

模型预测控制在永磁同步电机系统中的 应用发展综述*

常 勇¹, 包广清², 杨 梅³, 杨巧玲³

(1. 兰州石化职业技术学院 电子电气工程学院, 甘肃 兰州 730060;

2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

3. 武威市凉州区职业中等专业学校, 甘肃 武威 733000)

摘 要: 随着数字技术的发展, 模型预测控制 (MPC) 已经广泛应用于交流传动系统。首先介绍了经典 MPC 策略——有限控制集 MPC 和连续控制集 MPC 的原理。其次综述了多步预测控制、多矢量预测控制、具有参数鲁棒性的预测控制、广义模型预测、显式模型预测这些常见的改进 MPC 的研究现状, 并提出相关研究思路。最后, 根据 MPC 的应用需求和研究现状, 展望了未来需要进一步深入和拓展的研究方向。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测控制; 有限控制集模型预测控制; 连续控制集模型预测控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)08-0011-07

Application and Development of Model Predictive Control in Permanent Magnet Synchronous Motor System *

CHANG Yong¹, BAO Guangqing², YANG Mei³, YANG Qiaoling³

(1. College of Electronic and Electrical Engineering, Lanzhou Petrochemical Polytechnic, Lanzhou 730060, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. Wuwei City Liangzhou District Vocational Secondary School, Wuwei 733000, China)

Abstract: With the development of digital technology, the model predictive control (MPC) has been widely used in AC drive systems. Firstly, the principles of classical MPC strategies including finite control set MPC strategy and continuous control set MPC strategy were described. Secondly, the research status of the common improved MPC was summarized, such as multi-step predictive control, multi-vector predictive control, predictive control with parameter robustness, generalized model prediction and explicit model prediction, and the relevant research ideas were put forward. Finally, according to the application requirements and research status of MPC, the future research directions that needed to be further deepened and expanded were prospected.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive control (MPC); finite control set MPC; continuous control set MPC

0 引 言

永磁同步电机 (PMSM) 具有体积小、功率因数高、效率高及可靠性高等优点, 在各类驱动系统

中得到广泛应用。例如船舶电力推进系统^[1]、高铁牵引系统^[2]、新能源汽车驱动系统^[3]以及高档数控机床进给驱动系统^[4]等。工业生产中的复杂工况对电机的控制策略提出严格要求。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51767018); 甘肃省科技支撑计划项目 (1604GKCA021); 甘肃省教育厅科研业务项目 (2017A-012)

作者简介: 常 勇 (1988—), 男, 博士, 研究方向为电气设备故障诊断、信号处理、工业过程自动化仪表。

包广清 (1972—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力传动系统设计与控制等。

目前, PMSM 驱动系统的控制策略主要有电流矢量控制和直接转矩控制(DTC)两类。但是电流矢量控制采用的线性 PI 控制器在要求无超调、高动态性能的驱动场合仍存在缺陷^[5], 而 DTC 存在低速转矩波动大的问题^[6]。为了解决复杂工况下(如高压大功率、多电平逆变驱动等) PMSM 的控制问题, 以及降低低速转矩波动, 学者们提出了不同的先进控制策略, 如无位置传感器^[7]、滑模变结构控制^[8]、智能控制^[9]、模型预测控制(MPC)^[10]等, 其中 MPC 最受关注。MPC 算法起源于 20 世纪 70 年代后期, 具有优良的动态控制性能, 并且克服了工业控制过程中的非线性和不确定性, 但由于执行过程耗时较长, 起初只应用在石油、化工等过程控制领域, 并没有应用在电机控制这类快速动态响应的系统中^[11]。

随着数字技术的进步, 2004 年 Rodriguez 等^[12]率先成功地将 MPC 应用于 PMSM 驱动系统中, 得到了国内外学者的广泛关注。MPC 凭借多目标、多变量和多约束的控制特性以及直观、简单的设计方法, 在众多先进电机控制算法中脱颖而出, 在下一代 PMSM 控制策略中占有重要地位。按照控制动作的不同, PMSM MPC 策略可以分为有限控制集模型预测控制(FCS-MPC)^[13]和连续控制集模型预测控制(CCS-MPC)^[14]两类。其中 FCS-MPC 在预测模型中考虑了变流器的离散开关特性, 直接以逆变器开关信号作为控制动作, 无需调制技术的辅助; CCS-MPC 在建立预测模型过程中, 并未考虑逆变器的数学模型, 需要辅助调制技术输出最优定子电压来控制电机。按照控制行为分类, PMSM MPC 策略可以分为预测电流控制、预测转矩控制、预测转速控制和预测位置控制等。

