

电机系统模型预测控制研究综述*

朱 芮¹, 吴 迪², 陈继峰¹, 胡家全¹, 华国武¹

(1. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏海洋大学 电子工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘 要: 近年来, 模型预测控制(MPC)的理论和技術得到了长足发展, 应用前景广阔。介绍了 MPC 的基本原理; 简要对比分析了国内外电机系统 MPC 技术的研究概况。研究了有限控制集模型预测控制(FCS-MPC)应用于电机驱动系统的控制方案。总结了 FCS-MPC 关于价值函数设计、计算量降低、矢量作用个数以及鲁棒性提高等方面的研究思路。展望了未来 FCS-MPC 技术需要进一步深入和拓展的研究方向。

关键词: 模型预测控制; 有限控制集模型预测控制; 电机驱动系统

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)08-0001-10

A Review of Research on Motor System Model Predictive Control*

ZHU Rui¹, WU Di², CHEN Jifeng¹, HU Jiaquan¹, HUA Guowu¹

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Electronic Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: In recent years, the theory and technology of model predictive control (MPC) had been greatly developed, enjoying a wide application prospect. Basic principles of MPC were summarized. Current research situation of MPC technology in the motor system was briefly compared and analyzed. The control scheme of finite control set model predictive control (FCS-MPC) applied in the field of motor drive was researched. The research ideas of FCS-MPC were summarized on several aspects such as value function design, reduction of computation, vector action number and improvement of robustness. In the end, some new ideas and new trends were recommended to be studied on the technology of FCS-MPC for further research.

Key words: model predictive control; finite control set model predictive control; motor drive system

0 引 言

模型预测控制(MPC)又称为滚动时域控制(RHC), 产生于20世纪70年代末, 是一种从工业过程控制中产生的新型控制算法^[1-2], 实用性较强, 并在实际应用中得到不断的发展和完善, 广泛应用于电力、汽车、化工、航天、能源等领域。

一般工业过程中存在多变量耦合、非线性以及不确定性等问题, 很难建立准确的模型。因此, 采用经典PID控制器或者是一些传统的控制算法所得到的效果并不理想, 存在一定的局限性。

MPC最突出的特点是“边走边优化”, 且对模型的精确性要求较低, 因此能够有效地用于复杂对象的控制。MPC的提出原本是为了解决实际工业过程控制中的问题。MPC被控对象惯量大、响应速度较慢, 可微调控制动作, 但电机的动态响应时间大都是毫秒级甚至微秒级的, 使得MPC算法在电机驱动系统中的应用受到了阻碍。

21世纪以来, 随着微处理器技术的快速发展, MPC已经通过不同控制要求的控制器在不同类型的电机上成功应用。如: 数字信号处理器(DSP)^[3]、现场可编程门阵列(FPGA)^[4]和

* 基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51707078)

作者简介: 朱 芮(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

dSPACE 半物理仿真系统^[5]等。这些控制器所使用的微处理器单元具有指数增长的计算能力,可以满足大多数应用的要求,即便是在多电平变换器上^[6]。此外,MPC 不依赖于机器类型,只要电机的数学模型正确建立并集成到控制器设计中,就可以应用于异步电机、永磁同步电机、多相电机和开绕组电机^[7-10]等各种交流电机电气传动系统中。

模型预测控制应用于电气传动系统中时,可分为连续控制集模型预测控制^[11-13](CCS-MPC)和有限控制集模型预测控制^[14-15](FCS-MPC)。两者的主要区别:(1)优化方式不同。CCS-MPC 利用数学工具对价值函数求最优解得到最优控制量;而 FCS-MPC 利用变换器的离散性和有限性,遍历电压矢量,价值函数最小的电压矢量即最优控制量。(2)作用方式不同。CCS-MPC 中控制量通过脉冲宽度调制(PWM)方式作用于系统;而 FCS-MPC 中控制量直接作用于系统。与 CCS-MPC 相比,FCS-MPC 将目标优化和开关状态决策过程优化成一步,且具有概念简单、适用范围广、约束和非线性易纳入价值函数等优点,因此成为了近年来的研究热点之一。

本文首先综述了 CCS-MPC 和 FCS-MPC 在电机系统中的应用进展,然后通过实例介绍了 FCS-MPC 在电机系统中的主要策略,总结了 FCS-MPC 当前的研究热点,最后讨论了 FCS-MPC 未来可能的发展方向。

1 MPC 基本原理

在 MPC 中,不同种类的预测模型的具体实现形式有所不同,但相应的控制算法均存在共性,可归结为 3 个基本特征:预测模型、价值函数、滚动优化。MPC 基本思路如图 1 所示。

