

模型参数扰动对模型预测控制的影响分析

郭丽娜, 索娜

(郑州铁路职业技术学院 电气工程学院, 河南 郑州 454000)

摘要: 由于模型参数不匹配对有限集模型预测控制(FCSMPC)的控制性能存在影响, 对此提出了一种分析方法, 用于研究模型参数扰动对FCSMPC的影响, 其中研究对象为三相逆变器的模型预测电流控制。分析结果显示, 预测误差不仅取决于参数不匹配, 还取决于当前负载电流和逆变器输出电压的瞬时值。结合传统线性电流控制器, 对模型中负载电阻和电感参数扰动对FCSMPC的影响开展了实验研究, 结果表明参数扰动对FCSMPC稳态控制性能影响显著, 但FCSMPC的瞬态响应受参数扰动的影响较小, 优于传统的线性电流控制器。

关键词: 三相逆变器; 有限集模型预测控制; 电流控制; 参数扰动

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21036

Analysis of Influence for Model Parameter Disturbance on Model Predictive Control

GUO Lina, SUO Na

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College,
Zhengzhou 454000, Henan, China)

Abstract: Since the model parameter mismatch had an impact on the control performance of finite-control-set model predictive control (FCSMPC), an analytical method was proposed to research the influence of model parameter perturbation on FCSMPC. And the research object was the model predictive current control of the three-phase inverter. The analysis results show that the prediction error not only depends on the parameter mismatch, but also depends on the instantaneous value of the current load current and the inverter output voltage. Experimental research on the influence of load resistance and inductance parameter disturbance on FCSMPC in the model was carried out in combination with the traditional linear current controller. The results show that the parameter disturbance has a significant influence on the steady-state control performance, but the transient response is less affected by the parameter disturbance, which is superior to traditional linear current controllers.

Key words: three-phase inverter; finite-control-set model predictive control (FCSMPC); current control; parameter disturbance

近年来,模型预测控制在电力电子与电力传动领域得到了广泛的关注^[1-2],应用场景包括电机驱动^[3]、逆变器^[4]、电力电子变压器^[5]和矩阵变换器^[6]等。通常,根据产生控制功率开关的脉冲控制信号的不同,模型预测控制技术可分为两类,一类利用预测算法产生连续输出作为调制参考,进而基于脉宽调制(pulse width modulation, PWM)模块生成固定开关频率的脉冲控制信号^[7],而另一类模型预测控制直接剔除PWM模块,使用有限的开关状态进行成本函数评估,选择最优开关状态进行输出即可,故也称为有限集模型预

测控制(finite control set model predictive control, FCSMPC)^[8]。

FCSMPC的优点主要体现在具有快速的动态响应、实现简单以及可直接处理非线性和多目标约束等^[9]。但直接使用系统模型来选择最优控制输出会存在建模误差或参数变化使控制性能发生变化的缺点。因此,误差分析仍是FCSMPC研究中的一个重点问题^[10]。此外,由于FCSMPC的非线性特性,使得线性系统中相关参数扰动的评估分析方法不再适用。有文献通过研究FCSMPC在不确定情景下的行为,从而基于经验评估了模

基金项目: 河南省教育科学“十三五”规划2020年度一般课题(2020YB0547)

作者简介: 郭丽娜(1981—),女,硕士,讲师,Email: glna8118@163.com

型参数不匹配对控制性能的影响,这些研究涉及的应用对象包括整流器^[11]、三相电压源型逆变器^[12]和电机驱动变频器^[13]等。文献[14]对电感参数变化进行了定性分析,并推演出指南以指导减少电感参数不匹配对控制性能影响。而对于负载电阻参数的不确定性,通常将其对FCSMPC运行的影响进行忽略^[14-15]。文献[16]则是关注了负载参数不匹配下对FCSMPC控制性能的影响,并设计了改进方案,但其运算量大、对系统处理器要求较高。上述这些研究主要还是集中在定性分析层面,没有深入探究参数扰动对FCSMPC运行的影响。此外,研究手段也是主要依靠经验来对参数扰动的影响进行评估。本文通过数学推导,得到模型参数扰动对FCSMPC控制性能影响的解析表达式,进而可实现模型参数扰动对FCSMPC控制性能影响的定量评估。其中研究对象为三相逆变器的模型预测电流控制器。最后,基于实验验证了研究结果。