与工业控制过程不同的是电机动态响应时间通常为毫秒级或微秒级, 导致目前 MPC 理论研究远远超前实际应用水平。本文详细分析了产生这种现象的原因, 并且综述了 FCS-MPC 和 CCS-MPC 的原理和常见的改进模型预测算法的研究现状, 提出了当前亟待解决的关键问题以及未来发展趋势。

1 MPC 基本原理

MPC 算法的原理: 在当前控制时刻, 利用可预测未来多个控制周期内的动态数学模型, 计算有限时域内不同控制序列作用下的系统行为, 并采用预

设的价值函数得到最优控制序列, 但是仅将最优控制序列中的第一个控制行为作用于系统, 以实现滚动优化^[15]。MPC 算法有以下 3 个基本特征。

(1) 预测模型。预测模型是 MPC 的基础元素, 作用是精确描述控制对象的输入、输出关系。一般采用脉冲响应、传递函数和状态方程作为预测模型。其中, 传递函数常应用于线性系统; 状态空间模型常用来描述多变量过程, 并且通过扩展可处理非线性问题。电机驱动系统是一个多变量系统, 因此 PMSM MPC 算法中的预测模型一般采用状态空间形式:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y = Cx(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x ——状态向量;

A 、 B 、 C ——状态、输入、输出系数矩阵;

u ——输入变量;

y ——过程输出变量。

(2) 成本函数。成本函数的作用在于衡量不同逆变器开关状态下控制量的参考值与预测值的相近程度。成本函数的通用表达式可写为

$$J = \sum_{j=N_d}^{N_p} \lambda_1 [y(t+j) - y^*(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_2 \Delta u^2(t+j-1) \quad (2)$$

式中: N_p 、 N_d 、 N_u ——最大预测时域、最小预测时域和控制时域;

$y(t+j)$ ——系统未来输出;

$y^*(t+j)$ ——参考信号;

λ_1 、 λ_2 ——权重系数;

Δu ——惩罚项。

MPC 的主要优点是能够在一个成本函数中同时包含若干个控制目标、变量和约束, 并同时控制。其中典型的控制变量有电流、电压、转矩或磁通, 同时也可以通过在成本函数中引入额外的控制要求, 如降低开关频率、降低共模电压以及无功功率控制等。由于这些控制量有不同的单位和数量级, 难以在同一个成本函数中组合不同控制量和惩罚项。因此, 成本函数中的每一个附加项都有一个特定的权重因子, 用于调整该控制变量相对于其他控制目标的重要性。为了达到预期的控制性能, 必须对这些参数进行适当的设计。

(3) 滚动优化。滚动优化是 MPC 控制策略

的另一基础元素。如果成本函数是二次型,那么一定存在最小值,寻找最小值点的方法是滚动优化的重要组成部分。FCS-MPC 将成本函数求解所对应的复杂优化问题变成整数规划问题,借助穷举寻优的方法来确定成本函数的最优解,但随着预测时域的增加计算量会以几何级数方式增加;而对于 CCS-MPC,一般求出使成本函数的变化率为零的最小值点来表示过去的状态以及未来给定的函数。

基于 MPC 的 PMSM 系统结构简图如图 1 所示,主要由 PMSM、逆变器和数字控制器三部分组成。基于 MPC 的永磁同步电机系统的输入量有开关信号和定子电压,输出量有定子电流、转速和位置。因此,MPC 算法选用逆变器开关信号或电机电压作为成本函数的控制动作,而选择定子电流、转速或位置作为被控对象的控制行为。