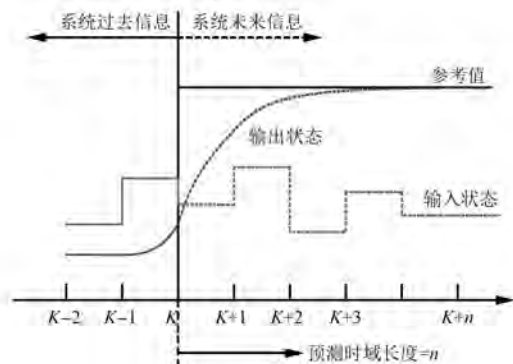


图 1 MPC 基本思路

从图 1 可以看出,首先,基于模型进行预测,即根据输入状态预测对应的输出轨迹;其次,根据构建的价值函数来评估不同输入状态的输出效果,并评估最优的输入策略使被控量的输出轨迹与预期的参考轨迹最为接近;最后,进行滚动优化,将第一个最优控制量输入,在下一采样时刻,重复优化过程。

1.1 CCS-MPC

CCS-MPC 源于经典的 MPC 理论。该方法对复平面上所有可连续旋转的空间电压矢量进行解析或数值计算,然后利用调制器在变换器中产生所需要的输出电压。同时,由于控制输入集中的备选电压矢量是无穷多个,无法用穷举法进行逐个寻优,需要通过构建优化问题求解最优电压矢量。

目前,应用于电机驱动领域的 CCS-MPC 算法主要有广义预测控制(GPC)和显式模型预测控制(EMPC)两类具体实现方案。此外,当系统存在模型失配或负载扰动时,预测误差将会变大,为了提升抗扰动能力,学者们对此进行了研究。本文称 CCS-MPC 为“扰动抑制类 MPC”策略。

1.1.1 GPC

GPC 是基于参数模型的控制方法,由英国牛津大学学者 Clarke^[16-17]于 1987 年首先提出。在电机驱动系统上的研究始于 2001 年^[18]。目前,GPC 在速度环控制中的应用研究最为广泛,核心思想是离线求解优化问题,在得到最优控制律后实现控制目标。在实际应用中,电机的定子电流和电压需要约束限制,但离线无法求解带约束的优化问题,因此在电机驱动领域的应用受到限制。

为了解决这一问题,文献[19]提出一种基于 GPC 的转速-电流单环控制方法,用 GPC 控制器代替电机矢量控制中的速度环和电流环,在获得相应的最优控制律后,通过电流限幅使单环控制下的电机在电流约束内工作。文献[20]通过外部校正方案对定子电压和电流的幅值进行限制,从而将无约束最优解转化成带约束最优解,在实现电机驱动系统的 GPC 策略时可以采用多变量的设计方案。

GPC 具有控制效果好、鲁棒性强等优点,可有效地克服过程的不确定性和非线性。因此在模型失配、死区时间和扰动条件变化的情况下,是一种较为理想的控制策略。然而,GPC 理论在实现

过程中较复杂,占用的计算资源较大,因此目前 GPC 不是很流行。

1.1.2 EMPC

EMPC 由瑞士学者于 2002 年提出^[21]。该算法包括离线计算和在线查表 2 个过程。EMPC 基本思想是在 MPC 的基础上,引入多参数二次规划算法,对整个状态空间进行划分。在确定最优控制律时,均能采取离线方案解决每一区域的二次规划问题,并将最优控制律存储于 RAM 或 ROM 中,且在线计算可简化为单纯的查表过程。在下一采样周期,重新读取系统状态,并重复查表过程,可实现对系统的在线控制。图 2 所示为 EMPC 算法及在线优化计算过程^[22]。

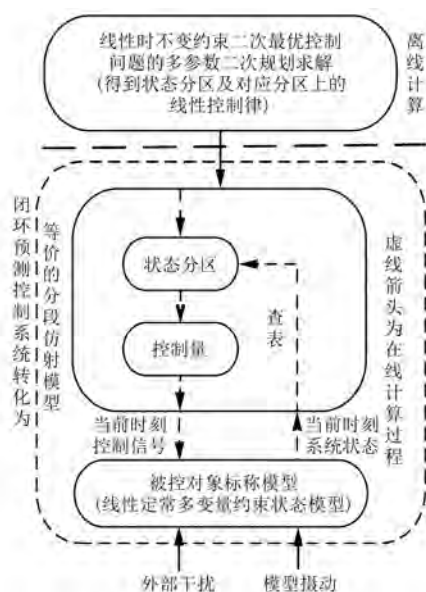


图 2 EMPC 控制过程

从图 2 可以看出,采用离线确定最优解的方法使在线计算时间大幅度减少,增强了被控系统的快速跟踪性能和鲁棒性。与 GPC 相比,EMPC 可直接获得带约束优化问题的离线最优解,因此在多变量控制领域优势很大。但在实际应用中大部分系统是非线性的,甚至同时包含离散和连续的变量,被控系统数学模型的复杂程度,对离线计算过程有较大的影响,难以体现算法的优势。因此,EMPC 并不能够完全取代传统 MPC。对此,有学者提出近似线性化的方法处理非线性系统^[23],降低控制量的精度来减低复杂度。目前,基于级联双闭环的 EMPC 已成功应用于电机驱动系统^[24]。