1 逆变器系统模型和FCSMPC方案

下面引出逆变器数学模型及对应的FCSMPC。同时,为了对比,也对传统基于空间矢量调制和PI控制器的线性电流控制方案进行了回顾。

1.1 逆变器数学模型

图1为三相逆变器的电路模型。

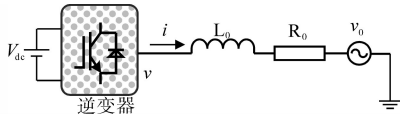


图1 三相逆变器的电路模型

Fig.1 Circuit model of three-phase inverter

由图1可得三相逆变器的动态模型表述为

$$\mathbf{v} = R_0 \mathbf{i} + L_0 \frac{d}{dt} \mathbf{i} + \mathbf{v}_0 \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{v} = [v_a \ v_b \ v_c] \quad \mathbf{i} = [i_a \ i_b \ i_c]$$

式中: $\mathbf{v}$ 为逆变器输出电压矢量; v_a, v_b, v_c 分别为逆变器三相输出电压; $\mathbf{i}$ 为逆变器输出电流矢量; i_a, i_b, i_c 分别为逆变器三相输出电流; L_0, R_0 分别为电感和电阻; $\mathbf{v}_0$ 为电压源矢量。

三相两电平逆变器具有6个非零电压矢量和2个零电压矢量。此外,式(1)可扩展至具有任意电平数和不同相数的逆变器,仅对应逆变器拓扑而改变输出电压矢量即可。另一方面,式(1)中的数学模型即可表示逆变器带交流电机负载或逆变器并网,前者电感和电阻元件即代表定子或转

子等效电感和电阻参数,电压源矢量对应于电机反电动势;而后者电感和电阻元件对应为滤波器 and 线路阻抗建模,电压源矢量则代表电网电压。设采样周期为 T_s ,使用前向欧拉方法进行离散化,可得到离散模型如下:

$$\mathbf{i}^{k+1} = (1 - T_s \frac{R_0}{L_0}) \mathbf{i}^k + \frac{T_s}{L_0} (\mathbf{v}^k - \mathbf{v}_0^k) \quad (2)$$

式中:上标“ k ”为第 k 个采样周期; $\mathbf{i}^k$ 为在第 k 个采样周期预测的电流值; $\mathbf{i}^k, \mathbf{v}_0^k$ 分别为在第 k 个采样周期测量的电流值及负载电压源的电压值; $\mathbf{v}^k$ 为在第 k 个采样周期输出的电压矢量。

1.2 FCSMPC算法

FCSMPC算法执行时,在每个采样周期将计算选择要应用于逆变器的最优开关状态组合进行输出。这是通过系统数学模型来预测和比较每个有效控制动作的行为来实现的,这些动作即是逆变器的输出电压矢量状态。预测通常可在一个或多个采样周期范围内进行,当选择两步长预测时,意味着在第 $(k+2)$ 个采样时刻进行评估预测,这样做的优点在于可以补偿预测控制器中数字化实现所带来的不可避免的计算延迟。完成预测后,根据所需的控制目标和约束设计定义成本函数并应用于该组预测,并评估各个控制动作,以选择最优电压矢量输出。本文使用的成本函数旨在实现负载电流参考值跟踪,如下式所示:

$$g_{\text{FCS}} = e_{\alpha}^{k+2} + e_{\beta}^{k+2} \quad (3)$$

其中 $e_{\alpha}^{k+2} = i_{\alpha}^{*,k+2} - i_{\alpha}^{k+2}$ $e_{\beta}^{k+2} = i_{\beta}^{*,k+2} - i_{\beta}^{k+2}$

式中: $e_{\alpha}^{k+2}, e_{\beta}^{k+2}$ 分别为 α, β 轴第 $(k+2)$ 个采样周期下的负载电流跟踪误差预测值; $i_{\alpha}^{*,k+2}, i_{\beta}^{*,k+2}$ 分别为 α, β 轴负载电流在第 $(k+2)$ 个采样周期下的参考值; $i_{\alpha}^{k+1}, i_{\beta}^{k+1}$ 分别为 α, β 轴负载电流在第 $(k+2)$ 个采样周期下的预测值。

通过对式(2)迭代即可得到:

$$\mathbf{i}^{k+2} = (1 - T_s \frac{R_0}{L_0}) \mathbf{i}^{k+1} + \frac{T_s}{L_0} (\mathbf{v}^{k+1} - \mathbf{v}_0^{k+1}) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{v}^{k+1}$ 为在执行预测算法期间评估的电压矢量。此外,由于采样频率远高于负载电压源 $\mathbf{v}_0$ 的工作频率,故负载电压源矢量在连续采样时刻之间可认为是恒定的,即 $\mathbf{v}_0^{k+1} \approx \mathbf{v}_0^k$ 。