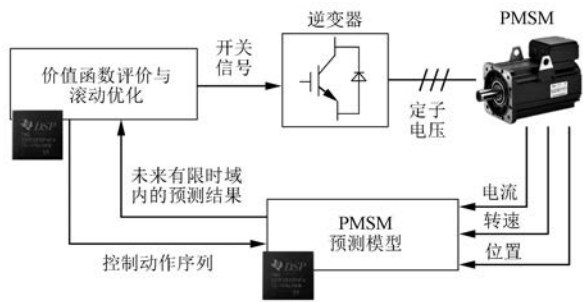


图 1 基于 MPC 的 PMSM 系统结构简图

MPC 不仅仅利用当前值和过去值的误差量,还利用预测模型来预测过程未来的误差值,最后采用滚动优化来确定当前的最佳控制策略。从控制策略的基本思想来看,MPC 算法优于传统的 PI 算法思想。近几年,国内外许多学者进一步对 MPC 策略提出改进。PMSM MPC 策略的主要分类如图 2 所示。

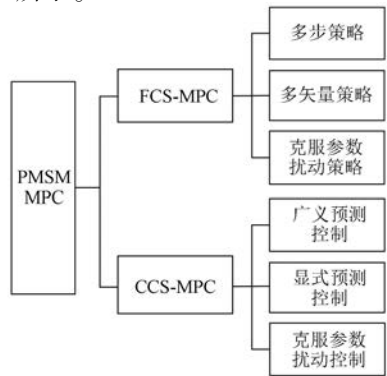


图 2 PMSM MPC 策略的主要分类

2 PMSM 系统 FCS-MPC 策略

2.1 有限控制集的定义

对于两电平电压型逆变器共有 8 种开关组合。其中可使直流母线侧与电机侧连通的有 6 种开关组合,将这 6 种有效开关组合对应的输出电压转换为空间矢量形式,可以得到 6 个幅值和空间位置固定的电压空间矢量 $U_1 \sim U_6$,称为有效电压矢量。除此之外,两电平逆变器上、下桥臂同时开通时还存在 2 种使直流母线侧与电机侧不连通开关组合,使电机定子线电压的幅值和相位均为零,可将对应的空间电压矢量称为零矢量。

FCS-MPC 是指从 8 种开关矢量中选择控制输入,而这 8 个开关矢量组成的控制集称为有限控制集。图 3 所示为 FCS-MPC 的示意图。

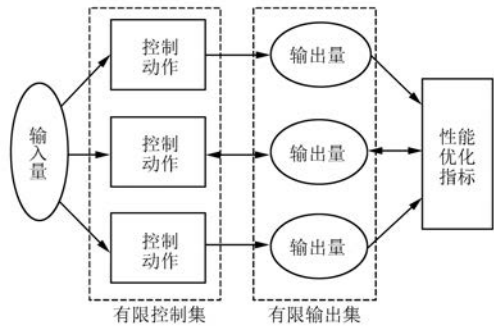


图 3 FCS-MPC 示意图

2.2 FCS-MPC 策略研究现状

随着研究的不断深入,学者们从抑制转矩波动、多步预测和参数鲁棒性等方面不断完善 FCS-MPC 策略,提出了多种改进型算法。

2.2.1 多步预测策略

由于预测控制的计算量随着预测步数的增加而呈现指数形式增长,FCS-MPC 策略一般采用一步预测控制,如果进行多步预测可使电机具备优良的动、静态特性并降低开关频率。因此,2013 年 ABB 公司的 Scoltock 等^[16]提出约束搜索预测控制策略(RSPC),对逆变器开关切换过程施加合理约束,通过减小成本函数最优解的搜索空间,在较短的离散周期内实现多步预测。2015 年 Geyer 等^[17]首先将多步预测控制的优化问题转换为整数最小二乘理论的优化问题,再利用球形解码算法来求解最小二乘问题,并对提出的方法进行了试验验证。文献[18]引入磁链和转矩滞环控制

对电机预测模型进行多步插值运算,同时选取使磁链和转矩在滞环内停留时间最长的电压矢量来控制电机,降低了多步预测控制策略的在线计算量。为了缩短多步预测控制的计算量,文献[19]利用现场可编程门阵列(FPGA)以期在短时间内求解多步策略对应的优化问题。