1.1.3 扰动抑制类 MPC

在实际应用系统中,扰动项难以建立精确的数学模型,而且电机参数易受升温和磁场饱和等影响,造成电机转速和转矩突变,影响对电机的精确控制。因此,在预测控制基础上通过研究电机的鲁棒控制技术来提高抗干扰能力具有重要的意义。文献[25]设计了扩展状态观测器(ESO)估计系统扰动,将系统总扰动作为新的状态变量,将估计的扰动量用于广义预测控制器的前馈补偿,来提高预测控制器的鲁棒性。文献[26]在动态矩阵控制(DMC)的基础上结合 ESO,DMC 进行反馈,ESO 完成前馈补偿,提高了动态响应性能,并且在负载干扰下转速的稳定性更高。文献[27]设计了基于预测函数和扰动观测器(DOB)的双环控制器,通过补偿外部扰动来提高系统的抗干扰能力。文献[28]提出的龙伯格(Luenberger)观测器的电流预测算法,解决了由于参数扰动而产生的电流静差和振荡的问题。

1.2 FCS-MPC

MPC 价值函数的求解过程是一种复杂的优化问题,运算时间过长,难以应用在电机驱动这类动态响应较快的系统中。2004 年,智利学者 Rodriguez 等^[29]提出 FCS-MPC 控制思想,将价值函数求解对应的复杂优化问题转变为整数规划问题,并成功应用于电机驱动系统。

FCS-MPC 可以分为最优切换矢量模型预测控制(OSV-MPC)和最佳切换序列模型预测控制(OSS-MPC)2 种类型^[30]。其中,OSV-MPC 是首先应用于电力电子领域的有限集 MPC 技术,同时也是当前最流行的 PMC 策略。OSV-MPC 将逆变器可能输出的电压矢量作为控制集,并只对该控制集进行预测,同时利用枚举搜索法求解出最优开关状态,直接作用于逆变器,在下一周期来临时,重复预测和寻优过程,使 MPC 策略变得非常直观。OSV-MPC 最大的缺点是在一个采样周期内只施加一个电压矢量,如果没有附加约束,有可能在连续几个周期均施加同一电压矢量。OSS-MPC 的控制集是由有限个可能的开关切换序列组成,将开关切换状态时刻作为附加的决策变量来考虑,在某种程度上类似于优化问题中的调制器^[31]。

FCS-MPC 存在一个关于时间补偿的重要问

题,是所有基于数字控制的实时实现的关键。在实际数字控制系统中采用基于 MPC 方案时,实际输出电压与指令电压之间存在一拍延迟(脉冲优化计算及配置占用的时间)。图 3(a)所示为预测时域长度为 1 的预测计算原理图,比如在 $[k, k+1]$ 期间最优电压矢量 U_3 ,但该矢量将在下一个采样时间段进行作用,因此预测与实际存在一拍的延时,对系统动、静态性能产生负面影响。为了消除影响,应该以 $k+1$ 时刻的变量作为预测的起始值,对 $k+2$ 时刻的变量进行预测,控制延迟可以通过图 3(b)所示的改进预测控制方法进行补偿,分两步进行预测和寻优。首先,在 k 时刻作用上一最优电压矢量;然后,预测该矢量在 $k+1$ 时刻的状态变量值;最后,利用状态变量值对所有开关状态组合进行第二步预测。此刻得到的最优电压矢量 U_2 即在 $k+1$ 时刻的作用,从而消除控制延迟。

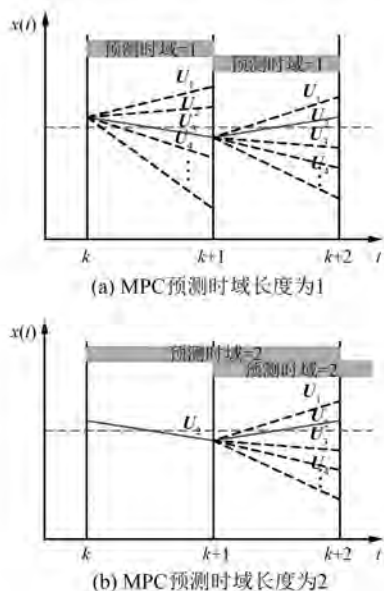


图3 预测控制延迟补偿

由于 FCS-MPC 无需调制单元,在考虑系统的可靠性和稳定性时,特别是对于严格要求恒定开关频率的应用场合, FCS-MPC 的开关频率不固定和开关频率不可调仍然是算法的缺点。对此,文献[32]将 FCS-MPC 与空间矢量脉冲宽度调制(SVPWM)思想相结合,提出了一种基于 SVPWM 的改进型 MPC,通过 SVPWM 技术将电压指令转换成开关状态,在保留了 MPC 优点的