1.3 线性电流控制方案

为了评估建模中参数扰动对FCSMPC控制性能的影响,将FCSMPC方案与基于空间矢量调制和PI控制器的线性电流控制方案进行比较。线性电流控制器在同步旋转 $d-q$ 坐标系中实现,可

实现零稳态误差,同时可通过设置前馈项剔除由电感引起的交叉耦合效应。

在s域中PI控制器的传递函数如下:

$$C(s) = K_p \frac{1 + sK_i}{sK_i} \quad (5)$$

式中: $C(s)$ 为PI控制器的传递函数; K_p, K_i 分别为比例和积分系数。

对PI参数的设定问题,文献[17]依据系统动态和延迟所带来的约束下尽可能地扩展闭环系统带宽的原则进行参数选择,称为幅值最优参数整定流程。采用此流程整定参数的线性电流控制方案可与FCSMPC方案进行合理对比,因为FCSMPC具有较为快速的动态响应。为了整定线性电流控制器参数,考虑标称负载参数 R_0 和 L_0 所对应的动态特性后设置积分系数 $K_i=L_0/R_0$,此时控制器的零点将抵消来自模型中的主极点。进一步设置比例系数 $K_p=L_0/(2T_0)$, T_0 为调制和控制算法数字实现引入的等效延迟,该延迟可近似为 $T_0=1.5T_{SVM}$, T_{SVM} 为空间矢量调制算法中的采样周期。

如上所述,线性电流控制方案的设计过程也是取决于模型参数。因此,参数不确定性的存在也将影响线性控制器的性能。就稳态性能而言,线性电流控制中的积分项将考虑到负载参数的变化,从而获得零稳态误差,但负载参数与其标称值不同时,控制器设计的零极点对消不再成立,这将引起闭环响应中更高阶动态的出现,从而恶化动态响应。

2 模型参数扰动对FCSMPC的影响分析

为了分析参数值与实际系统之间不匹配所带来的影响,首先设置标称负载参数 R_0 和 L_0 上的施加扰动为 $\tilde{R}$ 和 $\tilde{L}$,从而实际电感和电阻负载值为 $R=R_0+\tilde{R}$ 和 $L=L_0+\tilde{L}$,将其代入式(2),并引入电压变量 $v_\Delta^k = v^k - v_0^k$,可得到修正后的预测方程为

$$\tilde{i}^{k+1} = [1 - \frac{(R_0 + \tilde{R})T_s}{L_0 + \tilde{L}}] \tilde{i}^k + \frac{T_s}{L_0 + \tilde{L}} v_\Delta^k \quad (6)$$

式中: $\tilde{i}^{k+1}$ 为受参数变化影响的下一个采样周期的电流预测值。

在下述分析中,为了使表达式更为简单和紧凑,只分析一步预测的情形,但分析结果可扩展到具有两步预测的情况。

定义预测误差如下:

$$\Delta = i^{k+1} - \tilde{i}^{k+1} \quad (7)$$

式中: Δ 为预测误差,代表了无参数扰动模型预测的电流值与含参数扰动的模型预测的电流值之间的差值。

将式(2)和式(6)代入到式(7)中可得:

$$\Delta = \frac{T_s}{L_0(L_0 + \tilde{L})} [(\tilde{R}L_0 - R_0\tilde{L})i^k + \tilde{L}v_\Delta^k] \quad (8)$$

基于式(8)可计算出由于模型参数扰动量 $\tilde{R}$ 和 $\tilde{L}$ 的任何取值组合而导致的预测误差。预测误差 Δ 也和 i^k 相关,而后者是在FCSMPC算法的第 k 个采样周期测量得到的。同时,预测误差 Δ 还取决于电压变量 v_Δ^k ,而这不受负载电感和电阻值变化的影响。对于逆变器输出电压矢量 v^k ,其仅取决于逆变器的开关状态及其直流侧电压。综上,预测误差不依赖于上一个步长的预测误差,故具有非累积性质。

值得注意的是,式(8)所描述的预测误差是复矢量,其取决于负载电流 i^k 和电压变量 v_Δ^k 的瞬时值。而 v_Δ^k 为逆变器输出电压和负载电压源之间的电压差,在每个采样周期内,负载电压源保持恒定,但存在多个逆变器输出电压需要评估,故对应也会产生不同的预测误差。