2.2.2 多矢量策略

单矢量预测电流控制是指在一个控制周期内只有一个电压矢量作用,使逆变器输出固定幅值的电压矢量,导致 FCS-MPC 在稳态运行时会出现高频电流谐波。经研究发现控制系统的稳定性与实际电压矢量的个数有关,学者们提出在一个离散控制周期内输出多种开关状态的组合来控制电机。该组合方法称为“多矢量策略”,北方工业大学张虎等^[20-21]在多矢量策略方面的研究取得了卓越成果。

双矢量电流预测控制指在一个控制周期内有 1 个非零电压矢量和 1 个零电压矢量共同作用,或者 2 个非零电压矢量共同作用。对于“单矢量+零矢量”控制策略,零矢量的作用是调节该矢量幅值,进而降低转矩脉动,但是不能控制输出矢量的方向;对于“双矢量”控制策略,由于第 2 个矢量不采用零矢量,因此能够合成相角、幅值可调的矢量去控制电机,对转矩、磁链幅值的控制灵活度增大。由上述分析可知,一个控制周期内所施加的电压矢量个数增加,那么所作用的电压矢量与参考电压更接近,电机的控制性能更高。2016 年,浙江大学学者^[22]、北方工业大学学者^[23]相继提出了“三矢量策略”,通过预测算法确定 3 个矢量,并借助空间矢量合成原理来得到逆变器对应的三相占空比。三矢量控制策略输出矢量幅值和相位均可自由调节,转矩和磁链的控制精度均得到了大幅改善。

2.2.3 克服参数扰动策略

FCS-MPC 的鲁棒性能会受到外界温度、电机新旧程度以及磁场饱和等因素的影响。为了消除参数失配对控制性能的影响,文献[24]提出了一种能够克服电机参数失配的预测转矩控制策略,并引入基于 PI 算法的预测误差补偿器,在此基础上建立了鲁棒转矩预测模型。通过仿真试验表明,所提方案能够消除参数变化对转矩预测的影响,具备较强的参数鲁棒性。文献[25]分析了基

本电压矢量和电机转矩、磁链的关系,构造了矢量评价因子表,通过成本函数从备选基本矢量中选出最优的电压矢量实现转矩和磁链的优化控制。该策略中所设计的矢量评价因子表与电机参数无关,具有较强的鲁棒性。文献[26]在有限控制集中加入若干由相角和幅值设定的虚拟矢量,构造虚拟矢量的转矩和磁链影响因子表。通过查表进行优化,保证了控制策略的鲁棒性,提高了控制精度。除此之外,文献[27]通过扰动观测器获得电机参数变化时控制器偏差的具体值,再利用前馈补偿控制方式消除参数变化对系统性能的影响。

3 PMSM 系统 CCS-MPC 策略

3.1 连续控制集定义

CCS-MPC 通过电压复平面内的任意相角、幅值的电压矢量实现对电机转矩磁链的调节。采用调制技术,如正弦波脉宽调制(SPWM)、空间矢量脉宽调制(SVPWM)等,使逆变器输出一系列脉宽可调的方波信号,再利用电机电感自身具有的低通滤波性能,对调制后的方波进行解调。不同于 FCS-MPC,CCS-MPC 的控制集由多个开关状态组成,每个开关状态的作用时间为连续值,因此需要借助调制技术,在一个控制周期内输出由多种开关组合搭配而成的脉宽调制波,合成出电压复平面上任意相角和幅值的电压矢量来控制电机。该组合方法能够选择的电压矢量数目趋于无穷大,增加了控制的自由度。CCS-MPC 示意图如图 4 所示。

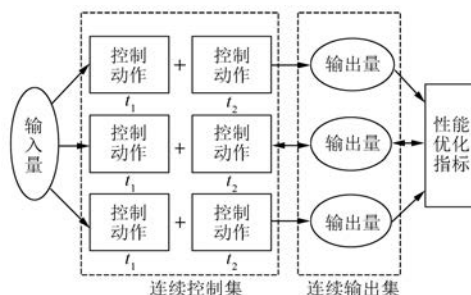


图 4 CCS-MPC 示意图

3.2 CCS-MPC 策略研究现状

由于连续集内存在无穷个备选电压矢量,无法通过穷举寻优进行在线逐一筛选,因此需要构建一定的优化问题来求解最优输出电压矢量。按照不同优化问题分类,CCS-MPC 策略主要有广义