同时实现了固定的开关频率。但调制单元的使用会进一步增加数字控制的系统延时问题,因此在 FCS-MPC 中应用 PWM 或 SVPWM 仍然是一个有争议的话题。

鉴于 FCS-MPC 易于非线性和约束控制,与 CCS-MPC 相比, FCS-MPC 具有更全面的优势^[33]。因此,下面主要讨论 FCS-MPC。

2 FCS-MPC 在电机系统中的应用

根据控制量的不同, FCS-MPC 可分为模型预测电流控制(MPCC)和模型预测转矩控制(MPTC)。文献[34]将 MPCC 和 MPTC 这 2 种控制方法的动态和稳态性能进行了详细的对比分析。MPCC 不需要对转矩和磁链进行估算和预测,计算量较小,可以通过提高采样频率或者增加预测步长提高系统性能;而 MPTC 除了需要对转矩和磁链进行估测,还需要平衡转矩和磁链之间的控制性能,在价值函数中设置合适的加权因子,使 MPTC 灵活性受到影响。为此,可以通过调整加权因子以达到各种指标,如低速区的最大转矩控制^[35]和高速区的弱磁控制^[36]等。虽然 MPCC 和 MPTC 有诸多不同,但是由于电压矢量优化过程的相似性,且两者均采用非线性预测控制器代替了传统控制策略中电流内环的 PI 调节器,控制方法具有较大程度的通用性。

2.1 MPCC

传统矢量控制一般是对解耦后的励磁电流和转矩电流采取 PI 控制,而 MPCC 延续了矢量控制中 dq 变换这一核心思想。在所有的 MPC 中,只有 MPCC 是基于转子磁链定向来实现的,因此 MPCC 也被称为预测场定向控制(PFOC)。

永磁同步电机(PMSM) MPCC 的控制框图如图 4 所示。图 4 中采用的是 $i_d=0$ 控制方式,电流参考值 i_q^* 由转速 PI 调节器产生, $S(A, B, C)$ 产生的开关信号直接作用于逆变器。

根据经典 PMSM 数学模型^[38],可知 PMSM 在 dq 坐标系下的电压方程为

$$u_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega L_s i_q \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega L_s i_d + \omega \psi_f \quad (2)$$

价值函数来实现,且价值函数对控制变量误差的大小没有限制,通常可以表示为

$$g_1 = |x^* - x^p| \tag{9}$$

$$g_2 = |x^* - x^p|^2 \tag{10}$$

$$g_3 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} [x^*(t) - x^p(t)] dt \tag{11}$$

其中:上标“*”和“p”分别表示参考值和预测值。

式(9)~式(11)分别是绝对误差、平方误差和积分误差3种形式。因为绝对误差比平方误差产生的价值函数值更大,所以绝对误差是一个更快速的控制器,有利于降低脉动幅值,但产生的开关频率也会更高。积分误差形式是在整个采样周期求取每一时刻的误差平均值,因此能够更加准确地跟踪参考值。考虑到采样周期的长度,一般来说上述3种价值函数差异不大。

MPC 价值函数可以包含多个控制目标、变量与约束条件,并且能够同时实现控制。通过这种方式可以在控制典型变量(如电流、转矩或磁通)的同时添加降低共模电压、降低开关频率或减小零序电流等附加的控制要求。通常这些变量的单位或数量级是不同的,因此,难以将2个或者多个变量合并成一个价值函数。对此,需要针对每个附加项设置加权因子来调节该项与其他控制目标之间的权重关系,以达到预期的性能要求。根据价值函数中各项的性质,可以将电力电子系统基本价值函数分类,如表1所示。其中第一种代价函数由于只有一种类型的受控变量,因此不需要使用加权因子。此外,加权因子的设计是一个启发式过程,需要大量的模拟试验,为了减少确定加权因子的值所需的仿真次数,可以采用分支与定界算法,但仍然需要依据试验过程来确定参数。例如,在传统MPTC中多用试凑对加权因子进行优化设计,限制了MPC在电机控制中的实用性。对此,文献[40~41]推导出磁链、转矩间的解析关系,将对定子磁链和转矩的同时控制转换为对等效定子磁链矢量的控制,从而消除了加权因子,使算法简单易实现。文献[42]针对开绕组异步电机采用多目标控制方法,并通过排序法对多目标进行优化,实现了对转矩、磁链和开关频率3个控制目标的无加权系数控制。