本文中研究对象为两电平三相逆变器,其在每个采样周期内总共有7个不同的有效输出电压矢量。这使得当电压和电流矢量的幅值大小与在复平面中的相对位置不同,以及负载电阻和电感参数的扰动不同,会出现较多的预测误差情形。为了限制预测误差分析的类别,将 v_Δ^k 设置为固定幅值,且将其与瞬时电流矢量的相角固定为 π ,选择该相角是因为其将使预测误差保持一个较大的值。

图2为根据要求设置 v_Δ^k 后,负载电感参数和负载电阻参数发生扰动时对应的预测误差变化曲线,其中纵坐标为预测误差幅值 $|\Delta|$ 和无参数扰动预测电流 i^k 之间的比值。由图2所示,当 $L/L_0=1$ 且 $R/R_0=1$ 时对应无参数扰动预测。此外,预测误差变化趋势对应负载电感参数的变化是不对称的:对于 $L/L_0<1$ 的实际电感对预测误差的影响明显比在 $L/L_0>1$ 的情况更为严重,且对应不同电阻参数扰动下均有此规律,同时预测误差随着 R/R_0 的增加而增加。这个结论揭示了当预测模型中高估负载电感参数时,预测误差将显著恶化。

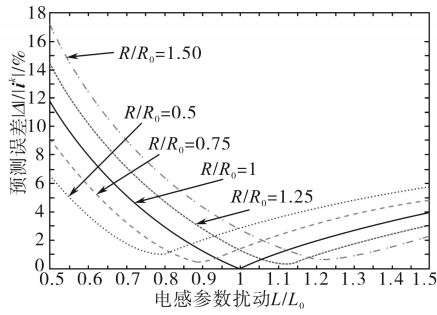


图2 负载参数扰动时的预测误差变化曲线

Fig.2 Prediction error curves with load parameters disturbance

从式(8)还可以推导出,不仅参数不确定性对预测误差有影响,同时对负载电流 i^k 和电压变量 v_Δ^k 的瞬时值也有影响。由于逆变器输出的电压矢量的幅度是固定的,且负载电压源也是缓慢变化的干扰,因此进一步可以分析当矢量间相角变化时的预测误差变化趋势。

图3为3种参数扰动情况下 $|\Delta i|$ 与 $|i^k|$ 的比值随矢量间相角 θ 变化而变化的趋势。从图3可观察到,当2个矢量间相角接近于 π 时,即两者彼此方向相反时,将出现最大预测误差,这也是图2分析中考虑相角为 π 的原因,同时当 $L/L_0=0.5$ 和 $R/R_0=1.5$ 时也是对应图2中最高预测误差的组合,产生的 $|\Delta i|/|i^k|$ 约为18%。同时,当 $L/L_0=1.5$ 和 $R/R_0=0.5$ 时, $|\Delta i|/|i^k|$ 的变化趋势也是钟形曲线,顶点的相角也是 π 。在预测模型中设置精确的电感参数,即 $L/L_0=1$ 的情况下,预测误差对 i^k 和 v_Δ^k 间的相角变化不敏感,这也印证了在式(8)中,是 $\tilde{L}$ 将逆变器输出电压矢量与预测误差关联起来的。

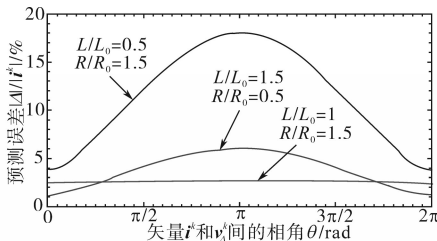


图3 矢量相角变化时的预测误差变化曲线

Fig.3 Prediction error curves with vector phase angle changed

3 实验验证

为了验证上述模型参数扰动对FCSMPC算法的影响分析,搭建了如图4所示的实验平台,开展了相关实验以说明负载电阻和电感参数扰动对FCSMPC控制性能的影响。实验采用了FCSMPC控制方案与线性电流控制方案对比的方式进行。图4中主要的实验装置包括一台型号为丹佛斯