预测控制和显式模型预测控制。

3.2.1 广义预测控制

广义预测控制(GPC)是MPC中最具代表性的算法,于1987年由英国牛津大学学者Clarke等^[28]提出。该算法基本思想是在预测时域内解析得到系统最优控制律,并结合自校正方法不断通过实际输入输出在线估计模型参数以进行修正。GPC具备自适应控制的优点,具有良好的动态性能;但也存在固有缺陷,如算法过于复杂、计算量较大等,限制了GPC在电机控制领域的应用。因此对GPC的研究主要从减少计算量角度来改进算法,以进一步满足实时控制的需要。文献[29]首先将电机驱动系统分为电流环和速度环,再分别获得电流广义预测控制器和速度广义预测控制器对应的最优控制规律,最后引入限幅环节满足逆变器的电流、电压极限条件。近年来,为了提升GPC对未建模扰动的抑制能力,学者们提出了重复模型预测控制(RMPC)和迭代学习模型预测控制(ILMPC)^[30-31]。此外,文献[32]提出了一种新的非线性广义预测控制方法,通过泰勒级数展开得到了较精确的预测模型,进而优化成本函数,设计目标跟踪控制器。在此基础上,文献[33]提出了一种基于扩展状态观测器的扰动估计方法,将系统的总扰动作为一个新的状态变量,构造状态观测器,通过观测器估计系统扰动值,并将估计的扰动量用于广义预测控制器的前馈补偿。

3.2.2 显式模型预测控制

2002年瑞士学者Bemporad等^[34]提出了显式模型预测控制(EMPC),有效地解决了MPC计算量大的问题。该算法基本思想是在MPC算法的基础上引入多参数二次规划算法,离线分析MPC最优控制问题,对整个状态空间进行状态分区的划分,并通过分段仿射函数的形式表示每个状态分区上对应的控制律,最后将在线计算简化为查表过程,提高了控制律反馈作用的实时性,在多变量控制领域具有巨大优势。但是在大规模系统中,存储容量问题成为EMPC发展的主要障碍。为此,文献[35]采用超平面排列思想,通过最优化合并类似区域的方法来减少分区数量,是一种用最少的分区数量保存原始信息的等效解决方案。2009年,Mariéthoz等^[36]提出了用级联式

EMPC控制器代替PI控制器的PMSM控制方案,并成功应用于电机驱动系统。Bolognani等^[37]打破传统双环级联结构的控制思路提出非级联EMPC的PMSM控制方案。浙江工业大学的张聚等^[38-39]对EMPC进行了深入细致的研究,不但对EMPC提出诸多改进,而且将EMPC应用到汽车、DC-DC变流器、电力保护系统等实际系统中。

4 MPC 发展与展望

MPC策略已成功应用于PMSM系统,并形成了以FCS-MPC和CCS-MPC为代表的成功范例。现有研究主要集中在改善电机系统动静态性能、提高抗干扰能力以及解决MPC在微处理器中的快速实现问题,然而PMSM系统MPC算法仍存在诸多问题亟待研究。

(1) FCS-MPC策略中电机参数变化会直接影响预测控制的性能,模型参数变化会导致模型失配。目前解决模型失配问题从构造扰动观测器、模型参数估计这2方面展开,被动地减小参数变化带来的影响,没有具体分析MPC对参数变化的容忍度,也没有从模型自身的抗干扰性出发。对成本函数的研究主要集中在多约束变量和加权系数配置,对控制系统的稳定性分析却很少,原因是构造的成本函数大多不符合李雅普诺夫函数的定义。FCS-MPC不需要调制单元,因此逆变器开关频率不固定、交流电压和电流的谐波频谱分散,限制了其实际应用。目前一般采用结合调制技术的思想和开关序列控制的思想,没有从根本上去分析FCS-MPC开关频率与控制量之间的关系。图5所示为FCS-MPC的发展与展望示意图。