表1 电力电子系统基本价值函数分类

类别	应用	价值函数
不含加权因子	电流控制	$ i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p + i_{\beta}^* - i_{\beta}^p $
	电压控制	$(v_{c\alpha}^* - v_{c\alpha}^p)^2 + (v_{c\beta}^* - v_{c\beta}^p)^2$
含次要项	降低开关频率	$ i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p + i_{\beta}^* - i_{\beta}^p + \lambda_{sw} n_{sw}^p$
	降低共模电压	$ i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p + i_{\beta}^* - i_{\beta}^p + \lambda_{cm} V_{cm}^p $
	转矩与磁通控制	$\frac{1}{T_{cn}^2} (T_e^* - T_e^p)^2 + \frac{\lambda_{\psi}}{\psi_{sn}^2} (\psi_s^* - \psi_s^p)^2$
同等重要	电容电压平衡	$\frac{1}{i_{sn}} [i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p + i_{\beta}^* - i_{\beta}^p] + \frac{\lambda_{\Delta V}}{V_{cn}} \Delta V_c^p $

3.2 减小计算量

传统 FCS-MPC 需要遍历控制集中的所有基本电压矢量,计算量大,且采样周期较短,限制了可用于求解 MPC 策略的算法。尤其对于多电平变换器,随着电平数的增加,计算量呈指数级增长,给数字芯片带来极大的压力,因此降低控制复杂度、简化在线计算量是当前的重要技术难点。目前国内外研究人员主要从预测过程和优化选择过程2个方面进行研究,在不影响系统性能的基础上,减少了计算量。

针对预测过程的优化,文献[43]对 PMSM 定子电流和定子磁链之间的关系进行分析,提出了一种只需对定子磁链进行预测的改进型 MPTC,省却了计算量最大的定子电流预测过程。文献[44]提出的基于快速矢量选择的 MPC,既无需对定子电流进行7次预测,也无需遍历所有基本电压矢量,即可选择出最优电压矢量,使算法的复杂度和计算量显著降低。文献[45]引入偏移电压矢量的概念,将计算出的偏移磁链误差矢量作为最优电压矢量选择的判断标准,只需要一次预测并通过简单计算便实现了扇区判断,继而选出目标控制电压矢量。此外,结合无差拍思想,如文献[46]根据无差拍电压矢量所在扇区,只对该扇区内的非零电压矢量和2个零矢量进行寻优。文献[47]也是首先计算无差拍电压矢量,然后根据其位置将有限控制集减小为所在扇区的3个相邻的非零电压矢量,减少了寻优次数。

针对选择过程的优化,文献[48]针对 NPC 三

电平逆变器提出了开关状态预选的方法,根据上一周期作用的开关状态组合来优化选择下一周期的备选开关状态组合,将 27 个预选开关状态组合减少为 7 个,并规定每个采样周期开关切换次数不超过 4 次,开关频率也有所降低。但是该方法预选的开关状态中可能不含最优控制量,从而影响控制性能。文献[49]针对开绕组 PMSM,根据转矩偏差和定子磁链位置开发了一种开关矢量表,将 19 个备选电压矢量减少至 6 个,减小了控制集。文献[50]通过对空间电压矢量进行 2 次扇区划分,由大六边形扇区得到第一个电压矢量,再由电压矢量所在的小六边形扇区确定第二个电压矢量,只需要对 2 个电压矢量进行择优,减少了计算量。此外,在三相电压源逆变器中,由于零矢量产生的共模电压较高,文献[51]直接将非零电压矢量作为备选电压矢量。为了进一步降低开关频率,文献[52]则将 3 个相邻的非零电压矢量和 1 个非零电压矢量作为控制集,在降低共模电压的同时减少了计算量。

3.3 多矢量 MPC

传统 MPC 在一个采样周期内只作用一个电压矢量,且长度和幅值均固定,从而导致控制量脉动较大等问题。为了提高系统的稳态性能,学者们提出多矢量 MPC 策略,按照电压矢量个数可以分为双矢量、三矢量等。

双矢量策略包括占空比策略,文献[53]在 1 个采样周期作用 1 个非零电压矢量和 1 个零矢量,利用占空比调节矢量幅值,但最终作用的电压矢量方法仍是 6 个固定的方向,控制量脉动抑制效果有限。为了使电压矢量方向和幅值均可调,文献[54]提出广义双矢量策略,第二个电压矢量不再限于零矢量,理论上能够获得全局最优的控制效果,但是需要进行 28 次寻优,计算量较大。对此,文献[55]提出了一种无需加权因子的广义双矢量模型预测磁链控制,减小了工作量。文献[56]提出一种改进双矢量方法,通过 2 次价值函数得到 2 个最优矢量,系统控制集减小为 18 组开关序列,但是选择第二个电压矢量时只考虑了与第一个电压矢量相邻的电压矢量和零矢量,一定程度上影响了控制性能。