VLT5008的电压源型三相逆变器、三相阻感负载、dSPACE1103实时仿真系统和上位机。其中FCSMPC算法和线性控制算法均基于dSPACE1103实时控制器实现。线性电流控制器中空间矢量调制模块的采样周期 $T_{SVM}=250\mu s$,故FCSMPC控制器中的采样周期设置为 $T_s=50\mu s$,这使得在标称负载参数条件下获得的平均开关频率与线性电流控制器相当。实验系统其他主要参数为:直流侧电压 $V_{dc}=100V$,直流链路电容 $C_{dc}=2400\mu F$,逆变器额定输出电流 $i_{norm}=5.5A$,额定频率 $f_{norm}=50Hz$,标称负载电阻 $R_0=10\Omega$,标称负载电感 $L_0=10mH$,负载反电动势幅值 $V_{EM}=2V$,负载反电动势频率 $f_{EM}=50Hz$,采样周期 $T_s=50\mu s$ 。

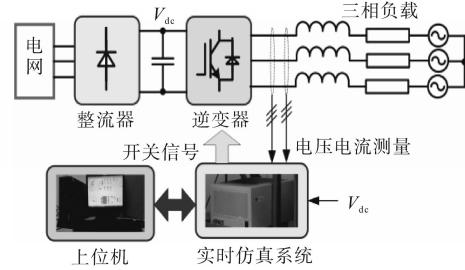


图4 实验装置构成

Fig.4 Composition of experimental devices

3.1 负载参数扰动下的稳态性能分析

首先,基于实验平台进行了稳态实验,FC-SMPC控制器中的电感参数设置为 $L_0=10mH$,而实际负载电感分别设置为5mH,10mH和15mH。实验中设置不同的电流参考值,并同时进行了线性电流控制器的测试。图5为负载电感参数误差下的实验结果汇总。

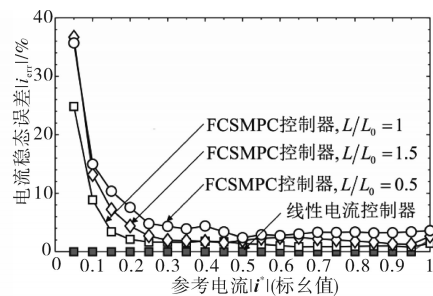


图5 负载电感参数误差下的实验结果汇总

Fig.5 Summary of experimental results under load inductance parameter error

由图5可知,线性电流控制器能够在所有测试条件下实现零稳态误差,这是因为其设置了积分项。另一方面,FCSMPC控制器在 $|i^*|$ 低于0.2(标么值)时具有更大的稳态误差,即使实际负载电感参数与模型参数保持一致,这是因为FC-

SMPC控制器中仅仅将电流跟踪作为控制目标导致的。此外,负载电感参数误差对预测控制器的稳态误差有一定的影响,并在实际电感值低于模型中电感值的情况下趋于严重。

与负载电感扰动类似,将FCSMPC控制器中的电阻参数设置为 $R_0=10\ \Omega$,而实际负载电阻分别设置为 $5\ \Omega$, $10\ \Omega$ 和 $20\ \Omega$ 进行了第二组测试,实验结果如图6所示。图6实验结果显示,与负载电感参数扰动情况不同,当 $R/R_0=2$ 且参考电流增大时,线性电流控制器出现饱和导致了较大的稳态误差,但对应FCSMPC在此种情况下具有更小的稳态误差,因为其受线性调制范围限制。同时类似于电感参数扰动,FCSMPC的稳态误差也受电阻参数扰动的影响,并在参考电流较小的情况下更为严重。

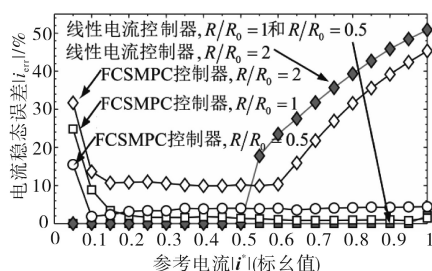


图6 负载电阻参数误差下的实验结果汇总

Fig.6 Summary of experimental results under load resistance parameter error

进一步设置两组负载参数扰动,即 $L/L_0=1.5$ 和 $R/R_0=2$,以及 $L/L_0=0.5$ 和 $R/R_0=0.5$,进行输出电流总谐波含量 i_{THD} 的对比分析,结果如图7所示。