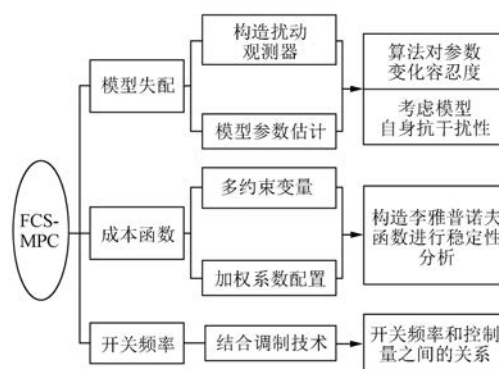


图5 FCS-MPC的发展与展望示意图

(2) CCS-MPC 策略需要 PWM 调制器, 开关频率固定并且可以得到解析解, 使得长预测时域的实现成为可能。计算量大的问题在基于 GPC 的电机控制系统中尤为突出, 对 GPC 的研究主要集中在降低计算量、解决带约束优化问题, 以及结合状态观测器来消除外部干扰对系统的影响, 目前 GPC 在电机控制领域的应用研究较少。对 EMPC 的研究集中在解决存储容量问题、改进划分状态区的方法及在线查找算法, 但是随着被控系统数学模型复杂度的增加, 获得状态区的数量呈指数形式增大, 离线的计算量增大所花费的时间更长。未来研究方向: 提出更有针对性的查找算法; 采用近似手段, 研究近似显式模型预测控制, 在有效控制的基础上, 希望通过牺牲精度来减少数据量, 提高计算速度。图 6 所示为 CCS-MPC 的发展与展望示意图。

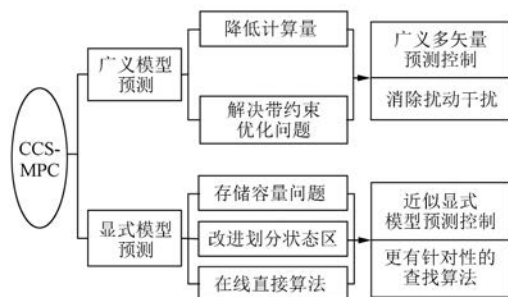


图 6 CCS-MPC 的发展与展望示意图

(3) 电机控制系统在实际运行中可能会存在各种影响, 例如控制器、传感器和电机在受到外部扰动时会产生系统延时、测量误差及参数漂移等现象, 使模型预测控制器应用于实际对象时可能造成系统参数整定困难、系统性能变差甚至失稳的后果, 对造成这些后果的原因缺少精细化的分析。在对电机控制精度要求越来越严格的今天, 鲁棒模型预测控制的研究已迫在眉睫。

(4) 电机是一类具有强耦合、非线性系统, 现阶段在构建预测模型时均是采用近似手法, 未来研究方向可通过非线性工具来构建电机 MPC, 进一步提高预测系统未来动态的准确性。

5 结 语

MPC 不仅利用当前值和过去值的误差量, 并且通过预测模型预测控制过程未来的误差值, 最

终采用滚动优化来确定当前的最佳控制策略。随着微处理器数据处理能力快速提升, MPC 控制在电机调速系统中的应用具有巨大的潜力, MPC 未来的发展方向是努力克服理论和实际的脱节。本文对 FCS-MPC 和 CCS-MPC 在 PMSM 中的应用进行了详细综述, 提出了相关研究思路, 并且展望了未来需要进一步深入和拓展的研究方向。