为了扩大备选电压矢量的覆盖范围,有学者提出三矢量 MPC 策略。文献[57]通过查询矢量

表得到所需的电压序列,使开关频率显著降低,但难以保证所选电压矢量组合为系统最优电压矢量。由于文献[58]中在 1 个采样周期内所作用的 3 个电压矢量中的 2 个非零电压矢量为相邻的电压矢量,所以文献[59]提出了改进方案,在 1 个采样周期中作用 2 个任意非零电压矢量和 1 个零矢量,由这 3 个电压矢量合成一个方向和幅值均可调的虚拟电压矢量。由于受到计算量和开关频率的限制,因此目前三矢量 MPC 无法遍历任意 3 个电压矢量组合,在选择电压矢量时均是先选出 2 个非零电压矢量,然后将 1 个控制周期的剩余时间分配给 1 个零矢量。

3.4 增强参数鲁棒性

在 FCS-MPC 中,模型参数变化导致的模型失配问题会引起转矩和电流脉动增大,产生静态误差。对于模型参数偏差的改善措施,目前主要有模型参数辨识、构造扰动观测器 2 种具有较强参数鲁棒性的方法。

3.4.1 模型参数辨识

在预测控制策略中使用的电路参数是静态实测参数,会与电路实际运行时的参数存在失配现象,对系统性能产生影响。

对此,有学者通过在线估计对预测模型进行实时刷新,将模型参数偏差对控制性能的影响降到最低。目前有最小二乘法、模型参考自适应系统(MRAS)、卡尔曼滤波算法和人工智能算法等策略^[60]。文献[61]基于 MRAS 对电机的转子磁链以及电感进行在线辨识,使电流预测控制器的模型参数与实际电机参数相匹配。文献[62]通过引入递推最小二乘法的电感在线辨识算法,使得变换器在初始电感参数不准确的情况下仍能获得良好的控制精度和动态性能,提高了系统的参数鲁棒性。

3.4.2 构造扰动观测器

另一些学者则是通过构造 DOB 来减小模型失配给控制系统带来的影响。实际上,观测器相当于一个闭环估计器,通过引入一个增益矩阵对估计误差进行修正。文献[63-64]通过采用 DOB 对系统扰动进行前馈补偿,减小转矩的跟踪误差,系统的鲁棒性和抗干扰能力均得到了提高。文献[65]通过采用 Luenberger 观测器同样取得了良好的效果。

4 结 语

虽然 MPC 已经取得了巨大的发展,并表现出巨大的潜力,但 MPC 毕竟是一项发展中的新技术,除了当前的理论和应用研究外,未来依然有很多值得研究的地方:

(1) 虽然价值函数中加权因子设计方法的不成熟并未影响 MPC 在多种功率变换器中的成功实施,但是可以制定一套程序或者确定一些基本指导,以减少调整阶段所存在的不确定性并提高调整效率。此外,目前的研究成果中价值函数大多是固定的,不能随着控制过程的推进进行适当的调整。因此,可以寻找具有新结构的动态价值函数,或者通过采用多个价值函数并实现价值函数的动态切换来满足系统的不同需求等。

(2) FCS-MPC 按照预测步长可以分为单步预测和多步预测。单步预测只能保证选择出的电压矢量在当前控制周期是最优的,具有算法保守性,但暂态性能较好;多步预测虽然可以提高系统的稳态性能,但是计算量成倍增加,多步预测意味着计算量呈指数增长,这也是制约多步 MPC 广泛应用的主要原因。此外预测时域越长,性能对模型参数的依赖越大,为了保证多步预测有效的控制性能还需要考虑模型失配。因此,研究多步 MPC 将性能和运算量综合考虑来确定最优预测时域是今后研究的关键。

(3) 对于 MPC 来说,离散化的精度直接影响转矩、磁链和电流的控制误差。为了使算法简单和计算效率高,通常采用前向欧拉离散化,于是将负载建模成一阶系统。然而,对于更复杂的系统,近似逼近会将误差引入模型。因此,在今后的研究工作中需要寻求更为精确的离散化方法。

