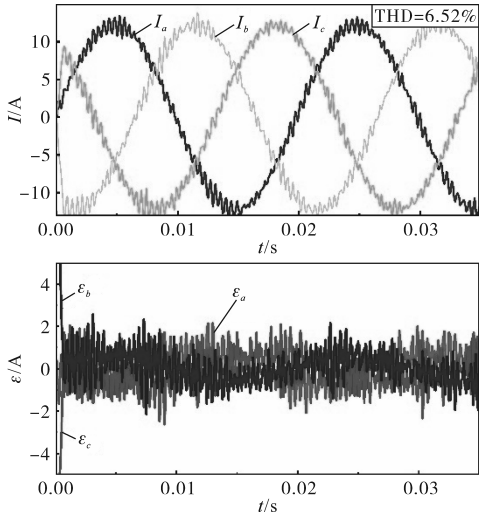


图9 传统方法在参数失配下的电流波形和三相误差
Fig.9 Current waveforms and the three-phase error of conventional MPC method under mismatched parameters

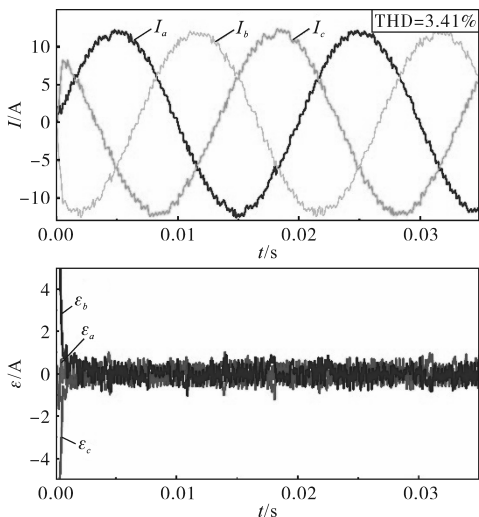


图10 所提方法在参数失配下的电流波形和三相误差
Fig.10 Current waveforms and the three-phase error of proposed method under mismatched parameters

如图9所示,正如前面所说,在参数失配情况下,由于依赖的模型精确度降低,传统方法的电

流预测误差大幅增加,且THD增加到了6.52%,控制效果变差较多。相比之下,图10中结果表明,所提方法表现出了较强的鲁棒性,误差波动远小于传统方法,且THD保持为3.41%,与 $L_g=10\text{ mH}$ 时的THD变化主要由于电感的滤波效应降低,而保持本方法控制效果的主要原因是其预测是基于I/O数据而不是依赖系统先验模型。

进一步的,为了确保实验的普遍性,本节在 L_g, R_g 分别失配不同程度的情况下进行了仿真研究,测量25个周期内的跟踪误差平均值,结果如图11所示。可以看出,在 L_g, R_g 变化较小、参数接近真实值时,MPC有较好效果,与本文提出方法达到的THD和误差接近,而当电感参数变化较大时,传统方法的效果下降较快,而本文提出的无模型方法在不同的参数失配程度下均保持了较低的THD和误差,具有较强的鲁棒性。

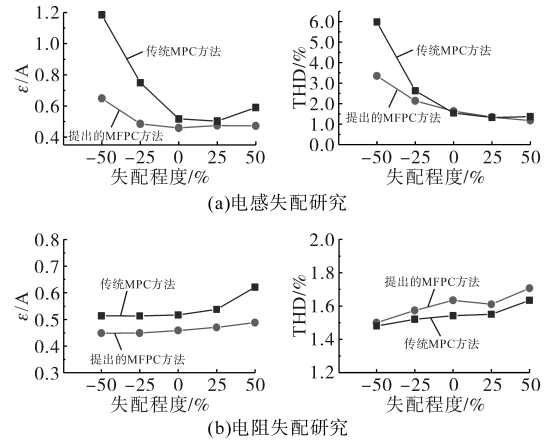


图11 两种方法在参数不同程度的失配下效果对比
Fig.11 Comparative study of two methods under mismatched parameters