【参 考 文 献】

- [1] 陈再发, 刘彦呈, 卢亨宇. 船舶推进永磁同步电机参数在线辨识方法研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(10): 66.
- [2] 冯江华. 轨道交通永磁电机牵引系统关键技术及发展趋势[J]. 机车电传动, 2018(6): 9.
- [3] 郭栋, 吴琦, 祁晓野. 电动汽车永磁同步电机滑模低速控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(10): 119.
- [4] 解红磊, 张为民, 杨勇. 数控机床用永磁直线同步电机干扰力分析及补偿[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(10): 1554.
- [5] 陈伯时. 矢量控制与直接转矩控制的理论基础和应用特色[J]. 电力电子, 2004, 2(1): 5.
- [6] DEPENBROCK M. Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(4): 420.
- [7] 刘志宏, 杜明星, 魏克新. 一种永磁同步电机宽速域无传感器系统的控制策略[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 26.
- [8] 崔皆凡, 马桂新, 谢炜. 基于模糊滑模观测器的永磁同步电机进给系统速度估计[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 31.
- [9] GUMUS B, OZDEMIR M. Sensorless vector control of permanent magnet synchronous motor with fuzzy logic observer[J]. Electrical Engineering, 2006, 88(5): 395.
- [10] 刘雪松, 刘文生. 基于最大转矩电流比控制的永磁同步电机模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 38.
- [11] RICHalet J, RAULT A, TESTUD J L, et al. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes[J]. Automatica, 1978, 14(5): 413.
- [12] RODRIGUEZ J, PONTT J, SILVA C, et al. Predictive control of three-phase inverter[J]. Electronics Letters, 2004, 40(9): 561.
- [13] 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.
- [14] BEMPORAD A, MORARI M, DUA V, et al. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems[J]. Automatica, 2002, 38(1): 3.
- [15] 曾海莹, 刘瞰东. 模糊预测控制发展的概况[J]. 控制工程, 2006, 13(增刊1): 94.
- [16] SCOLTOCK J, GEYER T, MADAWALA U K. A comparison of model predictive control schemes for MV induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 909.
- [17] GEYER T, QUEVEDO D E. Performance of multistep finite control set model predictive control for power electronics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1633.
- [18] GEYER T. Computationally efficient model predictive direct torque control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 2804.
- [19] VYNCKE T J, THIELEMANS S, MELKEBEEK J A. Finite-set model-based predictive control for flying capacitor converters: cost function design and efficient FPGA implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1113.
- [20] 张虎, 张永昌, 杨达维. 基于双矢量模型预测直接功率控制的双馈电机并网及发电[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 69.
- [21] 张永昌, 谢伟, 李正熙. PWM 整流器功率脉动最小化方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 57.
- [22] WANG X, SUN D. Three-vector based low complexity model predictive direct power control strategy doubly fed induction generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 773.
- [23] 张永昌, 夏波, 杨海涛. 感应电机三矢量模型预测磁链控制[J]. 电气工程学报, 2017, 12(3): 1.
- [24] 周湛清, 夏长亮, 陈炜, 等. 具有参数鲁棒性的永磁同步电机改进型预测转矩控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 965.
- [25] XIA C L, WANG S, GU X, et al. Direct torque control for VSI-PMSM using vector evaluation factor table [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4571.
- [26] XIA C L, WANG S, WANG Z, et al. Direct torque control for VSI-PMSMs using four-dimensional switching table [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5774.
- [27] 易伯瑜, 康龙云, 冯自成, 等. 基于扰动观测器的永磁同步电机预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 37.
- [28] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control — Part I. the basic algorithm[J]. Automatica, 1987, 23(2): 137.
- [29] MARIÉTHOZ S, DOMAHIDI A, MORARI M. High-bandwidth explicit model predictive control of electrical drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 1980.
- [30] KIM S, CHOI D, LEE K, et al. Offset-free model predictive control for the power control of three-phase AC/DC converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7114.
- [31] OH S, LEE J M. Iterative learning model predictive control for constrained multi-variable control of batch processes [J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 93: 284.
- [32] ERROUSSI R, OUHROUCHE M, CHEN W H, et al. Robust cascaded nonlinear predictive control of a permanent magnet synchronous motor with anti-windup compensator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(8): 3078.
- [33] 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.
- [34] BEMPORAD A, MORARI M, DUA V, et al. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems[J]. Automatica, 2002, 38(1): 3.
- [35] GEYER T, TORRISI F D, MORARI M. Optimal complexity reduction of polyhedral piecewise affine systems[J]. Automatica, 2008, 44(7): 1728.
- [36] MARIÉTHOZ S, DOMAHIDI A, MORARI M. A model predictive control scheme with torque ripple mitigation for permanent magnet motors [C] // 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009.
- [37] BOLOGNANI S, BOLOGNANI S, PERETTI L, et al. Design and implementation of model predictive control for electrical motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1925.
- [38] 张聚, 丁靖. DC-DC 变换器显式模型预测控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(增刊1): 270.
- [39] 张聚, 陈圆, 丁靖. 电力系统电压崩溃的显式模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 8.

收稿日期: 2019-04-23