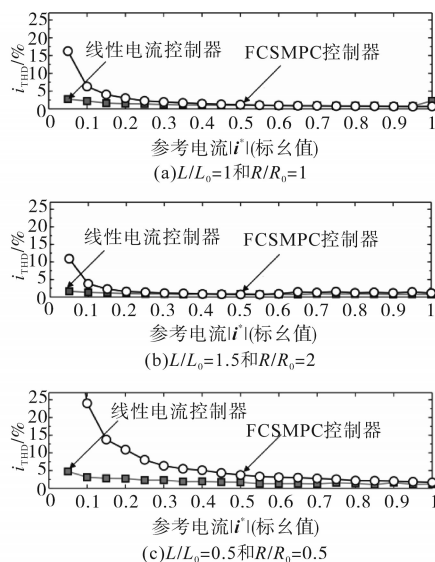


图7 负载参数扰动下的电流谐波分析

Fig.7 Current harmonic analysis under load parameters disturbance

图7中,负载参数扰动对FCSMPC控制器和线性电流控制器的稳态谐波控制性能均有负面影响,因为负载电阻和电感参数决定了负载电流的动态特性,从而影响了与谐波含量密切相关的纹波特性。图7a为 $L/L_0=1$ 和 $R/R_0=1$ 时,即参数准确的情况下逆变器输出电流参考值不同时的 i_{THD} ,图7b为 $L/L_0=1.5$ 和 $R/R_0=2$ 时,即建模参数偏小的情况下的 i_{THD} 分布,对比两者可看出,实际负载参数大于模型参数时,输出电流THD是减小的。图7c为 $L/L_0=0.5$ 和 $R/R_0=0.5$ 时,即建模参数偏小的情况下的 i_{THD} 分布,对比图7b可看出,两种控制器的输出电流THD都将显著增大。

3.2 负载参数扰动下的动态性能分析

完成稳态性能分析后,进一步通过实验对负载参数扰动下的动态性能进行分析。实验中具体操作步骤是首先将控制器中电感参数设置为 $L=10\text{ mH}$, $L=15\text{ mH}$, $L=5\text{ mH}$,实际电感参数为 $L_0=10\text{ mH}$,故一共设计了 $L/L_0=1$, $L/L_0=1.5$ 和 $L/L_0=0.5$ 三组实验,每组实验均采用FCSMPC控制器和传统线性电流控制器对比的方式进行,而动态则是通过在控制器软件中设置电流参考 i_a^* 由原来的0.05(标么值)在 $t=0.06\text{ s}$ 时阶跃变化至0.4(标么值)实现的。

图8、图9分别为FCSMPC控制器和传统线性电流控制器在不同负载电感参数扰动下的a相参考电流 i_a 阶跃动态响应结果。由于实际电感参数对电流滤波特性有很大影响,故图8c和图9c中的电流纹波较大,同时FCSMPC控制器更为明显。如前述分析,当建模电感参数大于实际负载电感时,FCSMPC的预测误差将受到更大影响,图8c中的实验结果也证实了这一论述。尽管随着负载电感参数的扰动,FCSMPC出现了明显的电流纹波,但FCSMPC的动态响应基本不受影响。但根据图9所示的实验结果显示负载电感参数的扰动对线性电流控制器的动态响应造成了不利影响,这是因为线性电流控制器的控制参数是基于负载参数整定的。综上,图8、图9实验波形表明,FC-SMPC控制器和传统线性电流控制器相比,在涉及负载电感参数较大扰动,即 $L/L_0=0.5$ 时,FC-SMPC出现了明显的电流纹波,即谐波增多、稳态性能欠佳,其原因是实际电感值低于模型中电感值的情况下,FCSMPC控制器每个步长的预测误差偏大,从而在成本函数计算时,有一定的概率没有得到最优的电压矢量进行输出,从而造成了

谐波性能下降。但是FCSMPC控制器的动态性能并没有受到影响,反之传统线性电流控制器在涉及负载电感参数较大扰动时,电流纹波较小,即谐波增加不明显,但是动态性能受到影响。

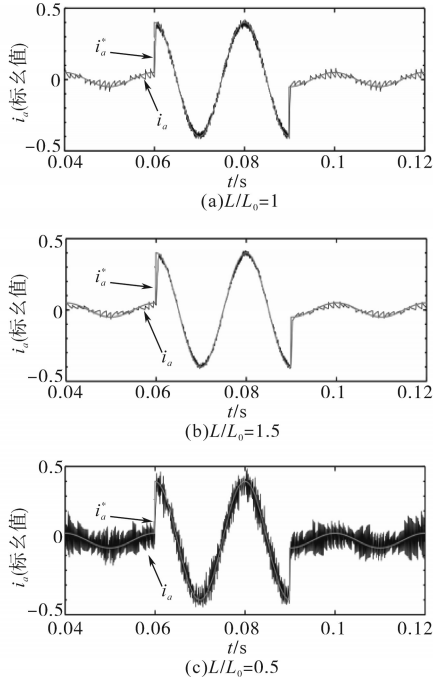


图8 负载电感参数扰动下的动态响应(FCSMPC控制器)
Fig.8 Dynamic response under disturbance of load inductance parameters (FCSMPC controller)