【参考文献】

- [1] RICHLET J, RAULT A, TESTUD J L, et al. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes [J]. Automatica, 1978, 14 (5): 413.
- [2] LEE J H. Model predictive control: review of the three decades of development [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2011, 9 (3): 415.
- [3] GUZINSKI J, ABU-RUB H. Speed sensorless induction motor drive with predictive current controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (2): 699.
- [4] ZHANG Z, WANG F, SUN T, et al. FPGA-based experimental investigation of a quasi-centralized model predictive control for back-to-back converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (1): 662.
- [5] ATALIK T, DENIZ M, KOC E, et al. Multi-DSP and FPGA-based fully digital control system for cascaded multilevel converters used in FACTS applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8 (3): 511.
- [6] ZHANG Z, SCHENEK J, TIAN W, et al. Direct predictive control of five-level dual flying capacitor active neutral point clamped converters with extended horizons [C] // 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2017.
- [7] OIKONOMOU N, GUTSCHER C, KARAMANAKOS P, et al. Model predictive pulse pattern control for the five-level active neutral-point-clamped inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49 (6): 2583.
- [8] CARPIUC S, LAZAR C. Lyapunov-based constrained explicit current predictive control in permanent magnet synchronous machine drives [C] // 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2014.
- [9] MARTÍN C, ARAHAL M R, BARRERO F, et al. Five-phase induction motor rotor current observer for finite control set model predictive control of stator current [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (7): 4527.
- [10] CHEN L, NIAN H. Model predictive control of semi-controllable open winding PMSG based on three level NPC converter [C] // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016.
- [11] 郑泽东,王奎,李永东,等.采用模型预测控制的交流电机电流控制器 [J].电工技术学报, 2013, 28 (11): 118.
- [12] 马宏伟,李永东,郑泽东,等.电流环模型预测控制在 PWM 整流器中的应用 [J].电工技术学报, 2014, 29 (8): 136.
- [13] 王东文,李崇坚,吴尧,等.永磁同步电机的模型预测电流控制器研究 [J].电工技术学报, 2014, 29

- (增刊 1): 73.
- [14] KOURO S, CORTES P, VARGAS R, et al. Model predictive control—a simple and powerful method to control power converters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(6): 1826.
 - [15] DAVARI S A, KHABURI D A, KENNEL R. An improved FCS-MPC algorithm for an induction motor with an imposed optimized weighting factor[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(3): 1540.
 - [16] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control —Part I. the basic algorithm[J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137.
 - [17] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control —Part II. extensions and interpretations [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 149.
 - [18] KENNEL R, LINDER A, LINKE M. Generalized predictive control (GPC)-ready for use in drive applications? [C] // 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, 2001.
 - [19] 刘旭东, 李珂, 张奇, 等. 基于非线性扰动观测器的永磁同步电机单环预测控制[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(7): 2153.
 - [20] BELDA K, VOŠMIK D. Explicit generalized predictive control of speed and position of PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3889.
 - [21] BEMPORAD A, MORARI M, DUA V, et al. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems[J]. *Automatica*, 2002, 38(1): 3.
 - [22] 蔡文豹. 显式模型预测控制及在电机控制中的应用 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
 - [23] TONDEL P, JOHANSEN T A, BEMPORAD A. An algorithm for multi-parametric quadratic programming and explicit MPC solutions [C] // Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001.
 - [24] MARIETHOZ S, DOMAHIDI A, MORARI M. High-bandwidth explicit model predictive control of electrical drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, 48(6): 1980.
 - [25] 刘旭东, 李珂, 孙静, 等. 基于广义预测控制和扩展状态观测器的永磁同步电机控制[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(12): 1613.
 - [26] 朱奇先, 王睿敏, 董海鹰. 基于前馈补偿的钻机系统永磁电机预测控制[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(1): 48.
 - [27] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于预测函数控制和扰动观测器的永磁同步电机速度控制[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1598.
 - [28] 薛峰, 储建华, 魏海峰. 基于龙伯格扰动观测器的永磁同步电机 PWM 电流预测控制[J]. *电机与控制应用*, 2017, 44(11): 1.
 - [29] RODRIGUEZ J, PONTT J, SILVA C, et al. Predictive control of three-phase inverter [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(9): 561.
 - [30] 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.
 - [31] VAZQUEZ S, MARQUEZ A, AGUILERA R, et al. Predictive optimal switching sequence direct power control for grid-connected power converters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(4): 2010.
 - [32] XUE C, SONG W, FENG X. Model predictive current control schemes for five-phase permanent-magnet synchronous machine based on SVPWM [C] // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016.
 - [33] 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.
 - [34] WANG F, LI S, MEI X, et al. Model-based predictive direct control strategies for electrical drives: an experimental evaluation of PTC and PCC methods [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(3): 671.
 - [35] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, Part 1: maximum torque per ampere operation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(4): 1912.
 - [36] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, Part 2: field weakening operation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(2): 648.
 - [37] WANG F, LI S, MEI X, et al. Model-based