最后,为了验证顺序预测在消除权重因子问题上的有效性,在式(7)权重因子选取分别为0.1,1,10时进行仿真,记录各个状态下平均中点电位误差和THD,如表2所示。

表2 权重因子影响分析

Tab.2 Analysis of weighting factors

条件	中点电位误差/V	THD/%
$\theta_n=0.1$	0.101	1.40
$\theta_n=1$	0.103	1.43
$\theta_n=10$	0.095	1.41
顺序预测	0.090	1.49

由表2可知,顺序预测在避免了选取权重因子的同时,能够在平衡中点电位上取得较好效果,且对算法性能的影响不大。

4 结论

本文介绍了一种新型无模型顺序预测控制方法,通过结合超局部模型和RLS参数估计方法,消除了传统MPC的模型依赖性,在参数失配情况下仍具有较为精确的电流跟踪效果。并且结合顺序预测方法,消除权重因子的同时取得了较好的中点电位平衡以及预测效果。本预测方法具有普遍性,能够作用于两电平、多电平逆变器中。在未来研究中,可以利用本方法对更加复杂的系统进行控制,另外,对本方法的改进可以从遗忘因子改进、增加学习率等方面进行考虑。

参考文献

- [1] 何湘宁,陈阿莲. 多电平变换器的理论和应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
HE Xiangning, CHEN Alian. Theory and application technology of multilevel converters[M]. Beijing :China Machine Press, 2006.
- [2] RODRIGUEZ J, LAI J S, PENG F Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.
- [3] 王琛琛,李永东. 多电平变换器拓扑关系及新型拓扑[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 92-99.
WANG Chenchen, LI Yongdong. Multilevel converter topologies and two novel topologies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 92-99.
- [4] 刘影. 三电平 ANPC 逆变器模型预测控制[D]. 合肥:安徽大学, 2018.
LIU Ying. Research on three-level active neutral point clamped inverter based on model predictive control[D]. Hefei: Anhui University, 2018.
- [5] WANG K, XU L, ZHENG Z D, et al. Capacitor voltage balancing of a five-level ANPC converter using phase-shifted PWM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1147-1156.
- [6] RODRIGUEZ J, CORTES P. Predictive control of power converters and electrical drives[M]. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2012.
- [7] KHALILZADHE 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.
- [8] LIN C K, LIU T H, YU J T, et al. Model-free predictive current control for interior permanent-magnet synchronous motor drives based on current difference detection technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 677-681.
- [9] YANG H, ZHANG Y, SHEN W. Predictive current control and field-weakening operation of SPMSM drives without motor parameters and dc voltage[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 5635-5646.
- [10] LIN C K, YU J T, LAI Y S, et al. Improved model-free predictive current control for synchronous reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3942-3953.
- [11] CARLET P G, TINAZZI F, BOLOGNANI S, et al. An effective model-free predictive current control for synchronous reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3781-3790.
- [12] JIANG M, CHENG Z, XU Z. Finite control set model-free predictive current control based on ultra local model and RLS algorithm for PMSM[C]//IEECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2023: 1-6.
- [13] LIU X, QIU L, WU W, et al. Event-triggered ESO-based robust MPC for power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 2144-2152.
- [14] LIU X, QIU L, WU W, et al. Predictor-based neural network finite-set predictive control for modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 16121-16127.
- [15] LIU X, QIU L, RODRIGUEZ J, et al. Data-driven neural predictors-based robust MPC for power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 11661-11661.
- [16] WU W, QIU L, LIU X, et al. Dynamic-linearization-based predictive control of a voltage-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 3275-3284.
- [17] JIN N, CHEN L, GUO Y, et al. Double-vector model-free predictive control method for voltage source inverter with visualization analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10): 10666-10708.
- [18] SCOTTOCK T, GEYER T, MADAWALA U K. Model predictive direct power control for grid-connected capacitors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5319-5328.

收稿日期:2024-06-20

修改稿日期:2024-10-11