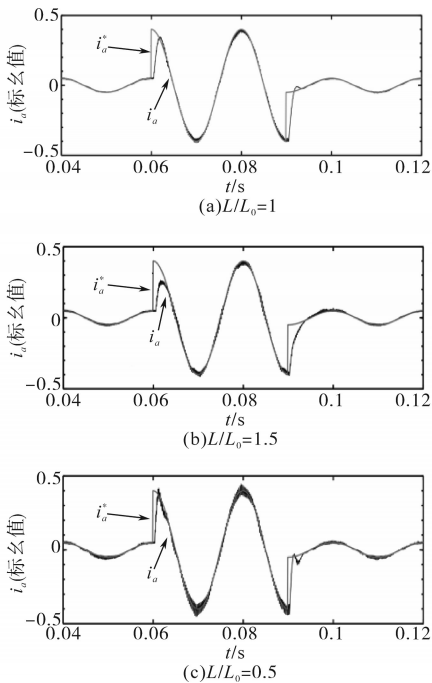


图9 负载电感参数扰动下的动态响应(线性电流控制器)
Fig.9 Dynamic response under disturbance of load inductance parameters (linear current controller)

图10、图11分别为FCSMPC控制器和传统线性电流控制器在不同负载电阻参数扰动下的a相

参考电流阶跃动态响应结果。

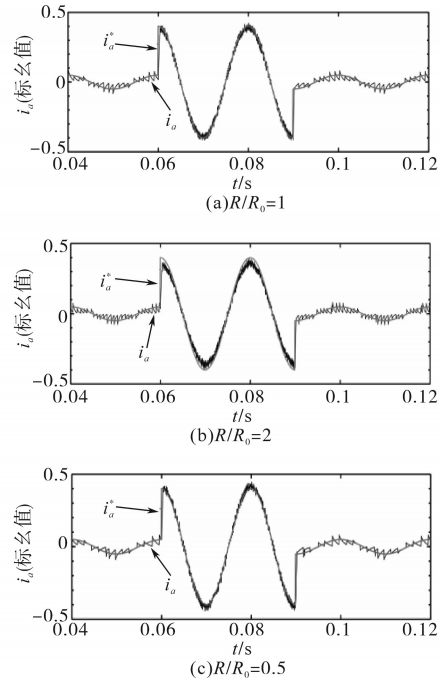


图10 负载电阻参数扰动下的动态响应(FCSMPC控制器)
Fig.10 Dynamic response under disturbance of load resistance parameters (FCSMPC controller)

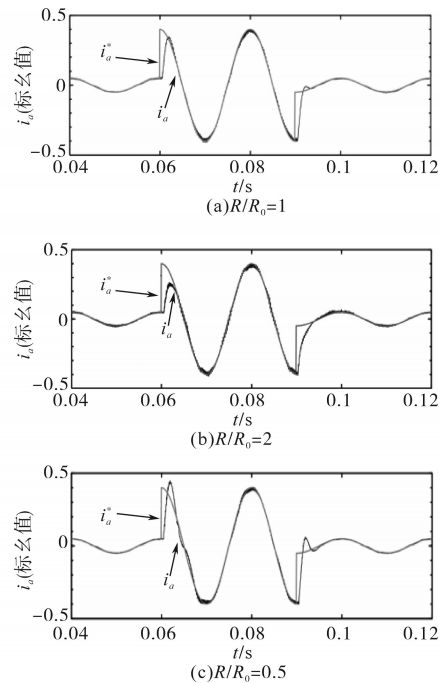


图11 负载电阻参数扰动下的动态响应(线性电流控制器)
Fig.11 Dynamic response under disturbance of load resistance parameters (linear current controller)

实验中具体操作步骤是首先将控制器中电阻参数设置为 $R=10\ \Omega$, $R=20\ \Omega$, $R=5\ \Omega$,实际电阻参数为 $R_0=10\ \Omega$,故一共设计了 $R/R_0=1$, $R/R_0=2$ 和 $R/R_0=0.5$ 三组实验,每组实验均采用FCSMPC控