- predictive direct control strategies for electrical drives: an experimental evaluation of PTC and PCC methods [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(3): 671.
- [38] 包广清, 何婷, 刘小宝. 永磁同步电机有限集模型预测直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 19.
- [39] 李奎, 韩振铎, 牛峰, 等. 基于模型预测控制的永磁同步电机共模电流抑制方法[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(2): 1.
- [40] 袁晓强, 张蔚, 於锋. 容错型混合励磁磁通切换电机的模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 21.
- [41] MUDDINENI V P, SANDEPUDI S R, BONALA A K. Simplified finite control set model predictive control for induction motor drive without weighting factors[C] // 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2016.
- [42] ESWAR K M R, KUMAR K V P, KUMAR T V. Modified predictive torque and flux control for open end winding induction motor drive based on ranking method[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(4): 463.
- [43] 雷亚洲, 徐艳平, 周钦. 基于改进模型预测控制的永磁同步电机 DTC 方法[J]. 电气传动, 2015, 45(9): 3.
- [44] 张永昌, 杨海涛, 魏香龙. 基于快速矢量选择的永磁同步电机模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 66.
- [45] SU J, SUN D. Simplified MPCC for four-switch three-phase inverter-fed PMSM [J]. Electronics Letters, 2017, 53(16): 1108.
- [46] XIE W, WANG X, WANG F, et al. Finite-control-set model predictive torque control with a deadbeat solution for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5402.
- [47] 郭晓君, 孙继卫. 基于 DSVM 的 PMSM 无差拍模型预测控制[J]. 微特电机, 2018, 46(7): 34.
- [48] KAKOSIMOS P, BAYHAN S, ABU-RUB H. Predictive control with uniform switching transitions and reduced calculation requirements [C] // IECON 2017 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017.
- [49] LUO Y, LIU C. Model predictive torque control of an open-end winding PMSM with reduced computation time [C] // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017.
- [50] SUN C, SUN D, ZHENG Z. A simplified model predictive control for open-winding PMSM [C] // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017.
- [51] HOSEINI S K, ADABI J, SHEIKHOLESLAMI A. Predictive modulation schemes to reduce common-mode voltage in three-phase inverters-fed AC drive systems[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(4): 840.
- [52] GUO L, ZHANG X, YANG S, et al. A model predictive control-based common-mode voltage suppression strategy for voltage-source inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6115.
- [53] DAVARI S A, Khaburi D A, KENNEL R. An improved FCS-MPC algorithm for an induction motor with an imposed optimized weighting factor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1540.
- [54] ZHANG Y, YANG H. Generalized two-vectors-based model predictive torque control of induction motor drives[C] // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014.
- [55] ZHANG Y, YANG H. Two-vector-based model predictive torque control without weighting factors for induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1381.
- [56] 嵇越, 薛雅丽, 万勇. 基于占空比优化的永磁同步电机双矢量 FCS-MPC[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6): 177.
- [57] ZHANG Y, HU J, ZHU J. Three-vectors-based predictive direct power control of the doubly fed induction generator for wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3485.
- [58] WANG X, SUN D. Three-vector-based low-complexity model predictive direct power control strategy for doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 773.
- [59] 徐艳平, 王极兵, 周钦, 等. 永磁同步电动机双优化三矢量模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1857.
- [60] 魏超. PMSM 参数辨识及其无模型电流预测控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

(下转第 30 页)

- Power Electronics, 2014, 29(10): 5542.
- [8] 王高林, 于泳, 杨荣峰, 等. 感应电机空间矢量 PWM 控制逆变器死区效应补偿[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 79.
- [9] 李毅拓, 陆海峰, 瞿文龙, 等. 基于谐振调节器的永磁同步电机电流谐波抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 423.
- [10] YUAN L, CHEN M, SHEN J, et al. Current harmonics elimination control method for six-phase PM synchronous motor drives[J]. ISA Transactions, 2015, 59: 443.
- [11] 廖勇, 甄帅, 刘刃, 等. 用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 119.
- [12] KIM S, LEE W, RHO M, et al. Effective dead-time compensation using a simple vectorial disturbance estimator in PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(5): 1609.
- [13] ZHANG G, WANG G, XU D, et al. ADALINE-network-based PLL for Position sensorless interior permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1450.
- [14] WANG G, LI T, ZHANG G, et al. Position estimation error reduction using recursive-least-square adaptive filter for model-based sensorless interior permanent-magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 5115.
- [15] WANG G, DING L, LI Z, et al. Enhanced position observer using second-order generalized integrator for sensorless interior permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 486.
- [16] ZHANG G, WANG G, XU D, et al. Multiple-AVF cross-feedback-network-based position error harmonic fluctuation elimination for sensorless IPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 821.
- [17] 王莉娜, 朱鸿悦, 杨宗军. 永磁同步电动机调速系统 PI 控制器参数整定方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 104.

收稿日期: 2019-04-10

(上接第 10 页)

- [61] 汪琦, 王爽, 付俊永, 等. 基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机电流预测控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7): 48.
- [62] 张永昌, 蔡倩, 彭玉宾, 等. 带参数辨识功能的三电平变换器高效模型预测控制方法[J]. 电气工程学报, 2018, 13(4): 1.
- [63] YAN L, DOU M, HUA Z. Disturbance compensation-based model predictive flux control of spmsm with optimal duty cycle[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 7(3): 1872.
- [64] WANG J, WANG F, ZHANG Z, et al. Design and implementation of disturbance compensation-based enhanced robust finite control set predictive torque control for induction motor systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2645.
- [65] 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.

收稿日期: 2019-04-16