制器和传统线性电流控制器对比的方式进行,而动态则是通过在控制器软件中设置电流参考 i_a^* 由原来的0.05(标么值)在 $t=0.06$ s时阶跃变化至0.4(标么值)实现的。

对比图10、图11可以看出,在不同负载电阻参数扰动下,包括参数匹配的情况下,FCSMPC的动态响应是明显快于线性电流控制器的。同时,如图11c所示,当负载电阻参数只有其标称值的50%时,线性电流控制器的动态响应呈现出更高的超调和振荡。综上,图10、图11实验波形表明,FCSMPC控制器和传统线性电流控制器相比,在涉及负载电阻参数较大扰动时,两者的稳态性能没有受到太大影响,但是传统线性电流控制器出现了较大的超调和振荡,故动态性能明显不如FCSMPC控制器。

4 结论

本文研究了模型参数扰动对FCSMPC控制策略的影响,研究基于三相二电平逆变器的电流预测控制开展,现总结主要结论如下:

1)理论推导表明,FCSMPC的预测误差不仅取决于模型中各个负载参数的不确定性,还取决于逆变器当前步长的负载电流值和输出电压值,尤其是当2个矢量方向完全相反时,预测误差达到最大。

2)通过与线性电流控制器的对比动静态实验结果表明,在负载电阻参数扰动下,FCSMPC的稳态误差将增加,而负载电感参数的变化导致较大的电流纹波,尤其在预测模型高估实际电感值时趋于严重。但当负载参数不匹配的情况下,FCSMPC的动态阶跃响应比线性电流控制器的鲁棒性更好。

考虑到模型中电感值与实际电感值不匹配导致FCSMPC控制器预测误差偏大,进而使得稳态性能下降的问题,进一步的研究方向为:在FCSMPC控制器每次迭代中计算预测误差,优化电压矢量输出,从而改善和加强控制器的鲁棒性。

参考文献

[1] 赵争鸣,施博辰,朱义诚. 高压大容量电力电子混杂系统控

制技术综述[J]. 高电压技术,2019,45(7):2017-2027.

- [2] 郭楚佳,燕天,张爱民,等. 离散集模型预测控制在电力电子装置中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(5):167-171.
- [3] 陶雪华,彭喜英. 五相感应电机有限控制集模型预测容错控制[J]. 电气传动,2019,49(8):17-21.
- [4] 程国栋,吴玮,夏晶晶,等. 三相LCL并网逆变器改进模型预测控制策略[J]. 电力电子技术,2019,53(7):14-17.
- [5] 安峰,宋文胜,杨柯欣. 电力电子变压器的双有源全桥DC-DC变换器模型预测控制及其功率均衡方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(13):3921-3929.
- [6] 宋卫章,刘江,孙向东,等. 基于模型预测控制的三相—相矩阵变换器偏磁控制[J]. 电工技术学报,2019,34(12):2489-2498.
- [7] 程建材,康龙云,胡毕华,等. 三电平并网逆变器恒定开关频率的模型预测控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):169-175.
- [8] 张斌,许伟奇,戴乾军. 三相八开关容错逆变器的PMSM驱动系统FCS-MPC策略[J]. 电机与控制学报,2019,23(6):81-92.
- [9] 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.
- [10] Kwak S, Moon U C, Park J C. Predictive-control-based direct power control with an adaptive parameter identification technique for improved AFE performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014,29(11):6178-6187.
- [11] 宋文胜,蒋蔚,刘碧,等. 单相级联H桥整流器简化模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):1127-1138.
- [12] 吴靖南,吴奕锴,康文. 逆变器模型预测采样时间与误差关系仿真分析[J]. 电测与仪表,2017,54(2):105-108.
- [13] 王楠楠,蔡彬. 一种基于改进模型预测控制算法的永磁同步电机多参数辨识研究[J]. 微电机,2018,51(11):68-73.
- [14] Rodriguez J, Pontt J, Silva C A, *et al.* Predictive current control of a voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007,54(1):495-503.
- [15] Bogado B, Barrero F, Arahal M R, *et al.* Sensitivity to electrical parameter variations of predictive current control in multiphase drives[C]//39th Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'13), IEEE, 2014: 5215-5220.
- [16] 金涛,沈学宇,苏泰新,等. 三电平逆变器的改进无模型预测电流控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):86-91.
- [17] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2019.

收稿日期:2019-10-22

修改稿日期:2019-12-09